

L'ņĬĚĚŅĬĬőĵĬŅĵŐĸŃŐĵĬĚŅĶĕĬĽĚŐĸŃĕĶŅĕĶ

คู่มือการออกแบบ

และก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟ

ĴĚĶŅėĴ034/



สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร

คู่มือการออกแบบ

และก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟ

คู่มือการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟ

ISBN xxx-xxxx-xxxx

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2558

โดย สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.)
35 ถนนเพชรบุรี แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี

กรุงเทพมหานคร 10400

โทรศัพท์ 02-2151515 โทรสาร 02-2155500

คำนำ

เล่มคู่มือการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นคู่มือให้ผู้ปฏิบัติงานในการออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟ โดยมีเนื้อหาที่ประกอบไปด้วย เขตโครงสร้างทางรถไฟ (Structural Gauge) ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างทางรถไฟ (Track Structural Geometry) การออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟทั้งแบบมีหินโรยทางและไม่มีหินโรยทาง รางเชื่อมยาว (Continuous Welded Rail) องค์ประกอบของโครงสร้างทางรถไฟ(Track Structural Component) ประแจและจุดตัด (Switch and Crossing) การออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน (Transition Zone)ที่มีเนื้อหาครอบคลุมในส่วนของการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง (Wheel-Rail Interface) รวมไปถึงความปลอดภัยในการทำงานบนทางรถไฟ และการออกแบบและก่อสร้างทางระบายน้ำ ทั้งนี้คูมือฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยใช้มาตรฐานจากสหภาพยุโรป (European Norm, EN) เป็นแนวทางหลักร่วมกับ มาตรฐานจาก International Union of Railway (UIC) มาตรฐานจากประเทศสหรัฐอเมริกา (CFR & AREMA) มาตรฐานจากประเทศออสเตรเลีย (AS) มาตรฐานจากประเทศสาธารณรัฐเกาหลี (KR) มาตรฐานจากประเทศจีน (TB) และมาตรฐานและข้อกำหนดภายในประเทศ ตามเล่มมาตรฐานโครงสร้างทางรถไฟ นอกจากนี้ในการจัดทำเล่มคู่มือฉบับนี้ยังได้มีการระดมความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญสายงานต่าง ๆ ทั้งในระดับแผนและปฏิบัติงาน จุดประสงค์ก็เพื่อให้การออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟในประเทศไทยมีประสิทธิภาพและคุณภาพภายใต้ความปลอดภัย ซึ่งหวังเป็นอย่างยิ่งว่าคู่มือฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่จะนำไปใช้และปฏิบัติงานต่อไป

สารบัญ

			หน้า
บทที่ 1	**บทนำ**		**1-1**
	1.1	ขอบเขตและการใช้งาน	1-1
	1.2	เอกสารอ้างอิง	1-1
	1.3	ข้อกำหนดทั่วไป	1-2
	1.4	ภาพรวมของการออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟ	1-2
บทที่ 2	**เขตโครงสร้างทางรถไฟ (Structural Gauge)**		**2-1**
	2.1	ทั่วไป	2-1
	2.1.1	นิยามและสัญลักษณ์	2-1
	2.2	ลักษณะทั่วไปและองค์ประกอบของเขตโครงสร้างทางรถไฟ	2-9
	2.2.1	พิกัดเขตโครงสร้าง	2-9
	2.3	การคำนวณเขตโครงสร้างทางรถไฟ	2-11
	2.3.1	ข้อกำหนดในการหาพิกัดสถิตศาสตร์ (Static Gauge)	2-11
		- การหาผลรวมของค่าที่ยอมให้ (∑)	2-13
	2.3.2	ข้อบังคับในการหาพิกัดเชิงจลน์ (Kinematic Gauge)	2-17
	2.3.3	ข้อบังคับในการหาพิกัดเชิงพลวัต (Dynamic Gauge)	2-20
บทที่ 3	**ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างทางรถไฟ (Track Structural Geometry)**		**3-1**
	3.1	ทั่วไป	3-1
	3.1.1	มาตรฐานและคู่มือที่เกี่ยวข้อง	3-3
	3.2	หลักการและวิธีการออกแบบและวางแนวเส้นทางรถไฟ	3-4
	3.2.1	งานสำรวจและจัดทำพิกัด (Survey and Mapping)	3-5
	3.2.2	การออกแบบเส้นทางรถไฟในทางราบ (Horizontal Profile)	3-6
	3.3	การออกแบบเส้นทางรถไฟทางดิ่ง (Vertical Profile)	3-12
	3.3.1	ความชันของทาง (Gradient)	3-12
	3.3.2	การชดเชยความชัน (Grade Compensation)	3-12
	3.3.3	โค้งดิ่ง (Vertical Curve)	3-12
	3.4	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของแนวเส้นทางรถไฟ (Track Alignment Tolerances)	3-14

สารบัญ (ต่อ)

			หน้า
บทที่ 4	**การออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง**		**4-1**
	4.1	ทั่วไป	4-1
	4.2	การออกแบบโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง (ชั้นหินอนุภาค)	4-1
	4.2.1	คำนิยาม	4-1
	4.2.2	ตัวแปรสำหรับการออกแบบ	4-3
	4.2.3	ขนาด และ มิติ ของหน้าตัดโครงสร้างทางส่วนล่าง	4-4
	4.2.4	การวิเคราะห์สำหรับการออกแบบชั้นหินอนุภาค	4-5
	4.3	การออกแบบและก่อสร้างชั้นดินพื้นทางและคันทางสำหรับทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง	4-17
	4.3.1	การสำรวจและการทดสอบวัสดุฐานราก	4-17
	4.3.2	การออกแบบ	4-22
	4.3.3	การก่อสร้าง	4-37
	4.3.4	การลอกหน้าดินและนำวัสดุที่ไม่แข็งแรงออก	4-37
	4.4	การออกแบบและก่อสร้างชั้นรองหินโรยทางรถไฟ	4-43
	4.4.1	การออกแบบ	4-44
	4.4.2	วัสดุสำหรับก่อสร้างชั้นรองหินโรยทาง	4-46
	4.4.3	การก่อสร้างชั้นรองหินโรยทาง	4-48
	4.4.4	ข้อพิจารณาเพิ่มเติม	4-48
บทที่ 5	**การออกแบบโครงสร้างทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทาง**		**5-1**
	5.1	ทั่วไป	5-1
	5.2	องค์ประกอบและชนิดของทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทาง	5-2
	5.3	แรงกระทำที่พิจารณา (Load Condition)	5-7
	5.3.1	องค์ประกอบของน้ำหนักบรรทุกที่ต้องพิจารณา	5-7
	5.3.2	แรงกระทำในแนวดิ่ง (Vertical Load)	5-7
	5.3.3	แรงกระทำในแนวราบ (Horizontal Forces)	5-7
	5.3.4	ชนิดของแรงกระทำ	5-9
	5.4	การออกแบบโครงสร้างทางรถไฟชนิดไม่มีหินโรยทาง	5-9

สารบัญ (ต่อ)

			หน้า
	5.4.1	การคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับแผ่นพื้น	5-9
	5.4.2	ขั้นตอนในการออกแบบ	5-10
บทที่ 6	**รางเชื่อมยาว (Continuous Welded Rail)**		**6-1**
	6.1	ทั่วไป	6-1
	6.2	หน่วยแรงบนรางเชื่อมยาว	6-2
	6.3	ปฏิสัมพันธ์ระหว่างทางรถไฟที่วางรางเชื่อมยาวและสะพาน	6-6
	6.3.1	ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ของทางรถไฟและสะพาน	6-7
	6.4	การตรวจสอบและประเมินความปลอดภัย	6-15
	6.4.1	หน่วยแรงในแนวยาวที่ยอมให้บนหน้าตัดราง	6-15
	6.5	การใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์โครงสร้างรางเชื่อมยาว	6-16
	6.6	การก่อสร้างรางเชื่อมยาว	6-17
	6.7	การบำรุงรักษารางเชื่อมยาว	6-19
บทที่ 7	**องค์ประกอบของโครงสร้างทางรถไฟ**		**7-1**
	7.1	ทั่วไป	7-1
	7.2	ราง	7-1
	7.2.1	หน้าตัดรางและวัสดุ	7-1
	7.2.2	การออกแบบเพื่อเลือกหน้าตัดราง	7-4
	7.2.3	การทดสอบและตรวจสอบคุณภาพราง	7-8
	7.3	การเชื่อมราง	7-13
	7.3.1	การเชื่อมไฟฟ้า	7-14
	7.3.2	การเชื่อมเทอร์มิต	7-17
	7.3.3	การเชื่อมประแจ	7-18
	7.3.4	การทดสอบและตรวจสอบคุณภาพการเชื่อมราง	7-20
	7.3.5	ประกับราง	7-28
	7.3.6	คุณสมบัติทางกลและการทดสอบประกับราง	7-31
	7.3.7	คุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าและการทดสอบ	7-37

สารบัญ (ต่อ)

			หน้า
	7.4	จุดต่อเผื่อขยาย	7-38
	7.4.1	องค์ประกอบและวัสดุของจุดต่อเผื่อขยาย	7-38
	7.4.2	คุณสมบัติและการทดสอบจุดต่อเผื่อขยาย	7-50
	7.5	อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง	7-51
	7.5.1	องค์ประกอบและวัสดุของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง	7-51
	7.5.2	คุณสมบัติและการทดสอบของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง	7-53
	7.6	การออกแบบหมอนคอนกรีตรองรางรถไฟ	7-67
	7.6.1	การทดสอบหมอนคอนกรีต	7-80
	7.7	ประแจและจุดตัด	7-84
	7.7.1	รูปแบบและองค์ประกอบของประแจและจุดตัด	7-84
	7.7.2	การออกแบบลักษณะทางกายภาพของประแจ	7-89
	7.7.3	อุปกรณ์และการติดตั้งประแจ	7-94
	7.7.4	การตรวจสอบและความคลาดเลื่อนที่ยอมให้ของประแจและจุดตัด	7-106
บทที่ 8	**การออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน (Transition Zone)**		**8-1**
	8.1	บทนำ	8-1
	8.2	ความสัมพันธ์ระหว่างทางรถไฟและโครงสร้างอื่น ๆ	8-2
	8.3	หลักการวิเคราะห์และออกแบบ	8-2
	8.3.1	แบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ (Railway vehicle dynamic model)	8-3
	8.3.2	แบบจำลองทางพลศาสตร์ของทางรถไฟ (Track dynamic model)	8-6
	8.3.3	การสัมผัสกันระหว่างล้อและราง (Wheel-Rail Interface)	8-7
	8.3.4	ความขรุขระของทางรถไฟ (Track Irregularities)	8-8
	8.3.5	การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ (Dynamic analysis procedure)	8-11
	8.3.6	การทดสอบด้วยการตรวจวัดจริง (Field experiment)	8-12
	8.4	การก่อสร้างทางรถไฟบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน	8-12
	8.5	ตัวอย่างการก่อสร้างเพื่อแก้ปัญหาในบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน	8-13

สารบัญ (ต่อ)

			หน้า
บทที่ 9	**ความปลอดภัยในการทำงานบนทางรถไฟ**		**9-1**
	9.1	ขั้นตอนการใช้คู่มือระบบความปลอดภัยในการทำงานบนทางรถไฟ	9-1
	9.2	มาตรการรักษาความปลอดภัยบนทางรถไฟ	9-2
	9.2.1	มาตรการออกแบบระบบความปลอดภัยตามความเสี่ยงที่ 1	9-2
	9.2.2	มาตรการรักษาความปลอดภัยตาม ความเสี่ยงที่ 2	9-3
	9.2.3	มาตรการรักษาความปลอดภัยตาม ความเสี่ยงที่ 3	9-4
	9.2.4	มาตรการรักษาความปลอดภัยตาม ความเสี่ยงที่ 4	9-4
	9.2.5	มาตรการรักษาความปลอดภัยตาม ความเสี่ยงที่ 5	9-4
	9.3	ข้อปฏิบัติในการทำงานบนทางรถไฟ	9-5
	9.3.1	สาระสำคัญของการบำรุงทาง	9-5
	9.3.2	การปักป้ายลดความเร็วในการซ่อมทางธรรมดา	9-5
	9.3.3	งานบำรุงทางนอกเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องปิดทาง	9-5
	9.3.4	งานบำรุงทางนอกเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องปิดทางและต้องทำโดยฉุกเฉิน	9-5
	9.3.5	งานบำรุงทางในเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องปิดทาง	9-5
บทที่ 10	**การออกแบบและก่อสร้างทางระบายน้ำ**		**10-1**
	10.1	ทั่วไป	10-1
	10.1.1	นิยาม	10-1
	10.2	ประเภทของระบบระบายน้ำบนทางรถไฟ	10-3
	10.3	ระบบระบายน้ำผิวดิน	10-3
	10.3.1	รางระบายน้ำด้านข้าง	10-4
	10.3.2	รางดักน้ำ	10-5
	10.3.3	รางระบายน้ำรวมออกนอกพื้นที่	10-6
	10.4	ระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน	10-6
	10.4.1	หน้าที่ของระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน	10-7
	10.4.2	ประเภทของระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน	10-9
	10.4.3	ประเภทของวัสดุในงานระบายน้ำใต้ผิวดิน	10-11

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
10.5	การออกแบบระบบระบายบนทางรถไฟ (Design of Track Drainage)	10-17
10.6	ข้อกำหนดของการออกแบบ (Design Criteria)	10-17
10.6.1	การระบายน้ำผิวดิน	10-17
10.6.2	การระบายน้ำใต้ผิวดิน	10-19
10.7	การตรวจสอบการออกแบบ (Design investigation)	10-22
10.7.1	ขอบเขตของการตรวจสอบ	10-22
10.7.2	การกำหนดรูปแบบระบบระบายน้ำ	10-23
10.8	การคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องระบายในระบบระบายน้ำ	10-23
10.8.1	รอบปีการเกิดซ้ำเฉลี่ย	10-24
10.8.2	วิธี Rational Method	10-24
10.8.3	กรณีการไหลผ่านโครงสร้างควบคุม (อาคารชลศาสตร์)	10-31
10.8.4	การวิเคราะห์อัตราการไหลสูงสุดผ่านคันทางรถไฟ (กรณีอื่น ๆ)	10-32
10.9	การออกแบบการระบายน้ำผิวดิน (Surface Drainage Design)	10-35
10.9.1	การประมาณค่าอัตราการไหลสูงสุด	10-35
10.9.2	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่ง (Manning's Roughness Coefficient)	10-36
10.9.3	การกำหนดความลาดเอียงของรางระบายน้ำ	10-37
10.9.4	การคำนวณเพื่อเลือกขนาดหน้าตัดของรางระบายน้ำ	10-38
10.9.5	ตรวจสอบศักยภาพของหน้าตัดระบายน้ำที่กำหนด	10-41
10.9.6	ตรวจสอบความเร็วเฉลี่ยของการไหลในหน้าตัดที่กำหนด	10-42
10.9.7	ตรวจสอบการดาดรางระบายน้ำ	10-46
10.10	การออกแบบการระบายน้ำใต้ผิวดิน (Subsurface Drainage Design)	10-47
10.10.1	การระบายน้ำด้วยท่อ	10-47
10.10.2	การระบายน้ำด้วยวัสดุมวลรวม	10-50
10.11	สรุปขั้นตอนของการออกแบบการระบายน้ำบนทางรถไฟ	10-51
10.12	การก่อสร้างระบบระบายน้ำบนทางรถไฟ	10-55
10.13	การวางแนวและความลาดชันของระบบระบายน้ำ	10-55

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
10.14	การเตรียมหน้างานก่อสร้าง	10-56
10.15	งานขุด	10-56
10.16	การก่อสร้างระบบระบายน้ำผิวดิน	10-57
10.17	การก่อสร้างระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน	10-57
บรรณานุกรม		**ก**
ภาคผนวก		**ซ**



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ขอบเขตและการใช้งาน

คู่มือการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟได้จัดทำขึ้นโดยมีเนื้อหาสอดคล้องกับมาตรฐานโครงสร้างทางรถไฟทั้ง 10 ฉบับ (มขร S-T-001 ถึง มขร S-T-010)

1.2 เอกสารอ้างอิง

1.2.1 เอกสารอ้างอิงต่างประเทศ

- SPC 206 Track Construction, Version 1.4, Engineering Specification, Issued on June 2012 by New South Wales (NSW) Transport RailCorp.
- TMC 202 Track Fundamentals, Version 2.3, Engineering Manual, Issued on June 2012 by New South Wales (NSW) Transport RailCorp.
- TI 850-02 Railroad Design and Rehabilitation, Technical Instructions, Issued on March 2000 by US Army Corps of Engineers (USACE).
- AREMA Manual of Railway Engineering, Volume 1, Track, Issued in 2000 by American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA).

1.2.2 เอกสารอ้างอิงภายในประเทศ

- มาตรฐานการแบ่งประเภททางรถไฟ มขร S-T-001-256x
- มาตรฐานเขตโครงสร้างทาง มขร S-T-002-256x
- มาตรฐานการออกแบบและวางแนวเส้นทาง มขร S-T-003-256x
- มาตรฐานการออกแบบทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง มขร S-T-004-256x
- มาตรฐานการออกแบบทางรถไฟชนิดไม่มีหินโรยทาง มขร S-T-005-256x
- มาตรฐานรางเชื่อมยาว มขร S-T-006-256x
- มาตรฐานองค์ประกอบทางรถไฟ มขร S-T-007-256x
- มาตรฐานตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ มขร S-T-008-256x
- มาตรฐานความปลอดภัยบนทางรถไฟ มขร S-T-009-256x
- มาตรฐานระบบระบายน้ำบนทางรถไฟ มขร S-T-010-256x
- คู่มือการก่อสร้างทางรถไฟจากการรวบรวมเป็นการภายในโดยวิศวกรของการรถไฟแห่งประเทศไทย



1.3 ข้อกำหนดทั่วไป

- งานก่อสร้างและตรวจสอบทางรถไฟจะต้องถูกดำเนินการโดยบุคลากรของผู้รับเหมางาน และผู้รับเหมารายย่อยที่มีคุณสมบัติเหมาะสม และมีสมรรถนะเพียงพอ
- การทดสอบและตรวจสอบระหว่างการก่อสร้างเพื่อให้เป็นไปตามแบบในสัญญาและ/หรือมาตรฐาน มขร S-T-004-256x มขร S-T-006-256x และมขร S-T-007-256x
- งานก่อสร้างทางรถไฟจะต้องให้เป็นไปตามแบบที่ได้รับการอนุมัติจากเจ้าของงานและ/หรือมาตรฐาน มขร S-T-004-256x มขร S-T-006-256x และมขร S-T-007-256x รวมถึงมาตรฐานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มาตรฐานเขตโครงสร้างทาง มขร S-T-002-256x มาตรฐานการออกแบบและวางแนวเส้นทาง มขร S-T-003-256x มาตรฐานการออกแบบทางรถไฟชนิดไม่มีหินโรยทาง มขร S-T-005-256x มาตรฐานตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ มขร S-T-008-256x มาตรฐานความปลอดภัยบนทางรถไฟ มขร S-T-009-256x และมาตรฐานระบบระบายน้ำบนทางรถไฟ มขร S-T-010-256x
- หินโรยทาง ให้ใช้มาตรฐานการออกแบบทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง มขร S-T-004-256x
- หมอนรองราง ให้ใช้มาตรฐานองค์ประกอบทางรถไฟ มขร S-T-007-256x
- งานราง การเชื่อมต่อราง และอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง ให้ใช้มาตรฐานองค์ประกอบทางรถไฟ มขร S-T-007-256x

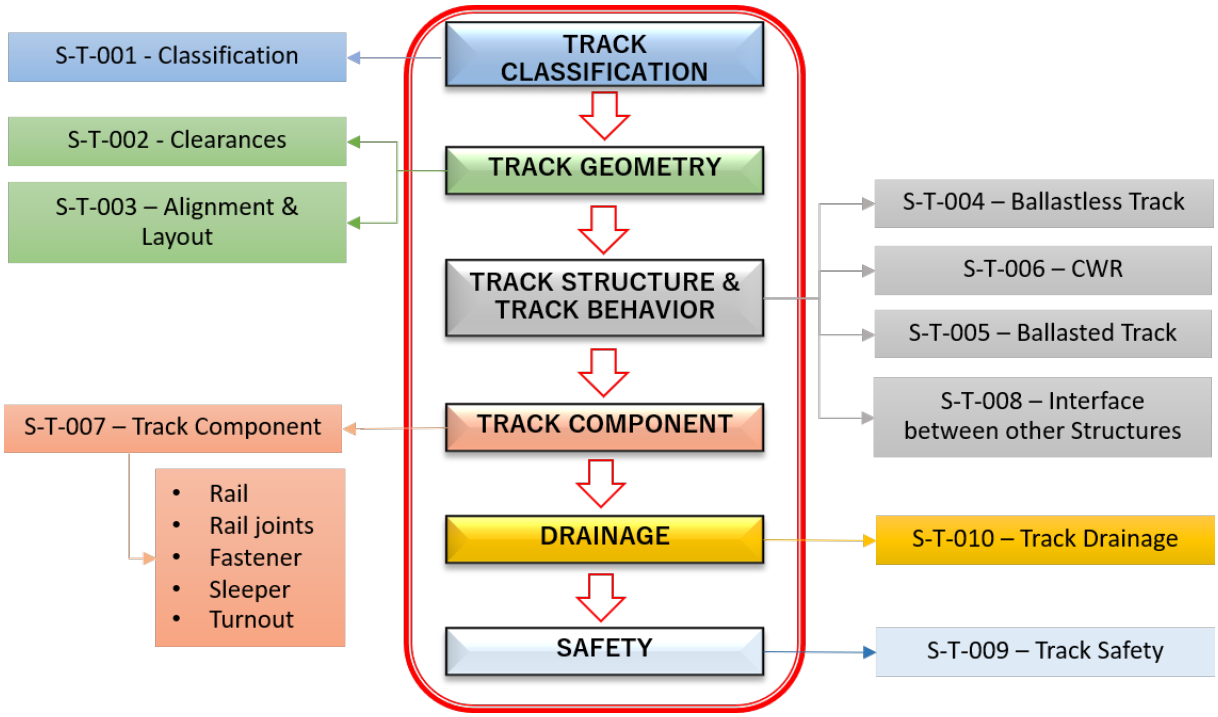
1.4 ภาพรวมของการออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟ

การออกแบบทางรถไฟมีหัวใจสำคัญคือ ต้องสามารถให้รถไฟแล่นผ่านได้อย่างปลอดภัย มีความคล่องตัวในการให้บริการ รวมทั้งยังมีอายุการใช้งานและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเป็นไปตามที่ออกแบบ โดยภาพรวมของคู่มือการออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟฉบับนี้ จะแบ่งการพิจารณาเป็นหัวข้อหลักดังต่อไปนี้ (รูปที่ 1-1)

- การแบ่งประเภทของทางรถไฟ (Track classification) ซึ่งเกี่ยวข้องกับขนาดทาง (Track gauge) น้ำหนักลงเพลา (Axle loads) ความเร็วในการให้บริการ (Operating speed) รวมไปถึงรูปแบบการเดินทางเช่น รถไฟระหว่างเมือง (Intercity line) และรถไฟในเมือง (Urban line) เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะมีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องคือ มขร-S-T-001
- กายภาพของทางรถไฟ (Track geometry) เป็นการออกแบบและก่อสร้างแนวเส้นทางของทางรถไฟไปตามพื้นที่ที่ต้องการ โดยมีการกำหนดรูปร่างของเส้นทางไปตามภูมิประเทศในแนวราบและแนวดิ่ง รวมไปถึงการกำหนดระยะเผื่อเพื่อให้รถไฟแล่นผ่านเส้นทางโดยปราศจากอุปสรรค ในหัวข้อนี้จะมีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องคือ มขร S-T-002 มขร S-T-003
- พฤติกรรมของโครงสร้างทางรถไฟ (Track structure and Track behavior) เป็นการควบคุมพฤติกรรมการรับน้ำหนักและแรงที่เกิดขึ้นต่อของทางรถไฟ จุดประสงค์ก็เพื่อให้ทางรถไฟมีความปลอดภัยและไม่เกิดความผิดปกติขณะให้บริการ โดยมีการกำหนดรายละเอียดในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทาง

เช่น การออกแบบโครงสร้างทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted track) การออกแบบโครงสร้างทางรถไฟแบบไม่ใช้หินโรยทาง (Ballastless track) การควบคุมพฤติกรรมของรางเชื่อมยาว (Continuous welded rail - CWR) การควบคุมการสั่นสะเทือนบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างโครงสร้างทางต่างชนิดกัน (Transition zone) เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะมีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องคือ มขร S- T- 004 มขร S-T-005 มขร S-T-006 มขร S-T-008

- องค์ประกอบทางรถไฟ (Track component) เป็นการกำหนดรายละเอียดส่วนประกอบของทางรถไฟให้มีคุณสมบัติเพียงพอต่อการใช้งาน ซึ่งประกอบไปด้วย ราง (Rail) จุดต่อราง (Rail joint) อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง (Fastener) หมอนรองราง (Sleeper and bearer) และประแจ (Turnout) โดยในหัวข้อนี้จะมีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องคือ มขร S-T-007
- การออกแบบระบบระบายน้ำของทางรถไฟ (Drainage) เป็นการกำหนดรายละเอียดในการออกแบบและก่อสร้างระบบระบายน้ำของทางรถไฟ เพื่อให้การระบายน้ำออกจากทางนั้นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและไม่เกิดอันตรายต่องโครงสร้างทาง ในหัวข้อนี้จะมีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องคือ มขร S-T-010
- ความปลอดภัยในการทำงานบนทางรถไฟ (Safety) เป็นการกำหนดรายละเอียดของความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับทางรถไฟที่ต้องคำนึงถึง อาทิเช่น การทำงานบนทางรถไฟ เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะมีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องคือ มขร S-T-009



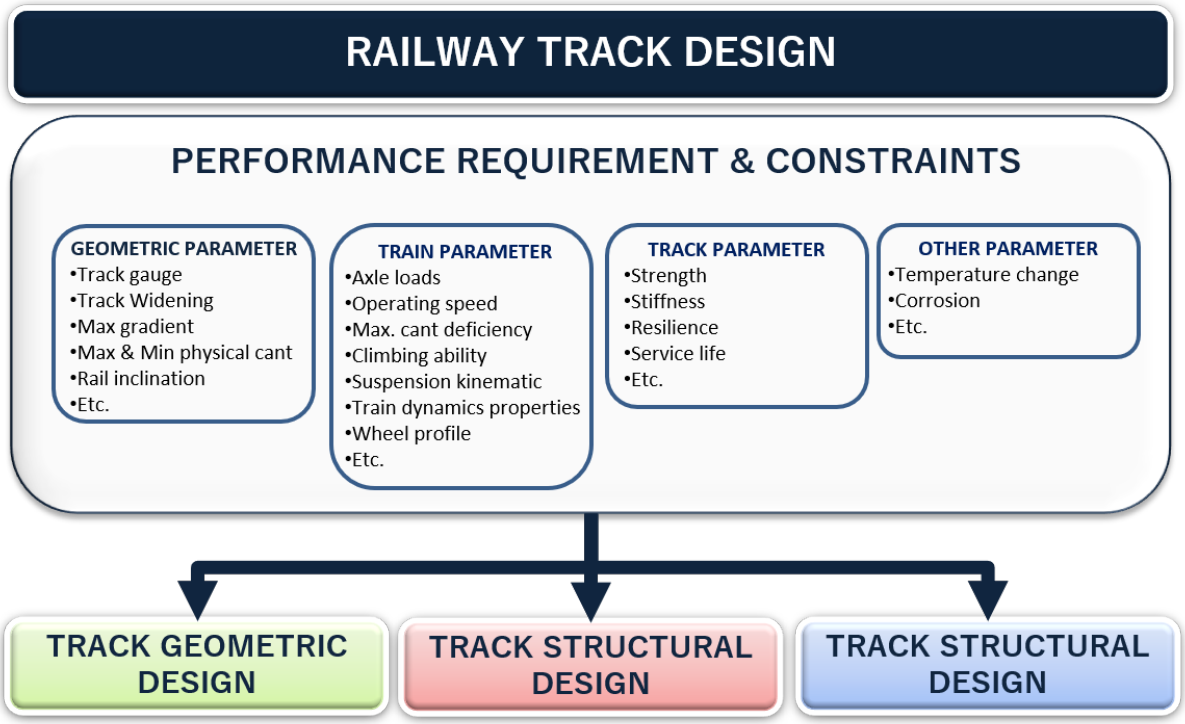
รูปที่ 1-1 ภาพรวมของการออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟและการเชื่อมโยงของมาตรฐานฯ

รายละเอียดปลีกย่อยของคู่มือการออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟฉบับนี้จะแบ่งเป็นสามส่วนหลักซึ่งสอดคล้องกับหลักปฏิบัติของการก่อสร้างทางรถไฟ ประกอบด้วย

- รายละเอียดในส่วนของการออกแบบ (design stage) เป็นการกำหนดคุณสมบัติขององค์ประกอบต่าง ๆบนทางรถไฟเพื่อให้ทางรถไฟมีประสิทธิภาพในการให้บริการที่เพียงพอต่อความต้องการ
- รายละเอียดในส่วนของการก่อสร้าง (construction stage) เป็นการกำหนดวิธีการและขั้นตอนในการก่อสร้าง เพื่อให้ทางรถไฟที่แล้วเสร็จนั้นมีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ออกแบบไว้
- รายละเอียดในส่วนของการตรวจสอบและรับรอง (test and approval) เป็นการกำหนดรายละเอียดของการทำการทดสอบเพื่อประเมินคุณสมบัติและสมรรถนะของทางรถไฟให้เป็นไปตามที่ออกแบบ โดยจะมีรายละเอียดของค่าความผิดพลาดที่ยอมให้ (Tolerances) ในกรณีต่าง ๆ

การออกแบบทางรถไฟ

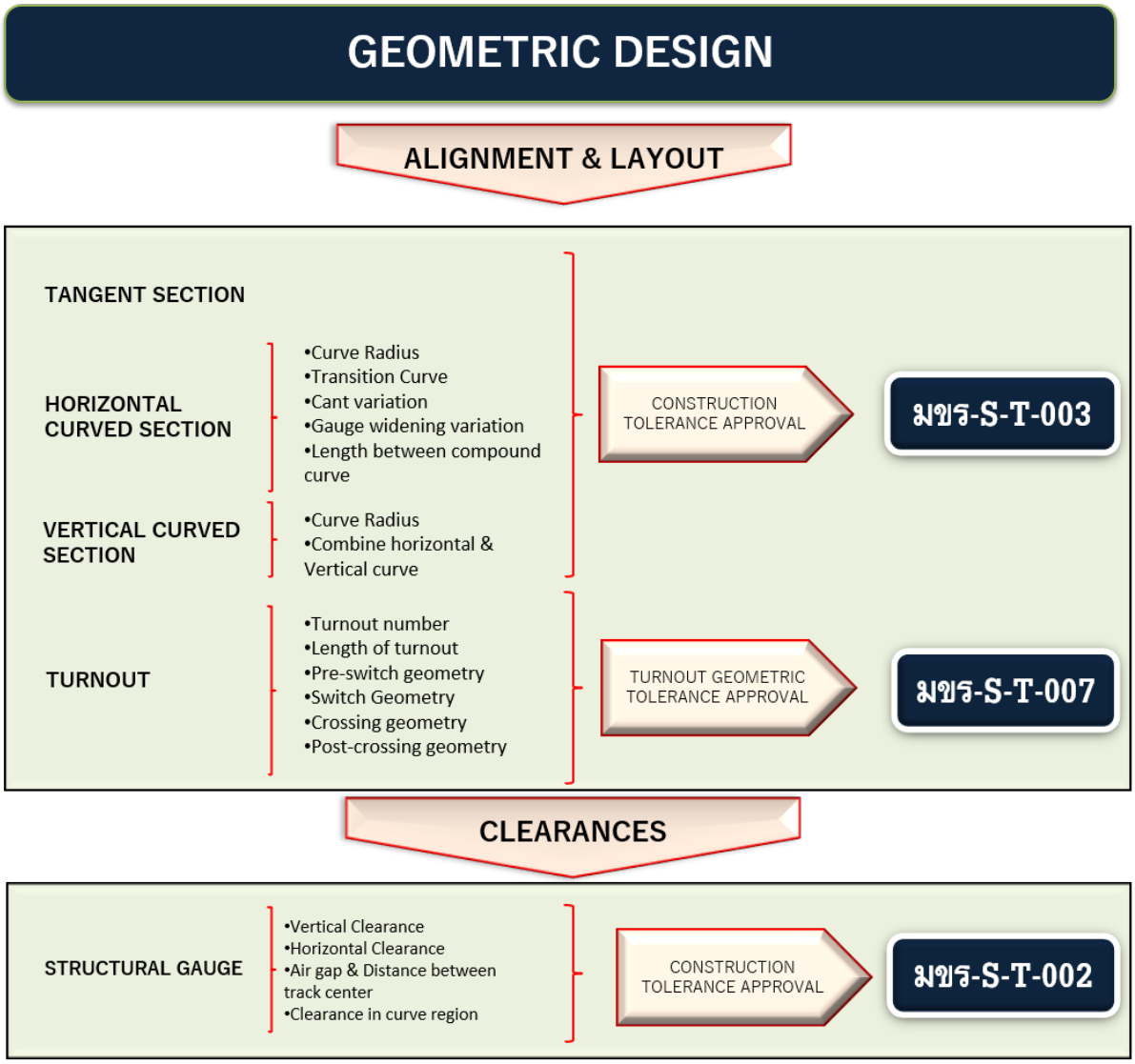
ในขั้นตอนการออกแบบทางรถไฟนั้นจะเริ่มด้วยการกำหนดสมรรถนะที่ต้องการและข้อจำกัดต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งวิศวกรจะต้องออกแบบทางฯให้สามารถรองรับความต้องการเหล่านั้นได้ โดยการออกแบบจะประกอบไปด้วยการออกแบบทางกายภาพ การออกแบบองค์ประกอบของโครงสร้างและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของทางฯ การออกแบบเพิ่มเติมเพื่อรองรับปัจจัยในด้านอื่น ๆเช่น การระบายน้ำ เป็นต้น โดยรูปที่ 1-2 แสดงถึงขั้นตอนการออกแบบทางรถไฟดังได้กล่าวมา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 1-2 ขั้นตอนโดยรวมของการออกแบบทางรถไฟ



- กำหนดสมรรถนะที่ต้องการและข้อจำกัดของระบบ โดยประกอบไปด้วย
  - ปัจจัยทางกายภาพ เช่น ความกว้างของทาง สภาพของภูมิประเทศ ขีดจำกัดการยกโค้ง การเอียงของราง เป็นต้น
  - ปัจจัยจากตัวรถไฟ ประกอบไปด้วย น้ำหนักลงเพลา ความเร็วในการให้บริการ ความสามารถในการไต่ทางชัน ขีดจำกัดการยกโค้งส่วนขาด พฤติกรรมของช่วงล่างและปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง เป็นต้น
  - ปัจจัยจากทางรถไฟ ประกอบไปด้วย กำลังและความแข็งเกร็งของทางรถไฟ ความสามารถในการซับแรงกระแทก ความคงทนและอายุการใช้งานขององค์ประกอบ เป็นต้น
  - ปัจจัยอื่น ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การกัดกร่อนตามธรรมชาติ น้ำขังหรือน้ำหลาก แผ่นดินไหว เป็นต้น
- การออกแบบทางกายภาพ (Geometric design) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะประกอบไปด้วยการออกแบบแนวเส้นทาง (Alignment and layout) และการออกแบบระยะเผื่อต่าง ๆ (Clearances) โดยในการออกแบบแนวเส้นทางจะประกอบด้วยการวางโค้งราบ โค้งเปลี่ยนผ่าน โค้งต่อเนื่อง การกำหนดรัศมีโค้งและการยกโค้งที่เหมาะสมกับความเร็ว โค้งดิ่ง รูปร่างและลักษณะทางกายภาพของประแจ เป็นต้น สำหรับการออกแบบระยะเผื่อนั้น จะเป็นการกำหนดค่าระยะเผื่อของโครงสร้าง (Structural gauge) ซึ่งคำนึงถึงระยะเผื่อในแนวราบและแนวดิ่ง (horizontal and vertical clearances) ขนาดและการเคลื่อนตัวของรถ (Static, kinematic and dynamic gauge) ระยะเผื่อบริเวณทางโค้ง (Thrown in the curve) ช่องว่างอากาศ (Air gap) รวมไปถึงระยะเผื่อสำหรับการก่อสร้าง (Construction clearances) เป็นต้น โดยในการก่อสร้างก็จะมีการสำรวจ การวางแนวเส้นทางไปตามภูมิประเทศ การตรวจวัดระดับและความเที่ยงตรงของแนวเส้นทาง โดยเมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วจะมีการตรวจสอบความผิดพลาดของแนวเส้นทางไม่ให้เกินค่าที่ยอมให้ (Construction tolerances)



รูปที่ 1-3 การออกแบบทางกายภาพของทางรถไฟ

- การออกแบบองค์ประกอบของโครงสร้างและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างทางฯ โดยขั้นตอนนี้จะแบ่งเป็นการออกแบบของโครงสร้างทางฯสองชนิดคือ โครงสร้างทางฯแบบมีหินโรยทาง (Ballasted track) และโครงสร้างทางฯแบบไม่มีหินโรยทาง (Ballastless track) ซึ่งการออกแบบโครงสร้างทางฯทั้งสองแบบจะมีการพิจารณาถึงคุณสมบัติขององค์ประกอบต่าง ๆ (Track component) รวมไปถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างโดยรวม (Overall behavior) เพื่อให้ทางรถไฟที่จะก่อสร้างนั้นมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพตามต้องการ

โดยโครงสร้างทางฯแบบใช้หินโรยทางจะมีลำดับของการออกแบบดังนี้

- การออกแบบหน้าตัดราง ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของจุดรองรับราง รูปแบบการกระจายตัวของน้ำหนักเพลา โดยในการออกแบบจะทำการคำนวณหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดรางและทำการเลือกหน้าตัดรางที่สามารถต้านทานหน่วยแรงดังกล่าวได้อย่างปลอดภัย



- การออกแบบจุดต่อของราง โดยจุดต่อรางจะสามารถแบ่งเป็นสามชนิดคือ จุดต่อแบบเชื่อม (Welded joint) จุดต่อเชิงกล (Mechanical joint) และจุดต่อเผื่อขยาย (Rail expansion joint) โดยในการออกแบบจุดต่อแบบเชื่อมและจุดต่อเชิงกลจะเน้นถึงกำลังต้านทานของรอยต่อที่จะต้องมีเพียงพอในการต้านทานต่อแรงกระทำต่าง ๆ ในขณะที่จุดต่อเผื่อขยายนั้นจะมีปัจจัยเพิ่มเติมคือระยะการเคลื่อนตัวของรางที่ยอมให้ ในส่วนของการก่อสร้างจุดต่อรางนั้นจะมีการกำหนดถึงรายละเอียดของการเชื่อมไฟฟ้า การเชื่อมเทอร์มิต การเชื่อมประแจ การทดสอบคุณสมบัติของรอยเชื่อม การทดสอบคุณสมบัติของจุดต่อเชิงกล การติดตั้งจุดต่อเผื่อขยาย เป็นต้น

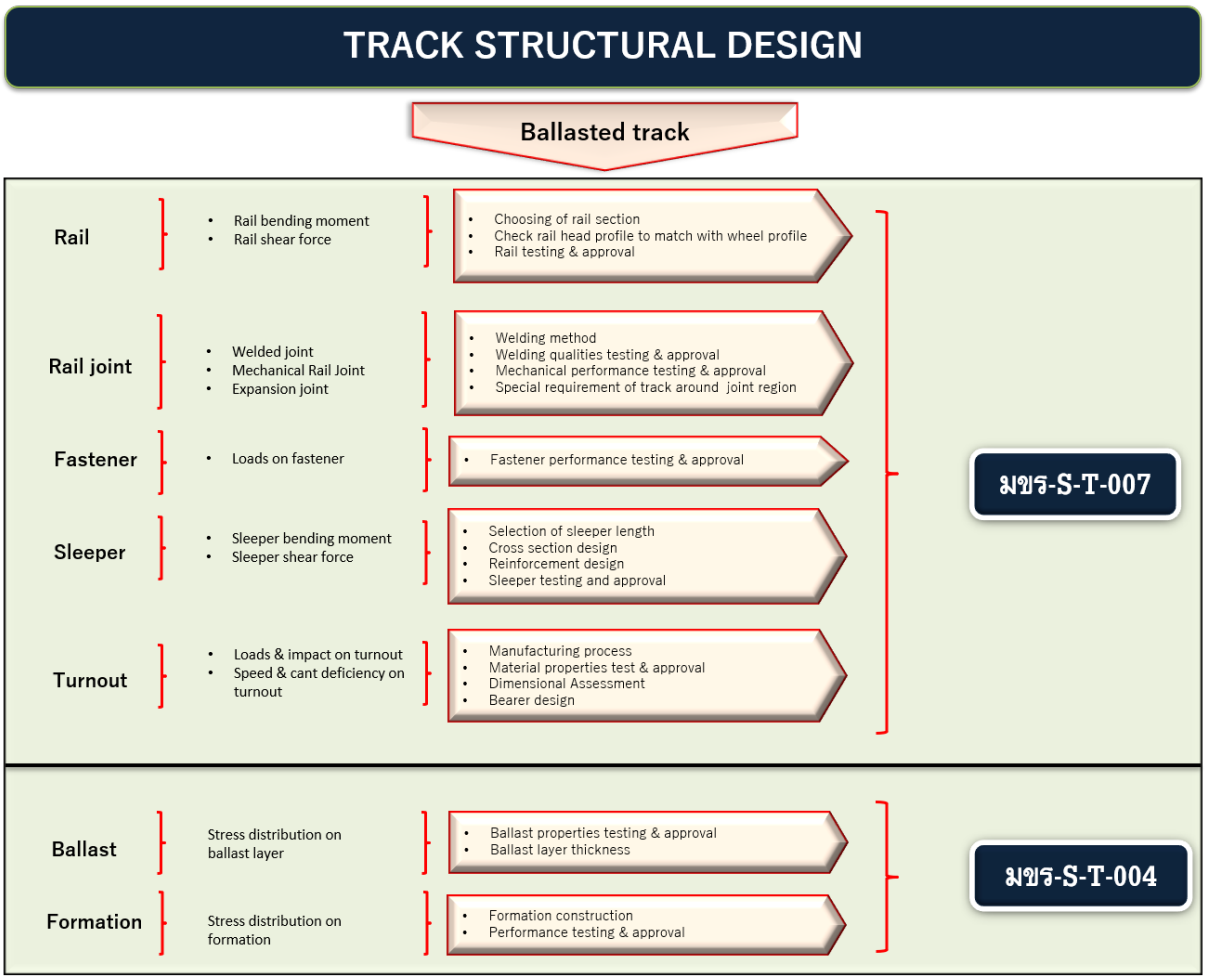
- การออกแบบอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง จะเน้นถึงกำลังต้านทานและอายุการใช้งานของรอยต่อที่จะต้องมีเพียงพอในการต้านทานต่อแรงกระทำต่าง ๆที่ถ่ายลงมาจากรางได้ ซึ่งจะมีการกำหนดรายละเอียดในการทดสอบคุณสมบัติในด้านต่าง ๆของชุดอุปกรณ์ฯ อาทิเช่น กำลังต้านทางแรงยก การต้านทานต่อแรงในแนวยาว ความเป็นฉนวน การต้านทานต่อการกัดกร่อน เป็นต้น โดยในส่วนของการก่อสร้างจะเน้นถึงการตรวจสอบความสมบูรณ์ของการติดตั้งให้เป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ผลิต

- การออกแบบหมอนรองรางและหมอนรองประแจ ในส่วนนี้จะมีการวิเคราะห์ถึงแรงต่าง ๆที่กระทำต่อหมอน เช่นแรงกดจากรางและแรงปฏิกิริยาจากชั้นหินใต้หมอน ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณแรงสูงสุดที่กระทำต่อหน้าตัดหมอนได้ จากนั้นจึงทำการออกแบบขนาดหน้าตัดของหมอนรวมไปถึงลวดอัดแรง นอกจากนี้ในการผลิตจะมีการตรวจสอบถึงความเที่ยงตรงของหน้าตัดหมอนตลอดความยาว ปริมาณและแรงดึงของลวดอัดแรง

- การออกแบบประแจ จะเน้นในส่วนการออกแบบทางกายภาพเพื่อรองรับความเร็วของรถไฟในการเข้าประแจได้อย่างปลอดภัย ซึ่งรายละเอียดจะประกอบไปด้วยการกำหนดมุมประแจ รูปร่างของลิ้นประแจและตะเฆ่ เป็นต้น ทั้งนี้ในส่วนของพฤติกรรมการรับน้ำหนักและความคงทนจะถูกควบคุมโดยการกำหนดคุณสมบัติให้ผู้ผลิตปฏิบัติตาม เช่น กระบวนการหล่อเหล็ก การเชื่อม การกัดกลึง ความผิดพลาดที่ยอมให้ของชิ้นส่วนต่าง ๆ เป็นต้น ทั้งนี้ในการก่อสร้างจะมีการกำหนดขั้นตอนการขนส่ง การประกอบประแจ รวมไปถึงค่าความผิดพลาดที่ยอมให้หลังการประกอบประแจลงบนทางรถไฟ

- การออกแบบชั้นหินโรยทาง จะเน้นถึงการกำหนดถึงคุณสมบัติของหินโรยทางทั้งในด้านรูปร่างขนาดคละ ความแข็งแกร่งและความทนทานต่อการสึกกร่อน การกระจายของหน่วยแรงจากหมอนลงไปสู่ชั้นดินรองทาง ซึ่งจะต้องควบคุมให้หน่วยแรงนั้นมีระดับต่ำกว่าหน่วยแรงที่ชั้นดินจะรับได้ โดยในการก่อสร้างจะมีการตรวจวัดรูปร่างและความหนาของชั้นหินโรยทาง รวมไปถึงทดสอบความแน่นของชั้นหินโรยทางให้เพียงพอต่อการรับน้ำหนักรถไฟ

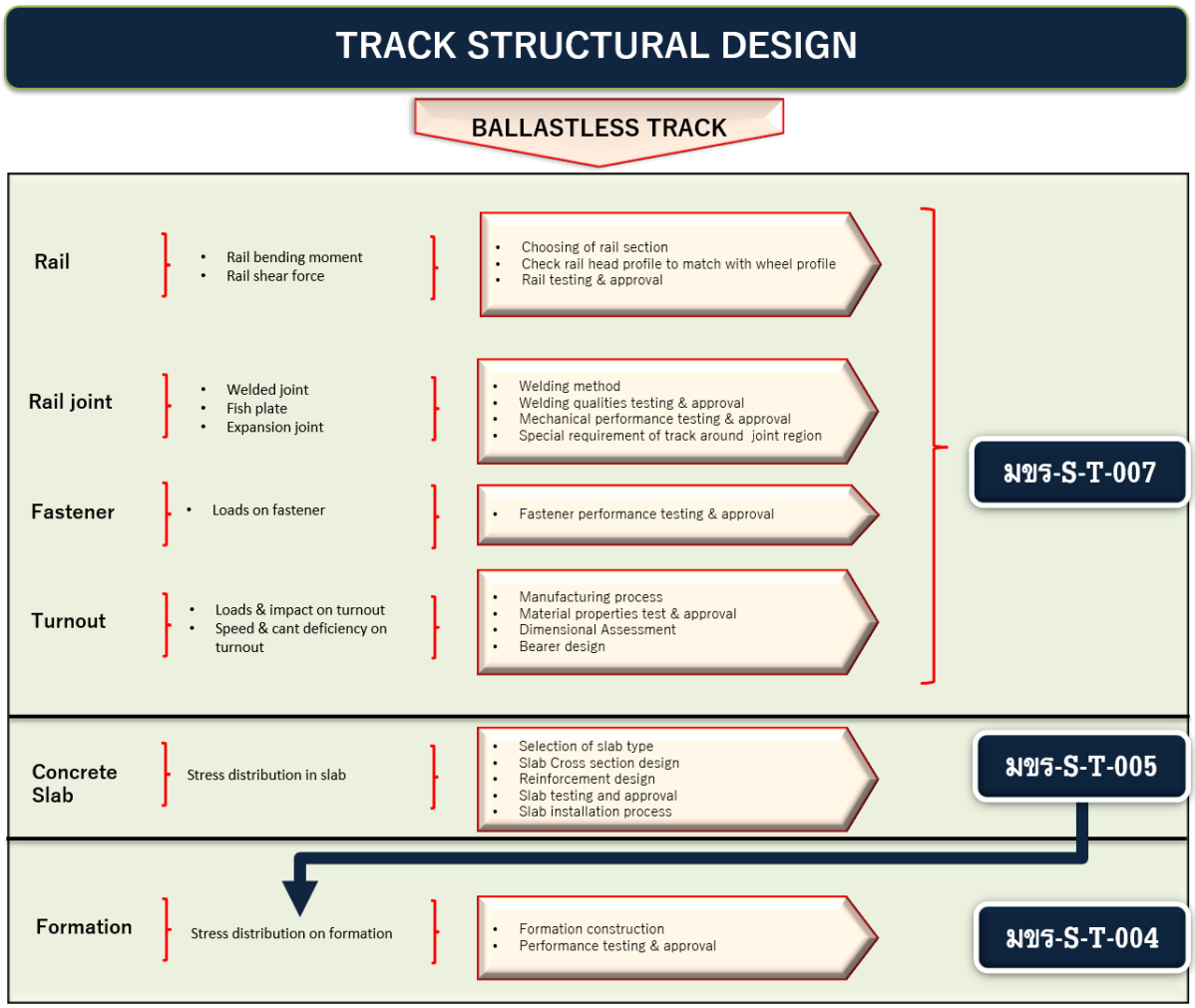
- การออกแบบชั้นดินรองทาง จะเน้นถึงการเตรียมพื้นดินให้มีค่ากำลังแบกทาน (Bearing capacity) ที่เพียงพอต่อการรับน้ำหนักจากชั้นทางด้านบน โดยในการก่อสร้างจะมีการทดสอบเพื่อตรวจสอบถึงกำลังของชั้นดิน



รูปที่ 1-4 การออกแบบองค์ประกอบของทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง

สำหรับโครงสร้างทางฯแบบไม่ใช้หินโรยทางนั้นจะมีความแตกต่างในการออกแบบดังนี้

- การออกแบบแผ่นพื้นรองราง ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ถึงการกระจายตัวของแรงที่ส่งผ่านจากรางเข้าไปสู่แผ่นพื้นรวมไปถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักของชั้นรองใต้แผ่นพื้น โดยผลการวิเคราะห์จะทำให้ได้หน่วยแรงที่กระทำบนหน้าตัดของแผ่นพื้นและจะทำให้สามารถออกแบบรายละเอียดหน้าตัดและเหล็กเสริมบนแผ่นพื้นได้
- การออกแบบชั้นดินรองทาง เนื่องจากพฤติกรรมการถ่ายแรงจากแผ่นพื้นลงสู่ชั้นดินนั้นจะมีความแตกต่างจากทางฯที่ใช้หินโรยทาง ซึ่งหลักการในการออกแบบคือควบคุมหน่วยแรงที่ถ่ายลงมาให้อยู่ในระดับต่ำกว่ากำลังแบกทานของชั้นดิน รวมไปถึงในการก่อสร้างจะมีการทดสอบเพื่อตรวจสอบถึงกำลังของชั้นดินด้วยเช่นกัน

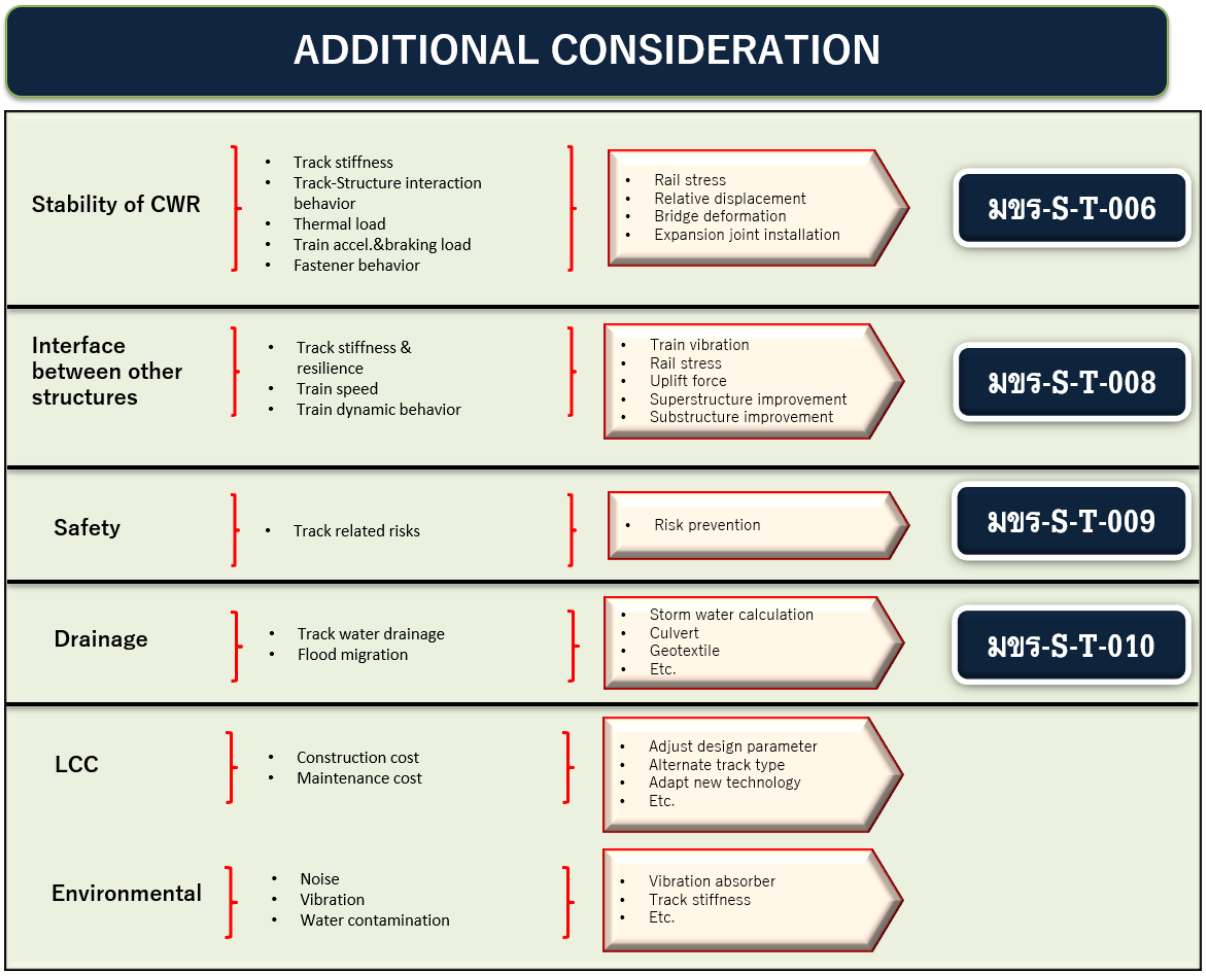


รูปที่ 1-5 การออกแบบองค์ประกอบของทางรถไฟแบบไม่ใช้หินโรยทาง

การออกแบบเพิ่มเติมเพื่อรองรับปัจจัยในด้านอื่น ๆ โดยขั้นตอนนี้จะเป็นการออกแบบเพิ่มเติมเพื่อให้ทางรถไฟมีความสมบูรณ์และสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- การออกแบบเพื่อควบคุมพฤติกรรมของรางเชื่อมยาว เป็นการออกแบบเพื่อป้องกันความเสียหายของทางรถไฟเนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นไปบนแนวยาวของราง ซึ่งต้องมีการวิเคราะห์ถึงหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะต่าง ๆเช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การเร่งและเบรคของรถไฟ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างทางรถไฟและสะพาน เป็นต้น ทั้งนี้ในการก่อสร้างจะต้องมีการควบคุมหน่วยแรงบนรางให้อยู่ในช่วงที่กำหนดโดยตรวจสอบอุณหภูมิในการวางรางหรือมีการคลายความเค้นในราง เป็นต้น
- การออกแบบทางรถไฟบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน เนื่องจากความแตกต่างของความแข็งเกร็งบนโครงสร้างทางฯต่างชนิดกันจะส่งผลให้เกิดการกระแทกขึ้นระหว่างล้อและราง เช่นบริเวณทางรถไฟบนพื้นดินบริเวณคอสะพาน ซึ่งการกระแทกดังกล่าวจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วในบริเวณดังกล่าว ดังนั้นในการออกแบบจะต้องมีการควบคุมการกระแทกที่เกิดขึ้น รวมไปถึงปรับปรุงการก่อสร้างทางฯบริเวณดังกล่าวให้มีการเปลี่ยนแปลงความแข็งเกร็งอย่างค่อยเป็นค่อยไป

- การออกแบบระบบระบายน้ำ เป็นหัวใจสำคัญในการรักษาสภาพของทางวิ่งให้คงทน ซึ่งจะมีการกำหนดรายละเอียดในการประมาณค่าปริมาณน้ำที่เข้ามาสู่ระบบและการจัดการให้น้ำไหลออกไปโดยไม่มีการท่วมขังและการกัดเซาะ
- ความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับทางรถไฟ เป็นการควบคุมเพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นขณะทำงานบนทางรถไฟ



รูปที่ 1-6 การออกแบบทางรถไฟเพื่อรองรับปัจจัยอื่น ๆ

<u>การก่อสร้างทางรถไฟ</u>

ในภาพรวมของการก่อสร้างทางรถไฟนั้น จะแบ่งประเภทของการก่อสร้างไปตามรูปแบบของทางฯซึ่งสามารถแบ่งได้สองประเภทหลักคือ การก่อสร้างทางฯแบบมีหินโรยทางและการก่อสร้างทางฯแบบไม่มีหินโรยทาง โดยการก่อสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทางนั้นมีขั้นตอนหลักในการดำเนินการดังนี้

- การสำรวจ เป็นการสำรวจวางตำแหน่งแนวเส้นทางไปตามภูมิประเทศตามที่ได้ออกแบบไว้เพื่อทำการประเมินปริมาณงานในการขุดและถมดิน หรือในบางกรณีจะเป็นการก่อสร้างสะพานหรือขุดอุโมงค์เป็นต้น



- การจัดเตรียมพื้นที่ เป็นการจัดการพื้นที่บริเวณทางรถไฟเพื่อเตรียมการก่อสร้างโครงสร้างพื้นทาง โดยขั้นตอนนี้จะมีการเคลียหน้าดิน ขุด เจาะ ถม เพื่อให้สามารถก่อสร้างทางรถไฟในบริเวณที่ต้องการได้ นอกจากนี้งานด้านการระบายน้ำอาจมีการดำเนินการได้ในขั้นตอนนี้ด้วย

- การจัดเตรียมชั้นดินรองทาง ในขั้นตอนนี้เป็นการก่อสร้างชั้นดินเพื่อรองรับทางฯ โดยจะมีการถมและบดอัดดินเป็นชั้น ๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติของดินที่มีกำลังแบกทานตามต้องการ โดยหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้แล้วจะมีการทดสอบคุณสมบัติของดินพื้นทางรวมทั้งตรวจสอบระดับและแนวเส้นทางให้อยู่ในเกณฑ์ก่อนที่จะทำการก่อสร้างขั้นต่อไป

- การลงหินชั้นแรก โดยให้มีความหนาตามที่ได้กำหนดไว้ในแบบจากการใช้รถลงหินโรยทาง (Ballast Paver) และการหินโรยทางชั้นแรกนั้นจะต้องทำบนพื้นทางที่เตรียมการเรียบร้อยและได้รับการตรวจสอบว่าได้ระดับตามแบบแล้ว ในการเกลี่ยหินควรระมัดระวังระดับด้านบนของหินโรยทางเพื่อไม่ให้เกิดสภาพการรับน้ำหนักเฉพาะบริเวณช่วงส่วนกลางของหมอนคอนกรีต (Center Binding Condition) นอกจากนี้ก่อนการลงหินอาจมีการนำหมอนมาวางกระจายไว้ข้างทางเพื่อจะได้นำไปจัดวางได้ในขั้นตอนต่อไป

- การวางหมอนรองราง จะดำเนินการโดยจัดเรียงหมอนบนหินโรยทางชั้นแรกให้มีระยะห่างตามที่ได้กำหนดไว้ในแบบ โดยควบคุมตำแหน่งการวางตัวของหมอนให้ได้ฉากกับทางฯ รวมทั้งจัดวางให้หมอนถูกรองรับด้วยหินโรยทางอย่างสม่ำเสมอไปตลอดความยาว

- การวางราง ในขั้นตอนนี้จะเป็นการวางรางเข้าสู่ตำแหน่งบนหมอน โดยใช้เครื่องมือเพื่อลากรางลงบนลูกกลิ้งรับน้ำหนักที่ติดตั้งอยู่สูงเหนือหมอนรองรางซึ่งสามารถเลื่อนรางไปจนสุดความยาว นอกจากนี้รางอาจถูกเชื่อมต่อกันก่อนโดยการเชื่อมหรือใช้เหล็กประกับราง

- การประกอบชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง ซึ่งประกอบด้วย แผ่นรองราง คลิปสปริง และฉนวน โดยหลังการยึดรางแล้วเสร็จจำเป็นต้องตรวจสอบระยะห่างของรางรวมทั้งความสมบูรณ์ของชุดอุปกรณ์ฯอีกครั้งหนึ่ง

- การลงหินชั้นที่สอง เป็นการลงหินเพื่อให้คลุมหัวหมอนรวมทั้งเติมช่องว่างระหว่างหมอนให้เต็มเพื่อป้องการการเคลื่อนที่ของหมอนในแนวระนาบ

- การยกรางและอัดหิน ดำเนินการโดยใช้รถอัดหิน (Tamping Machine) ในการอัดหินโรยทางใต้หมอนรองรางหรือประแจ พร้อมการปรับแนวรางและยกระดับรางไปคราวเดียวกัน ซึ่งอาจจำเป็นต้องวิ่งรถอัดหินซ้ำกันหลายรอบเพื่อให้ได้แนวรางและระดับรางตามที่ได้กำหนดไว้ในแบบ

- การสั่นทางรถไฟ โดยใช้รถสั่นหิน (Track Stabilizer) ทำให้หินโรยทางมีการจัดเรียงตัวที่ดีและมีค่าความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น

- การยกรางและอัดหินโรยทางชั้นสุดท้าย หลังการสั่นทางรถไฟโดยใช้รถสั่นหิน (Track Stabilizer) แล้วทางรถไฟจะยุบตัวลงประมาณ 15–20 มิลลิเมตร จึงจำเป็นต้องใช้รถอัดหิน (Tamping Machine) เข้าทำการปรับแนวราง ยกระดับราง และอัดหินโรยทางชั้นสุดท้าย เพื่อให้เป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ในแบบ



- การตรวจสอบและรับรอง หลังจากที่ทำการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วจะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของทางรถไฟซึ่งจะประกอบไปด้วยการตรวจสอบตำแหน่งของแนวเส้นทางว่าเบี่ยงเบนจากการออกแบบไปมากน้อยเพียงใด ค่าระยะเผื่อรอบทางฯ รูปร่างของผิวทางฯ ทั้งในด้านแนวราบ แนวดิ่ง ความกว้างทางและความต่างระดับกันของราง นอกจากนี้ยังต้องมีการตรวจสอบถึงความสมบูรณ์ในการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆเช่น ประแจและอุปกรณ์ควบคุม จุดต่อราง อุปกรณ์ยึดเหนี่ยว ความแน่นหนาของหมอนรวมไปถึงความสมบูรณ์ในการวางรางเชื่อมยาวให้อยู่ในสถานะไม่มีความเค้น เป็นต้น โดยการตรวจสอบจะต้องทำการเก็บตัวอย่างให้เพียงพอเพื่อเป็นตัวแทนของสายทางทั้งหมด

สำหรับทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทางจะมีขั้นตอนการเตรียมพื้นดินชั้นรองทางคล้ายคลึงกับทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง โดยจะมีความแตกต่างกันสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างส่วนบน ดังนี้

- การเตรียมชั้นรองพื้นคอนกรีต เป็นการเทพื้นทับหน้าชั้นดินเพื่อปรับระดับให้เที่ยงตรงและเตรียมที่สร้างแผ่นพื้นรองรางในขั้นต่อไป
- การก่อสร้างพื้นคอนกรีต ในขั้นตอนนี้จะมีวิธีการก่อสร้างแตกต่างกันออกไปตามวิธีการออกแบบแผ่นพื้น โดยสามารถแบ่งเป็นสองกลุ่มหลักคือ แผ่นพื้นคอนกรีตแบบหล่อในที่ซึ่งจะมีการวางเหล็กเสริมและเทคอนกรีตทับลงไป กลุ่มที่สองคือแผ่นพื้นคอนกรีตแบบหล่อสำเร็จซึ่งจะผลิตสำเร็จมาจากโรงงานและนำมาติดตั้งลงสู่พื้นทางที่ได้เตรียมไว้
- การวางรางและการประกอบชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง เมื่อแผ่นพื้นถูกติดตั้งเรียบร้อยแล้ว รางจะถูกวางไปตลอดความยาวและชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวจะถูกติดตั้งเพื่อยึดรางให้เข้าที่ โดยในกระบวนการนี้อาจมีการปรับระดับของรางรวมไปถึงความกว้างของทางให้เป็นไปตามที่ออกแบบ

การตรวจสอบและรับรองเช่นเดียวกับทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง หลังจากที่ทำการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วจะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของทางรถไฟ โดยการตรวจสอบจะต้องทำการเก็บตัวอย่างให้เพียงพอเพื่อเป็นตัวแทนของสายทางทั้งหมด



บทที่ 2 เขตโครงสร้างทางรถไฟ (Structural Gauge)

2.1 ทั่วไป

เขตโครงสร้างทางนับเป็นหัวข้อสำคัญในการออกแบบทางกายภาพของทางรถไฟ เนื่องจากเป็นตัวกำหนดถึงขนาดรถไฟที่ยอมให้แล่นผ่านทางได้โดยไม่มีอุปสรรค รวมไปถึงมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโครงสร้างที่เกี่ยวข้อง เช่น อุโมงค์ สะพานหรือสถานี เป็นต้น เนื่องจากเขตโครงสร้างที่ใหญ่จะต้องการขนาดของโครงสร้างมที่ใหญ่ตามไปด้วย นอกจากนี้หากสายทางต้องออกแบบให้รองรับการใช้บริการของรถไฟต่างชนิดกัน ความถูกต้องของเขตโครงสร้างจะยิ่งมีความสำคัญเพิ่มเป็นทวีคูณ คู่มือด้านการออกแบบเขตโครงสร้างทางนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดค่าเขตโครงสร้างทางให้เป็นไปตามมาตรฐาน โดยระบุถึงการกำหนดเขตโครงสร้างทางแบบต่าง ๆเช่น เขตโครงสร้างทางเชิงสถิตย์ เขตโครงสร้างทางเชิงจลน์และเขตโครงสร้างทางเชิงพลวัต เป็นต้น

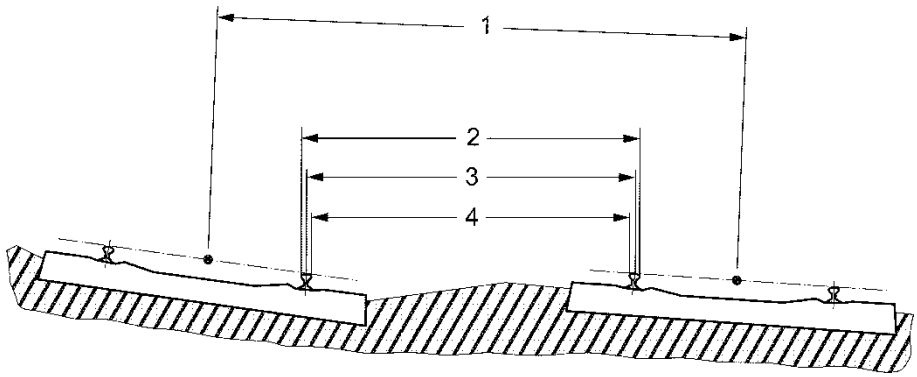
2.1.1 นิยามและสัญลักษณ์

นิยาม

พิกัดโครงสร้าง (Structure gauge) หมายถึง เขตพื้นที่ทางเดินรถไฟซึ่งห้ามไม่ให้ วัตถุหรือส่วนของโครงสร้างใด ๆ รวมถึงส่วนของรถไฟที่วิ่งอยู่บนรางคู่ขนาน ยื่นล้ำเข้ามาในบริเวณนี้ เพื่อให้การเดินรถเป็นไปได้อย่างปลอดภัย พิกัดโครงสร้างสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

- พิกัดโครงสร้างขอบเขต (Structure limit gauge) คือ บริเวณที่ห้ามมีสิ่งใดล้ำเข้าไป ไม่ว่าจะเวลาใด ๆ เพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างมีระยะห่างจากรางเพียงพอต่อการเดินรถ
- พิกัดโครงสร้างบำรุงทาง (Structure installation limit gauge) คือ บริเวณที่ห้ามมีสิ่งใดล้ำเข้าไปเมื่อคำนึงถึงการเข้าไปซ่อมบำรุง ดังนั้นไม่อนุญาตให้มีการติดตั้งโครงสร้างใด ๆ ถ้าต้องการให้เดินรถได้อย่างปลอดภัยหลังจากการซ่อมบำรุงตามปกติ
- พิกัดโครงสร้างระบุ (Structure installation nominal gauge) คือ บริเวณที่ห้ามมีสิ่งใดล้ำเข้าไปเพื่อที่ทำให้รถไฟสามารถดำเนินการและซ่อมบำรุงระบบรางได้ บริเวณนี้อาจรวมไปถึงการขนส่งสินค้าพิเศษและเงื่อนไขอื่น ๆ

- ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางราง (Distance between track centers) หมายถึง ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของทางรถไฟสองทางที่กำลังพิจารณา วัดขนานกับผิวทางวิ่งของทางรถไฟที่มีค่ายกโค้งน้อยที่สุด แสดงดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางทางรถไฟ

โดยในทางปฏิบัติ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางรางมักจะนิยามเป็นระยะของรางที่อยู่ใกล้กัน (ระยะอ้างอิง “2” หรือ “3” หรือ “4”) ระยะอ้างอิงที่ใช้นั้นแตกต่างกันไปในระบบโครงข่ายรถไฟต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับความถนัดของบุคลากร อุปกรณ์การตรวจวัด ฯลฯ) และคำจำกัดความของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางที่นำมาใช้ในมาตรฐานนี้ อาจมีความแตกต่างกันกับระยะห่างระหว่างศูนย์กลางที่นำมาใช้ในกรณีอื่น เช่น การติดตั้ง เป็นความรับผิดชอบของผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐานในการเลือกใช้จากข้อกำหนดที่แตกต่างกัน

- **ระยะระหว่างศูนย์กลางขอบเขต (Limit distance between centers) หมายถึง** ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางรางน้อยที่สุดของทางเดินรถคู่ขนาน ซึ่งทำให้รถไฟวิ่งสวนกันได้อย่างปลอดภัย โดยที่ระยะห่างนี้ไม่ใช่ค่าตายตัวแต่เปลี่ยนแปลงไปตามพารามิเตอร์ของระบบรางแต่ละพื้นที่ เช่น ค่ายกโค้ง รัศมีความโค้งของทางรถไฟ เป็นต้น

- **ระยะระหว่างศูนย์กลางบำรุงทาง (Installation limit distance between centers)** หมายถึง ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางรางของทางเดินรถคู่ขนาน ซึ่งทำให้รถไฟวิ่งสวนกันได้อย่างปลอดภัย และได้เผื่อระยะเพิ่มเติมสำหรับการบำรุงทาง

- **ระยะระหว่างศูนย์กลางระบุ (Installation nominal distance between centers)** หมายถึง ระยะระหว่างศูนย์กลางที่มีระยะเผื่อเหมาะสม ซึ่งทำให้ง่ายต่อการออกแบบ วางผัง เฝ้าระวัง ซ่อมบำรุง การดำเนินการขนส่งพิเศษ หรือข้อพิจารณาอื่น ๆ นอกพื้นที่ที่รัศมีความโค้งน้อย ๆ ระยะระหว่างศูนย์กลางระบุนี้มักจะคงที่ (หาได้จากพารามิเตอร์ที่คงที่)



สัญลักษณ์

สัญลักษณ์และคำย่อที่เกี่ยวข้องกับเขตโครงสร้างทางแสดงดังตารางที่ 2-1 และตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-1 สัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

สัญลักษณ์	การระบุ	หน่วย	เลขที่สัญลักษณ์
a	ระยะระหว่างเพลาปลายของตู้รถไฟที่ไม่พอดีกับแคร่รถไฟ หรือ ระยะระหว่างศูนย์กลางของแคร่รถไฟ	เมตร	1.001
b	ความกว้างกึ่งหนึ่ง หรือระยะทางที่ขนานกันของผิวทางวิ่งเทียบกับศูนย์กลางของรางหรือของตู้รถไฟ	เมตร	1.007
b'	ความกว้างกึ่งหนึ่งของ pantograph	เมตร	3.001
b'_q	ระยะติดตั้งจริงของชานชาลาวัดจากขอบทางวิ่งของรางรถไฟ	เมตร	1.008
b_{RP}	ความกว้างกึ่งหนึ่งของตำแหน่งอ้างอิง	เมตร	3.002
b_{elec}	ระยะของฉนวนไฟฟ้า	เมตร	3.003
b_{gap}	ความกว้างมาตรฐานของช่องว่างระหว่างชานชาลาและการก้าว	เมตร	1.019
$b_{structure}$	ระยะทางที่ขนานกันของผิวทางวิ่งระหว่างโครงสร้างและศูนย์กลางของราง	เมตร	3.004
b_q	ความกว้างกึ่งหนึ่งของการติดตั้งชานชาลา	เมตร	1.021
Δb	ความแตกต่างของความกว้างกึ่งหนึ่งของ b	เมตร	3.005
b_{veh}	ความกว้างกึ่งหนึ่งของตู้รถไฟ	เมตร	1.030
b_w	ความกว้างกึ่งหนึ่งของหัว pantograph	เมตร	1.033
C_0	(อ้างอิง) ศูนย์กลางการหมุน	เมตร	3.006
c_w	Semi-width of the pantograph head insulating horn	เมตร	3.007
dg	การล้มคว่ำเชิงเรขาคณิต	เมตร	3.008
dg_a	การล้มคว่ำเชิงเรขาคณิตของตู้รถไฟนอกเส้นโค้ง	เมตร	1.038
dg_i	การล้มคว่ำเชิงเรขาคณิตของตู้รถไฟในเส้นโค้ง	เมตร	1.041
D	ค่ายกโค้ง	เมตร	1.044
D_0	ค่ายกโค้งคงที่ซึ่งได้พิจารณาค่าที่ยอมรับได้ระหว่างตู้รถไฟและโครงสร้างพื้นฐาน	เมตร	1.045
D'_0	ค่ายกโค้งอ้างอิงซึ่งได้พิจารณาค่าที่ยอมรับได้ระหว่างตู้รถไฟและพิกัด pantograph	เมตร	3.009
D'_L และ D''_L	ค่ายกโค้งขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณค่ายอมให้ทั้งหมด	เมตร	3.010
$D_{\max,0}$	ค่ายกโค้งตามมาตรฐานสูงสุดที่อนุญาตสำหรับการขยายตัวของพิกัดทางจลศาสตร์	เมตร	1.050
δD	ผลต่างของค่าค่ายกโค้ง(ระหว่างรางรถไฟ 2 ราง)	เมตร	3.011



ตารางที่ 2-1 (ต่อ) สัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

สัญลักษณ์	การระบุ	หน่วย	เลขที่สัญลักษณ์
e_p	ระยะออฟเซตของ pantograph เนื่องจากลักษณะของตู้รถไฟ	เมตร	1.067
e_{pi}	ระยะออฟเซตของ pantograph เนื่องจากลักษณะของตู้รถไฟในเส้นโค้ง	เมตร	3.012
e_{pa}	ระยะออฟเซตของ pantograph เนื่องจากลักษณะของตู้รถไฟนอกเส้นโค้ง	เมตร	3.013
e_{po}	ระยะออฟเซตของ pantograph ที่ขอบเขตบนของจุดทวนสอบ	เมตร	1.068
e_{pu}	ระยะออฟเซตของ pantograph ที่ขอบเขตล่างของจุดทวนสอบ	เมตร	1.071
e_v	Lowering of track components	เมตร	1.073
EA	ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางทางรถไฟ	เมตร	3.014
f_s	ค่าที่ยอมให้ที่ได้พิจารณาการยกขึ้นของ contact wire	เมตร	1.079
f_{dyn}	ค่าที่ยอมให้ที่ได้พิจารณาการเคลื่อนตัวทางพลศาสตร์ของบริเวณที่สัมผัสกับสายส่ง	เมตร	3.015
f_{wa}	Allowance to take into account the overrun by the pantographhead of the contact surface because of pantograph contact strip wear	เมตร	1.083
f_{ws}	Allowance to take into account the overrun by the pantographhead of the contact surface because of pantograph skewing	เมตร	1.084
h	ความสูงที่มีความสัมพันธ์กับผิวทางวิ่ง	เมตร	1.088
h'	ความสูงอ้างอิงในการคำนวณพิกัด pantograph	เมตร	3.016
h'_o	ความสูงในการทวนสอบสูงสุดของพิกัด pantograph ในตำแหน่งที่ถูกยกขึ้น	เมตร	1.089
h'_u	ความสูงในการทวนสอบต่ำสุดของพิกัด pantograph ในตำแหน่งที่ถูกยกขึ้น	เมตร	1.090
h_{Co}	ค่าของ h_c ที่ใช้สำหรับค่าที่ยอมรับได้ระหว่างตู้รถไฟและโครงสร้างพื้นฐาน	เมตร	1.092
h'_{Co}	(อ้างอิง) ความสูงของศูนย์กลางการหมุนสำหรับพิกัด pantograph	เมตร	3.017
h_{RP}	ความสูงของตำแหน่งอ้างอิง	เมตร	1.093
h_{eff}	ความสูงประสิทธิผลของ pantograph ในตำแหน่งที่ถูกยกขึ้น	เมตร	1.094
$h_{eff,elec}$	ความสูงประสิทธิผลของ pantograph ในตำแหน่งที่ถูกยกขึ้นรวมกับฉนวนไฟฟ้า	เมตร	1.095



ตารางที่ 2-1 (ต่อ) สัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

สัญลักษณ์	การระบุ	หน่วย	เลขที่สัญลักษณ์
h_f	ความสูงของบริเวณที่สัมผัสกับสายส่ง	เมตร	1.096
$h_{\min,RP}$	ความสูงต่ำสุดของผิวด้านข้างของตำแหน่งอ้างอิง (ที่ระดับชานชาลา)	เมตร	1.101
h_{ec}	ความสูงของส่วนครอบบริเวณมุมของชานชาลา	เมตร	1.102
$h_{structure}$	ความสูงของโครงสร้างที่อยู่ด้านบนผิวทางวิ่ง	เมตร	3.018
h_P	ความสูงของจุด P	เมตร	3.019
h_q	ความสูงของชานชาลาที่อยู่ด้านบนผิวทางวิ่ง	เมตร	1.103
Δh	ความแตกต่างของความสูงของ h	เมตร	3.020
I	การยกโค้งขาด	เมตร	1.107
I'_C	การยกโค้งขาดเฉพาะที่สูงสุดใช้สำหรับพิจารณารถไฟดั้งเดิม	เมตร	1.108
I'_P	การยกโค้งขาดเฉพาะที่สูงสุดใช้สำหรับพิจารณา tilting trains	เมตร	1.109
I_C	การยกโค้งขาดสูงสุดใช้สำหรับวางเส้นทางของผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐาน	เมตร	1.110
I_L	ขอบเขตการยกโค้งขาดที่ใช้ในการคำนวณทางจลศาสตร์	เมตร	3.021
I_0	ค่าการยกโค้งขาดคงที่ซึ่งได้พิจารณาค่าที่ยอมรับได้ระหว่างตู้รถไฟและโครงสร้างพื้นฐาน โดยเกี่ยวข้องกับพิกัดทางจลน์ศาสตร์	เมตร	1.116
I'_0	การยกโค้งขาดอ้างอิงซึ่งได้พิจารณาตู้รถไฟสำหรับพิกัดของ pantograph	เมตร	3.022
I_P	การยกโค้งขาด ของตัวรถที่เอียง	เมตร	1.117
k, k'	สัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ได้พิจารณาความไม่สม่ำเสมอของราง		1.123
K	สัมประสิทธิ์เพิ่มค่าสำหรับการคำนวณส่วนที่ยอมให้		3.023
l	ความกว้างของราง ระยะระหว่างขอบทางวิ่งของราง	เมตร	1.126
l_{nom}	ความกว้างของรางระบุ	เมตร	1.129
L	ระยะทางมาตรฐานระหว่างศูนย์กลางของรางที่ทางรถไฟเดียวกัน	เมตร	1.134
M_j	(แนวราบ) ส่วนที่ยอมให้ปลอดภัย สำหรับพิกัดโครงสร้างครอบคลุมเหตุการณ์แบบสุ่มที่แน่นอน (j = 1, 2 หรือ 3)	เมตร	3.024
M_{EAj}	ส่วนที่ยอมให้ปลอดภัย สำหรับระยะทางระหว่างศูนย์กลางครอบคลุมเหตุการณ์แบบสุ่มที่แน่นอน (j = 1, 2 หรือ 3)	เมตร	3.025
n_a	n สำหรับหน้าตัดนอกเพลารถ หรือศูนย์กลางของแคร่รถไฟ	เมตร	1.158
P	จุดขอบเขตบนของตำแหน่งผิวด้านข้างอ้างอิงซึ่งเป็นปัจจัยในการหาระยะทางระหว่างศูนย์กลาง		3.026



ตารางที่ 2-1 (ต่อ) สัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

สัญลักษณ์	การระบุ	หน่วย	เลขที่สัญลักษณ์
q	ช่องว่างตามขวางระหว่างชุดล้อรถไฟฟ้าและโครงของแคร่รถไฟ หรือระหว่างชุดล้อรถไฟฟ้าและตัวรถสำหรับตู้รถไฟที่ไม่เข้ากับแคร่รถไฟ	เมตร	1.172
Q	จุดปลายด้านข้างของตำแหน่งอ้างอิงของผิวด้านบน	เมตร	3.027
qs	ผลกระทบของกึ่งสถิต	เมตร	3.028
qs_a	ระยะกระจัดเนื่องจากการหมุนกึ่งสถิตซึ่งได้พิจารณาโครงสร้างพื้นฐานนอกตำแหน่งอ้างอิงที่อยู่นอกเส้นโค้ง	เมตร	1.174
qs_i	ระยะกระจัดเนื่องจากการหมุนกึ่งสถิตซึ่งได้พิจารณาโครงสร้างพื้นฐานนอกตำแหน่งอ้างอิงที่อยู่ในเส้นโค้ง	เมตร	1.175
qs'_i	ผลกระทบของกึ่งสถิตสำหรับพิกัด pantograph ที่อยู่ในเส้นโค้ง	เมตร	3.029
qs'_a	ผลกระทบของกึ่งสถิตสำหรับพิกัด pantograph ที่อยู่นอกเส้นโค้ง	เมตร	3.030
R	รัศมีความโค้งแนวราบ	เมตร	1.178
R_V	รัศมีการเคลื่อนตัวแนวดิ่งของหน้าตัดตามแนวยาว	เมตร	1.185
s_0	สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ได้พิจารณาค่าที่ยอมรับได้ระหว่างตู้รถไฟและโครงสร้างพื้นฐาน		1.188
s'_0	สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ได้พิจารณาค่าที่ยอมรับได้ระหว่างตู้รถไฟและโครงสร้างพื้นฐานสำหรับพิกัด pantograph		1.189
S	การล้มคว่ำเพิ่มเติมที่ยอมให้	เมตร	1.192
S_a	การล้มคว่ำเพิ่มเติมที่ยอมให้อยู่นอกเส้นโค้ง	เมตร	1.197
S_i	การล้มคว่ำเพิ่มเติมที่ยอมให้อยู่ในเส้นโค้ง	เมตร	1.204
T_{load}	มุมของการไม่สมมาตร ซึ่งพิจารณาใน η_{0r} สำหรับการกระจายน้ำหนักบรรทุกที่ไม่ดี	องศา	1.212
T_D	ความคลาดเคลื่อนของจุดตัดรางรถไฟระหว่างช่วงซ่อมบำรุง 2 ช่วง	เมตร	1.213
T_N	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ของรางในแนวดิ่ง	เมตร	1.214
T_{osc}	ความไม่สม่ำเสมอของจุดตัดรางรถไฟที่มีสาเหตุมาจากการสั่นแบบสุ่ม	เมตร	1.215
T_{susp}	มุมของการไม่สมมาตรซึ่งพิจารณาใน η_{0r} สำหรับการปรับตำแหน่งรองรับที่ไม่ดี	องศา	1.217
T_{track}	ระยะกระจัดตามขวางของรางรถไฟระหว่างช่วงซ่อมบำรุง 2 ช่วง	เมตร	1.218
V_c	อัตราเร็วสูงสุดของตู้รถไฟรุ่นดั้งเดิม	กม./ชม.	3.031



ตารางที่ 2-1 (ต่อ) สัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

สัญลักษณ์	การระบุ	หน่วย	เลขที่สัญลักษณ์
V_p	อัตราเร็วสูงสุดของตู้รถไฟที่เอียง	กม./ชม.	3.032
V'_c	อัตราเร็วเฉพาะที่ของตู้รถไฟรุ่นดั้งเดิม	กม./ชม.	1.221
V'_P	อัตราเร็วเฉพาะที่ของตู้รถไฟที่เอียง	กม./ชม.	1.222
w	ระยะช่องว่างตามขวางระหว่างแคร่รถไฟและตัวถังรถไฟ	เมตร	1.228
x_{qi}	ระยะช่องว่างตามขวางระหว่างแคร่รถไฟและตัวถังรถไฟอยู่ในระหว่างโค้งใน แปรผันเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับรัศมีส่วนโค้งของราง	เมตร	1.231
x_{qa}	ระยะพิกัดตามแนวราบของขอบชานชาลาที่อยู่นอกส่วนโค้ง	เมตร	3.033
x	ระยะทางที่พิจารณาจากจุดเริ่มต้น O สำหรับการคำนวณ e_v	เมตร	1.233
y	ระยะพิกัดตามแนวดิ่ง	เมตร	3.034
y_{qi}	ระยะพิกัดตามแนวดิ่งของขอบชานชาลาที่อยู่ในส่วนโค้ง	เมตร	3.035
y	ส่วนหนึ่งของการหมุนกึ่งสถิตที่พิจารณาจากตู้รถไฟ	เมตร	1.234
z_0	ค่าคงที่สำหรับตู้รถไฟที่อยู่นอกตำแหน่งสถิตอ้างอิงที่ยอมให้ตู้รถไฟหมุนกึ่งสถิต	เมตร	1.237
α	มุมที่เพิ่มขึ้นของการหมุนของตัวถังรถไฟเนื่องจากระยะห่างของหมอนรองด้านข้าง	องศา	1.242
α_Q	มุมสูงสุดของมุมหมุนรอบศูนย์กลางสำหรับส่วนบน	องศา	3.036
α''	มุมที่เกิดจากทางเดินรอยต่อตู้รถไฟระหว่างชานชาลาและ Ferry	องศา	1.245
γ	มุมเข้าของประแจสับหลีก	เรเดียน	1.246
$\delta_{q,a}$	ค่าสำหรับระยะทางถึงชานชาลาที่อยู่นอกส่วนโค้งที่มีความสำคัญกับพิกัดสำหรับโครงสร้างในตำแหน่งเอียงของค่า δ	เมตร	1.256
Σ_j	ผลรวมของค่าความปลอดภัยที่ยอมให้ (แนวราบ) สำหรับพิกัดโครงสร้างที่ครอบคลุมเหตุการณ์แบบสุ่มที่แน่นอน (j = 1, 2 หรือ 3)	เมตร	3.037
Σ'_j	ผลรวมของค่าที่ยอมให้สำหรับคำนวณขอบเขตทางจลศาสตร์ (j = 1, 2 หรือ 3)	เมตร	3.038
Σ''_j	ผลรวมของค่าที่ยอมให้สำหรับคำนวณขอบเขตทางพลศาสตร์ (j = 1, 2 หรือ 3)	เมตร	3.039
Σ_{EAj}	ผลรวมของค่าความปลอดภัยที่ยอมให้สำหรับระยะทางระหว่างศูนย์กลางที่ครอบคลุมเหตุการณ์แบบสุ่มที่แน่นอน (j = 1, 2 หรือ 3)	เมตร	3.040
Σ_V	ผลรวมของค่าที่ยอมให้ที่ได้พิจารณาในโครงสร้างพื้นฐานในแนวดิ่ง	เมตร	1.278



ตารางที่ 2-1 (ต่อ) สัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

สัญลักษณ์	การระบุ	หน่วย	เลขที่สัญลักษณ์
η^0	มุมของการไม่สมมาตรของตู้รถไฟเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการก่อสร้างถึงจุดปรับตำแหน่งรองรับและถึงจุดที่มีการกระจายน้ำหนักที่ไม่เท่ากัน	องศา	1.281
η_{0r}	มุมอ้างอิง η_0 ที่ได้พิจารณาค่าที่ยอมรับได้	องศา	1.283
θ	มุมที่เป็นผลจากความคลาดเคลื่อนการปรับตำแหน่งรองรับ	เรเดียน	1.284
τ	การก่อสร้าง pantograph และความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง	เมตร	1.286

ตารางที่ 2-2 แสดงดัชนีล่างที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

ดัชนีล่าง	คำอธิบาย
ดัชนีล่าง a	ส่วนโค้งนอก
ดัชนีล่าง i	ส่วนโค้งใน
ดัชนีล่าง 0	ค่าที่ยอมรับได้ระหว่างตู้รถไฟและโครงสร้างพื้นฐาน
ดัชนีล่าง st	ข้อบังคับการคำนวณด้านสถิตศาสตร์ ดัชนีล่างนี้สามารถเว้นไว้ได้ก็ต่อเมื่อ บริบทได้แสดงไว้อย่างชัดเจนว่าเป็นพารามิเตอร์ทางด้านสถิตศาสตร์
ดัชนีล่าง kin	ข้อบังคับการคำนวณด้านจลศาสตร์ ดัชนีล่างนี้สามารถเว้นไว้ได้ก็ต่อเมื่อ บริบทได้แสดงไว้อย่างชัดเจนว่าเป็นพารามิเตอร์ทางด้านจลศาสตร์
ดัชนีล่าง act	ค่าเฉพาะจุดที่แท้จริง เช่น ค่าที่วัดได้บนราง
ดัชนีล่าง RP	ตำแหน่งอ้างอิง
ดัชนีล่าง gap	ช่องว่างที่ระดับของชานชาลา
ดัชนีล่าง q	มิติการติดตั้งของชานชาลา
ดัชนีล่าง nom	ค่าระบุหรือค่าออกแบบ หรือพิกัดโครงสร้างระบุ
ดัชนีล่าง lim	พิกัดโครงสร้างบำรุงทาง
ดัชนีล่าง ver	พิกัดโครงสร้างขอบเขต
ดัชนีล่าง o	ขอบเขตบนของระดับการทวนสอบของพิกัด pantograph
ดัชนีล่าง u	ขอบเขตล่างของระดับการทวนสอบของ pantograph
ดัชนีล่าง P	ความเอียงของรถไฟ
ดัชนีล่าง C	รถไฟดั้งเดิม (Classic trains)
ดัชนีล่าง veh	ตู้รถไฟจริง
ดัชนีล่าง elec	ค่าฉนวนไฟฟ้า



2.2 ลักษณะทั่วไปและองค์ประกอบของเขตโครงสร้างทางรถไฟ

2.2.1 พิกัดเขตโครงสร้าง

เส้นแนวอ้างอิงและข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง

ข้อกำหนดนี้อธิบายกฎเกณฑ์โดยทั่วไปสำหรับการคำนวณขนาดและระยะต่าง ๆ ของพิกัดโครงสร้าง (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน EN 15273-1)

การคำนวณขนาดและระยะต่าง ๆ ของพิกัดโครงสร้างให้เริ่มต้นจากการกำหนดเส้นแนวอ้างอิง (Reference profile) ซึ่งหมายถึง ขอบเขตปลอดภัยสำหรับการเดินรถไฟบนทางตรง ราบ และไม่มีการยกโค้ง เนื่องจากขอบเขตปลอดภัยนี้ไม่ได้เผื่อระยะช่องว่างเพื่อรองรับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของรถไฟเทียบกับรางที่เกิดจากปรากฏการณ์แบบสุ่มชนิดต่าง ๆ (Random phenomena) รวมไปถึงระยะช่องว่างสำหรับการบำรุงทาง ดั้งนั้น จึงต้องทำการขยายระยะในแนวราบและดิ่งของเส้นแนวอ้างอิงออกไปอีก การขยายระยะดังกล่าวจะกระทำโดยสูตรและสมการต่าง ๆ ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง (Associated rules)

ทั้งนี้การขยายระยะจากเส้นแนวอ้างอิงจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่วงทางรถไฟที่กำลังพิจารณา เช่น รัศมีความโค้งราง ค่ายกโค้ง ความเร็วของการเดินรถ เป็นต้น ข้อบังคับที่เกี่ยวข้องสำหรับการขยายระยะในแนวราบและดิ่งเป็นไปตามที่แสดง ดังนี้

การขยายตามขวาง

ความแตกต่างของพิกัดขึ้นอยู่กับสถานการณ์เฉพาะที่ หมายถึง ขนาดของการขยายระยะตามแนวขวางออกจากเส้นแนวอ้างอิงขึ้นอยู่กับประเภทของพิกัดที่เลือกใช้ (พิกัดขอบเขต พิกัดบำรุงทาง หรือพิกัดระบุ) การคำนวณระยะขยายตามขวางขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการดังต่อไปนี้

(1) การล้มคว่ำเพิ่มเติม (Additional overthrow) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ต้องขยายระยะตามขวางของพิกัดโครงสร้างในช่วงทางโค้ง

(2) ผลกระทบกึ่งสถิต (Quasi-static effect) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ต้องขยายระยะตามขวางของพิกัดโครงสร้างเนื่องจากการตะแคงตัวของรถไฟ

โดยการล้มคว่ำเพิ่มเติม หมายความรวมถึงผลของเหตุการณ์ต่าง ๆ เช่น ผลกระทบของการขยายความกว้างรางรถไฟ และผลกระทบเชิงเรขาคณิตในโค้งของรถไฟอ้างอิงสมการคำนวณทั่วไปให้ไว้ใน EN 15273-1 สมการคำนวณที่ใช้คำนวณค่าพิกัดได้แสดงอยู่ในภาคผนวกมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

สำหรับผลกระทบกึ่งสถิต ทำให้เกิดการหมุนของตัวตู้ของรถไฟอ้างอิงในโค้งสำหรับส่วนบนให้เส้นแนวอ้างอิงของตัวรถไฟต้องการระยะเผื่อเพิ่มขึ้นที่ด้านบนเมื่อตัวรถอยู่ในโค้ง (นอกส่วนโค้ง ภายใต้ผลกระทบของ cant deficiency จะได้ค่าสูงสุดเมื่อรถไฟวิ่งถึงความเร็วสูงสุดที่อนุญาตให้วิ่งในส่วนโค้ง ภายใต้ผลกระทบของการยกโค้ง จะได้ค่าสูงสุดเมื่อรถไฟหยุดนิ่ง) ขึ้นอยู่กับประเภทของพิกัดรถไฟได้พิจารณาผลกระทบนี้แล้ว



หากค่าที่ใช้ไม่เกิน I_0 และ D_0 โครงสร้างพื้นฐานนำมาพิจารณาเป็นค่าเพิ่มเติมเท่านั้น สมการคำนวณทั่วไปให้ไว้ใน EN 15273-1 สมการคำนวณที่ใช้คำนวณค่าพิกัดได้แสดงอยู่ในภาคผนวกมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

เหตุการณ์ทางขวางแบบสุ่ม (Random transverse phenomena)

การพิจารณาเหตุการณ์แบบสุ่มขึ้นอยู่กับพิกัดที่ใช้ และเป็นความรับผิดชอบของผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐาน โดยมีการพิจารณา ดังนี้

- การสั่นของตัวรถที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของราง (T_{osc})

ความไม่สม่ำเสมอของรางชนิดที่รองรับด้วยหินโรยทางเป็นสาเหตุทำให้รถไฟเกิดการสั่น ขนาดการสั่นขึ้นอยู่กับสภาพของรางรถไฟ ลักษณะของจุดรองรับและความเร็ว ตราบเท่าที่เหตุการณ์เหล่านี้ได้พิจารณาสิ่งที่เกิดจากโครงสร้างพื้นฐาน การสั่นนี้แสดงในรูปของค่าความคลาดเคลื่อนของจุดตัดเสมอระดับ (T_{osc}) การสั่นนี้อยู่ที่ฐานบริเวณเอียงของจุดหมุนรอบศูนย์กลาง ขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของตัวรถไฟ ดังสมการที่ 2-1

$$\frac{S_0}{L} T_{osc} (h - h_{c0})_{>0} \qquad \text{สมการที่ 2-1}$$

หมายเหตุ: วิธีการอื่นที่มีอยู่ในการพิจารณาเหตุการณ์นี้ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของพิกัดเชิงพลวัต เหตุการณ์นี้ได้ถูกรวมเข้าไปในตัวรถไฟ

- ระยะกระจัดของราง (T_{track})

ของรางนั้นเปลี่ยนไปมาระหว่างการตรวจสอบราง 2 ราง เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจากการจราจร และการซ่อมบำรุงราง ระยะกระจัดตามขวางสูงสุด (T_{track}) ขึ้นอยู่กับแรงที่กำหนดในการซ่อมบำรุง และความถี่ที่ดำเนินการในกรณีที่มีมาตรการป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างรางกับโครงสร้างที่อยู่ข้างเคียง ไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลของระยะกระจัดของรางในการคำนวณพิกัดโครงสร้างก็ได้

- Cant deviation (T_D)

เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ของการซ่อมบำรุงและการจราจร ค่ายกโค้งของรางแปรผันกับค่ายกโค้งระบุ การเปลี่ยนแปลงของค่ายกโค้งนี้ส่งผลกระทบ 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เส้นแนวพิกัดหมุนรอบศูนย์กลางของรางที่มุมหมุนสอดคล้องกับค่าแตกต่างสูงสุด ดังสมการที่ 2-2

$$S_0 . \frac{T_D}{L} (h - h_{c0})_{>0} \qquad \text{สมการที่ 2-2}$$



แบบที่ 2 ความยืดหยุ่นของจุดรองรับ รถไฟจะมีแนวโน้มหมุนรอบศูนย์กลางของจุดหมุน ดังสมการที่ 2-3

$$\Delta b = s_0 . \frac{T_D}{L}(h - h_{c0}) \qquad \text{สมการที่ 2-3}$$

เหตุการณ์ทั้ง 2 แบบนี้ ไม่เพียงแต่มีผลกระทบต่อด้านในและด้านนอกของส่วนโค้ง ยังมีผลกระทบต่อรางทางตรง (ในปริมาณที่น้อยกว่า) ควรสังเกตว่าเหตุการณ์ทั้งสองนี้เกิดขึ้นพร้อมกันเสมอ ดังนั้นไม่เป็นอิสระต่อกัน

- ความไม่สมมาตร (η_0)

รถไฟไม่มีทางที่จะสมมาตรได้อย่างสมบูรณ์ สาเหตุหลักเนื่องจาก (ขึ้นอยู่กับประเภทของพิกัดคือ

(1) การปรับจุดรองรับไม่ดีเป็นผลให้โครงรถหมุน (T_{susp}) และ

(2) ความไม่สมมาตรของน้ำหนักบรรทุก ซึ่งทำให้ตัวถังรถไฟหมุนใน suspension gear และเป็นผลทำให้เกิดการหมุนของรถไฟ (T_{load})

ทั้งสองกรณีนั้น โครงรถหมุนรอบศูนย์กลางการหมุน C_0 ผลรวมของมุมทั้งสองสอดคล้องกับมุมอ้างอิง η_0 ดังสมการที่ 2-4

$$T_{dis} = T_{load} + T_{susp} \qquad \text{สมการที่ 2-4}$$

2.3 การคำนวณเขตโครงสร้างทางรถไฟ

2.3.1 ข้อกำหนดในการหาพิกัดสถิตศาสตร์ (Static Gauge)

เมื่อเป็นไปได้ โครงสร้างพื้นฐานใช้การคำนวณทางจลศาสตร์ที่สอดคล้องกัน เมื่อไม่มีข้อมูลของพิกัดนี้หรือมีค่าที่ยอมให้เพียงพอ วิธีการพร้อมข้อกำหนดได้แสดงไว้ข้างล่างดังนี้ คือ พิกัดโครงสร้างสถิตศาสตร์ได้นิยามไว้ขึ้นอยู่กับระดับอ้างอิงเชิงสถิต และข้อบังคับที่เกี่ยวข้องในรูปแบบของการยอมรับร่วมกันระหว่างโครงสร้างพื้นฐานและรถไฟ ซึ่งไม่สามารถแยกกันพิจารณาได้ แต่ระยะกระจัดแนวขวางและแนวดิ่งพิจารณาแยกออกจากกัน

เส้นแนวอ้างอิงเชิงสถิตของพิกัดรางระบุ (Nominal rail gauge) ที่ไม่มีค่ายกโค้งหาได้สำหรับทางรถไฟตรงและเรียบ พิกัดนี้เป็นค่าที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสถานการณ์ของทางรถไฟเฉพาะที่ (ค่ายกโค้งรัศมีความโค้งและพิกัดราง) มักจะถูกพิจารณาโดยค่าที่ยอมให้แบบตายตัว พารามิเตอร์ทั้งหมดนั้นถูกพิจารณาให้มีค่าเป็นบวกทางด้านขวาหรือซ้ายของเส้นศูนย์กลางในแนวดิ่งขึ้นอยู่กับแต่ละกรณี



ข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง

เมื่อขาดข้อมูลของพิกัดเชิงจลน์เทียบเท่า พิกัดโครงสร้างนั้นหาได้โดยอาศัยเส้นแนวอ้างอิงเชิงสถิต ซึ่งแสดงระยะในแนวราบของพิกัดสถิตศาสตร์หาได้จากสมการที่ 2-5

$$b_{structure} \geq b_{RP} + S_{i/a} + qs_{i/a} + \sum_j \qquad \text{สมการที่ 2-5}$$

โดยที่

b_{RP} คือ ความกว้างกึ่งหนึ่งของเส้นแนวอ้างอิงเชิงสถิต

$S_{i/a}$ คือ การล่มคว่ำเพิ่มเติม

$qs_{i/a}$ คือ ผลกระทบกึ่งสถิต

โดยผลกระทบกึ่งสถิต สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2-6 ถึง สมการที่ 2-9 ดังนี้

ด้านในโค้ง

$$qs_i = z_0 + \frac{s_0}{L}.[D - D_0]_{>0}.[h - h_{c0}]_{>0} \qquad \text{สมการที่ 2-6}$$

ด้านนอกโค้ง

$$qs_a = z_0 + \frac{s_0}{L}.[I - I_0]_{>0}.[h - h_{c0}]_{>0} \qquad \text{สมการที่ 2-7}$$

โดยที่ เป็นค่าคงที่

$$z_0 = \frac{s_0(D_0 or I_0)}{L}(h_{\max} - h_{c0}) \qquad \text{สมการที่ 2-8}$$

หรือความสูงแปรผัน

$$z_0 = \frac{s_0(D_0 or I_0)}{L}(h - h_{c0}) \qquad \text{สมการที่ 2-9}$$

โดยผลรวมของค่าที่ยอมให้ $\sum_j$ ครอบคลุมเหตุการณ์แบบสุ่ม

สำหรับระยะในแนวดิ่งของพิกัดสถิตศาสตร์หาได้จากสมการที่ 2-10

$$h_{structure} \geq h_{RP} + \Delta h_{R_V} + \Delta h_{susp} + \Delta h_Q + \sum_V \qquad \text{สมการที่ 2-10}$$

โดยที่

h_{RP} คือ เส้นแนวความสูงอ้างอิง

Δh_{R_V} คือ การยก/การลดระดับในแนวดิ่งในช่วงเข้าโค้ง

Δh_{susp} คือ การยกตัวของรถไฟเนื่องจากความยืดหยุ่นของจุดรองรับ

Δh_Q คือ การยกตัวของส่วนบนเนื่องจากผลกระทบในแนวดิ่งของการหมุนตัว

โดยที่

$$\alpha_Q = \frac{s_0}{L}.\max(D, I) \qquad \text{สมการที่ 2-11}$$

โดย $\sum_V$ เป็นผลรวมของค่าที่ยอมให้เพิ่มเติมสำหรับเหตุการณ์แบบสุ่ม



การหาผลรวมของค่าที่ยอมให้ $\sum$

ค่าที่ยอมให้ตามขวาง

เหตุการณ์ที่พิจารณาค่าที่ยอมให้ได้นิยามไว้ เพื่อที่จะพิจารณาถึงเหตุการณ์แบบสุ่ม เหตุการณ์ทั้งหลายได้ถูกจัดกลุ่มตามข้างล่าง ดังนี้

M_1 รวมผลกระทบของเหตุการณ์แบบสุ่มทั้งหมด เนื่องจากการเคลื่อนตัวจริงของรถไฟ ค่าที่ยอมให้กำหนดขอบเขตการเดินรถ

โดยที่ M_1 หาได้จากพื้นฐานของการสั่นที่ถูกจัดประเภทโดยค่าความคลาดเคลื่อน T_{osc} และความไม่สมมาตร (η_0) เนื่องจากการปรับจุดรองรับไม่ดี และการกระจายน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่า 1 องศา

M_2 รวมผลกระทบแบบสุ่มที่ทำให้มีการใช้ที่ดีที่สุดของค่ายอมให้ทำให้มั่นใจได้ว่าการซ่อมบำรุงที่ความถี่และทรัพยากรที่ได้เลือกไว้ โดย M_2 หาได้จากพื้นฐานของการขยายความกว้างเพื่อที่จะพิจารณาระยะกระจัดของราง T_{track} ระหว่างช่วงการซ่อมบำรุงสองช่วง และส่วนของเรขาคณิตและผลกระทบกึ่งสถิตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดของจุดตัดระดับของราง T_D

M_3 คือ ค่าที่ยอมให้ที่ทำให้มีการจัดการพิกัดได้ง่ายในระยะยาว และพิจารณาถึงความเป็นไปได้อื่น ๆ ที่เพิ่มเข้ามาสำหรับการขนส่งสินค้าพิเศษ การติดตั้งชั่วคราว หรืออื่น ๆ

การหาผลรวมของค่าที่ยอมให้ $\sum_j$

ค่าประสิทธิผลของ $\sum_j$ อาจเลือกได้จากค่าที่เป็นไปได้ทั้งค่าตายตัว หาได้จากพื้นฐานของประสบการณ์จากผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐานที่มีบนโครงข่าย หรือค่าที่คำนวณจากพื้นฐานของค่าความคลาดเคลื่อนของการซ่อมบำรุง

เมื่อทำการหาพิกัดโครงสร้างขอบเขต สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าระดับที่ยอมรับได้สามารถหาได้จากการใช้สมการที่ 2-12 ดังนี้

$$\sum_j = k\sqrt{\sum_{j'} \Delta b_{T_{j'}}^{\ 2}} \qquad \text{สมการที่ 2-12}$$

โดยที่ T_j คือ ค่าที่ยอมให้ของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ทำการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นอิสระเชิงสถิติต่อกันควรจะนำมาพิจารณาร่วมกัน เช่น ผลรวมเชิงตัวเลข



ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ k หาได้จากระดับความปลอดภัย ($k \geq 1$) โดยคำอธิบายโดยรายละเอียดแสดงไว้ใน EN 15273-1 และแสดงตัวอย่างการคำนวณ และค่าที่แนะนำสำหรับความคลาดเคลื่อนได้แสดงไว้ในภาคผนวกมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

ค่าที่ยอมให้ในแนวดิ่งของเหตุการณ์แบบสุ่ม

เหตุการณ์ที่พิจารณาค่าที่ยอมให้ได้นิยามเพื่อที่พิจารณาความคลาดเคลื่อนดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบในแนวดิ่งของการหมุนเนื่องจากเหตุการณ์แบบสุ่ม (สำหรับส่วนบนเท่านั้น)

2) ความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่งของราง T_n

3) ความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่ง

4) ค่าที่ยอมให้เพิ่มเติม

<u>การหาผลรวมของค่าที่ยอมให้ในแนวดิ่ง $\sum_V$</u>

ค่าประสิทธิผลของ $\sum_V$ อาจเลือกได้จากค่าที่เป็นไปได้ทั้งค่าตายตัว หาได้จากพื้นฐานของประสบการณ์จากผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐานที่มีบนโครงข่าย หรือค่าที่คำนวณจากพื้นฐานของค่าความคลาดเคลื่อนของการซ่อมบำรุง

เมื่อทำการหาพิกัดโครงสร้างขอบเขต สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าระดับที่ยอมรับได้สามารถหาได้จากการใช้สมการที่ 2-13 ดังนี้

$$\sum_V = k \sqrt{\sum_{j'} \Delta h_{T_{j'}}{}^2} \qquad \text{สมการที่ 2-13}$$

โดยที่ T_j คือ ค่าที่ยอมให้ของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ทำการพิจารณา พารามิเตอร์ที่ไม่เป็นอิสระเชิงสถิติต่อกันควรจะนำมาพิจารณาร่วมกัน เช่น ผลรวมเชิงตัวเลข

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ k หาได้จากระดับความปลอดภัย ($k \geq 1$) โดยคำอธิบายโดยรายละเอียดแสดงไว้ใน EN 15273-1 และแสดงตัวอย่างการคำนวณ และค่าที่แนะนำสำหรับความคลาดเคลื่อนได้แสดงไว้ในภาคผนวกมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

ค่าที่ยอมให้ในแนวดิ่งของเหตุการณ์แบบสุ่ม

เหตุการณ์ที่พิจารณาค่าที่ยอมให้ได้นิยามเพื่อที่พิจารณาความคลาดเคลื่อนดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบในแนวดิ่งของการหมุนเนื่องจากเหตุการณ์แบบสุ่ม (สำหรับส่วนบนเท่านั้น)

2) ความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่งของราง T_n

3) ความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่ง

4) ค่าที่ยอมให้เพิ่มเติม



การหาผลรวมของค่าที่ยอมให้ในแนวดิ่ง $\sum_V$

ค่าประสิทธิผลของ $\sum_V$ อาจเลือกได้จากค่าที่เป็นไปได้ทั้งค่าตายตัว หาได้จากพื้นฐานของประสบการณ์จากผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐานที่มีบนโครงข่าย หรือค่าที่คำนวณจากพื้นฐานของค่าความคลาดเคลื่อนของการซ่อมบำรุง

เมื่อทำการหาพิกัดโครงสร้างขอบเขต สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าระดับที่ยอมรับได้สามารถหาได้จากการใช้สมการที่ 2-14ดังนี้

$$\sum_V = k\sqrt{\sum_{j'} \Delta h_{T_{j'}}^{\ 2}} \qquad \text{สมการที่ 2-14}$$

โดยที่ T_j คือ ค่าที่ยอมให้ของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ทำการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นอิสระเชิงสถิติต่อกันควรจะนำมาพิจารณาร่วมกัน เช่น ผลรวมเชิงตัวเลข

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ k หาได้จากระดับความปลอดภัย ($k \geq 1$) โดยคำอธิบายโดยรายละเอียดแสดงไว้ใน EN 15273-1 และแสดงตัวอย่างการคำนวณ และค่าที่แนะนำสำหรับความคลาดเคลื่อนได้แสดงไว้ในภาคผนวกมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

<u>ค่าที่ยอมให้ตามขวาง สำหรับเหตุการณ์แบบสุ่ม</u>

เหตุการณ์ที่พิจารณาค่าที่ยอมให้ได้นิยามไว้เพื่อที่จะพิจารณาถึงเหตุการณ์แบบสุ่ม เหตุการณ์ทั้งหลายได้ถูกจัดกลุ่มตามข้างล่างนี้

$\boldsymbol{M_1}$ คือ รวมผลกระทบของเหตุการณ์แบบสุ่มทั้งหมด เนื่องจากการเคลื่อนตัวจริงของรถไฟ ค่าที่ยอมให้กำหนดขอบเขตการเดินรถ $\boldsymbol{M_1}$ หาได้จากพื้นฐานของการสั่นที่ถูกจัดประเภทโดยค่าความคลาดเคลื่อน T_{osc} และความไม่สมมาตร (η_0) เนื่องจากการปรับจุดรองรับไม่ดี และการกระจายน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่า 1 องศา

M_2 คือ รวมผลกระทบแบบสุ่มที่ทำให้มีการใช้ที่ดีที่สุดของค่ายอมให้ทำให้มั่นใจได้ว่าการซ่อมบำรุงที่ความถี่และทรัพยากรที่ได้เลือกไว้ M_2 หาได้จากพื้นฐานของการขยายความกว้างเพื่อที่จะพิจารณาระยะกระจัดของราง T_{track} ระหว่างช่วงการซ่อมบำรุงสองช่วง และส่วนของเรขาคณิตและผลกระทบกึ่งสถิตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดของจุดตัดระดับของราง T_D

M_3 คือ ค่าที่ยอมให้ที่ทำให้มีการจัดการพิกัดได้ง่ายในระยะยาว และพิจารณาถึงความเป็นไปได้อื่น ๆ ที่เพิ่มเข้ามาสำหรับการขนส่งสินค้าพิเศษ การติดตั้งชั่วคราว หรืออื่น ๆ



การหาผลรวมของค่าที่ยอมให้ตามขวาง $\sum_j$

ค่าประสิทธิผลของ $\sum_j$ อาจเลือกได้จากค่าที่เป็นไปได้ทั้งค่าตายตัว หาได้จากพื้นฐานของประสบการณ์จากผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐานที่มีบนโครงข่าย หรือค่าที่คำนวณจากพื้นฐานของค่าความคลาดเคลื่อนของการซ่อมบำรุง

เมื่อทำการหาพิกัดโครงสร้างขอบเขต สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าระดับที่ยอมรับได้สามารถหาได้จากการใช้สมการที่ 2-15 ดังนี้

$$\sum_j = k\sqrt{\sum_{j'} \Delta b_{T_{j'}}{}^2} \qquad \text{สมการที่ 2-15}$$

โดยที่ T_j คือ ค่าที่ยอมให้ของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ทำการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นอิสระเชิงสถิติต่อกันควรจะนำมาพิจารณาร่วมกัน เช่น ผลรวมเชิงตัวเลข

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ k หาได้จากระดับความปลอดภัย ($k \geq 1$) โดยคำอธิบายโดยรายละเอียดแสดงไว้ใน EN 15273-1 และแสดงตัวอย่างการคำนวณ และค่าที่แนะนำสำหรับความคลาดเคลื่อนได้แสดงไว้ในภาคผนวกมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

<u>ค่าที่ยอมให้ในแนวดิ่งของเหตุการณ์แบบสุ่ม</u>

เหตุการณ์ที่พิจารณาค่าที่ยอมให้ได้นิยามเพื่อที่พิจารณาความคลาดเคลื่อนดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบในแนวดิ่งของการหมุนเนื่องจากเหตุการณ์แบบสุ่ม (สำหรับส่วนบนเท่านั้น)

2) ความคลาดเคลื่อนในระของราง T_n

3) ความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่ง

4) ค่าที่ยอมให้เพิ่มเติม

การหาผลรวมของค่าที่ยอมให้ในแนวดิ่ง $\sum_V$

ค่าประสิทธิผลของ $\sum_V$ อาจเลือกได้จากค่าที่เป็นไปได้ทั้งค่าตายตัว หาได้จากพื้นฐานของประสบการณ์จากผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐานที่มีบนโครงข่ายหรือค่าที่คำนวณจากพื้นฐานของค่าความคลาดเคลื่อนของการซ่อมบำรุง

เมื่อทำการหาพิกัดโครงสร้างขอบเขต สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าระดับที่ยอมรับได้สามารถหาได้จากการใช้สมการที่ 2-16ดังนี้

$$\sum_V = k\sqrt{\sum_{j'} \Delta h_{T_{j'}}{}^2} \qquad \text{สมการที่ 2-16}$$

โดยที่ T_j คือ ค่าที่ยอมให้ของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ทำการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นอิสระเชิงสถิติต่อกันควรจะนำมาพิจารณาร่วมกัน เช่น ผลรวมเชิงตัวเลข



ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ k หาได้จากระดับความปลอดภัย ($k \geq 1$) โดยคำอธิบายโดยรายละเอียดแสดงไว้ใน EN 15273-1 และแสดงตัวอย่างการคำนวณ และค่าที่แนะนำสำหรับความคลาดเคลื่อนได้แสดงไว้ในภาคผนวกมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

2.3.2 ข้อบังคับในการหาพิกัดเชิงจลน์ (Kinematic Gauge)

เส้นแนวอ้างอิงเชิงจลน์ของพิกัดรางระบุ (Nominal rail gauge) ที่ไม่มีค่ายกโค้งหาได้สำหรับทางรถไฟตรงและเรียบ พิกัดนี้เป็นค่าที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสถานการณ์ของทางรถไฟเฉพาะที่ (ค่ายกโค้ง รัศมีความโค้ง และพิกัดราง) เหตุการณ์แบบสุ่ม มักจะถูกพิจารณาโดยผลรวมของค่าที่ยอมให้ $\sum_j$ พารามิเตอร์ทั้งหมดนั้นถูกพิจารณาให้มีค่าเป็นบวกทางด้านขวาหรือซ้ายของเส้นศูนย์กลางในแนวดิ่งขึ้นอยู่กับแต่ละกรณี

ข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง

ระยะในแนวราบของพิกัดเชิงจลน์หาได้จากสมการที่ 2-17

$$b_{structure} \geq b_{RP} + S_{i/a} + qs_{i/a} + \sum_j \qquad \text{สมการที่ 2-17}$$

โดยที่ b_{RP} คือ ความกว้างกึ่งหนึ่งของเส้นแนวอ้างอิงเชิงจลน์

$S_{i/a}$ คือ การล่มคว่ำเพิ่มเติม

$qs_{i/a}$ คือ ผลกระทบกึ่งสถิต

โดยผลกระทบกึ่งสถิต สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-18 ถึง สมการที่ 2-19 ดังนี้

ด้านในโค้ง $$qs_i = \frac{s_0}{L}.[D - D_0]_{>0}.[h - h_{c0}]_{>0} \qquad \text{สมการที่ 2-18}$$

ด้านนอกโค้ง $$qs_a = \frac{s_0}{L}.[I - I_0]_{>0}.[h - h_{c0}]_{>0} \qquad \text{สมการที่ 2-19}$$

ระยะในแนวดิ่งของพิกัดเชิงจลน์หาได้จากสมการที่ 2-20

$$h_{structure} \geq h_{RP} + \Delta h_{R_V} + \Delta h_Q + \sum_V \qquad \text{สมการที่ 2-20}$$

โดยที่ h_{RP} คือ ระดับเส้นแนวอ้างอิงเชิงจลน์

Δh_{R_V} คือ การยก/การลดระดับในช่วงเข้าโค้ง

Δh_Q คือ การยกตัวของส่วนบนเนื่องจากผลกระทบในแนวดิ่งของการหมุนตัว



โดยที่

$$\alpha_Q = \frac{s_0}{L}.\max(D, I)$$ สมการที่ 2-21

ค่าที่ยอมให้ตามขวางสำหรับเหตุการณ์แบบสุ่ม

เหตุการณ์ที่พิจารณาค่าที่ยอมให้ได้นิยามไว้เพื่อที่จะพิจารณาถึงเหตุการณ์แบบสุ่ม เหตุการณ์ทั้งหลายได้ถูกจัดกลุ่มตามข้างล่างนี้

$\boldsymbol{M_1}$ คือ รวมผลกระทบของเหตุการณ์แบบสุ่มทั้งหมด เนื่องจากการเคลื่อนตัวจริงของรถไฟ ค่าที่ยอมให้กำหนดขอบเขตการเดินรถ $\boldsymbol{M_1}$ หาได้จากพื้นฐานของการสั่นที่ถูกจัดประเภทโดยค่าความคลาดเคลื่อน T_{osc} และความไม่สมมาตร (η_0) เนื่องจากการปรับจุดรองรับไม่ดี และการกระจายน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่า 1 องศา

M_2 คือ รวมผลกระทบแบบสุ่มที่ทำให้มีการใช้ที่ดีที่สุดของค่ายอมให้ทำให้มั่นใจได้ว่าการซ่อมบำรุงที่ความถี่และทรัพยากรที่ได้เลือกไว้ M_2 หาได้จากพื้นฐานของการขยายความกว้างเพื่อที่จะพิจารณาระยะกระจัดของราง T_{track} ระหว่างช่วงการซ่อมบำรุงสองช่วง และส่วนของเรขาคณิตและผลกระทบกึ่งสถิตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดของจุดตัดระดับของราง T_D

M_3 คือ ค่าที่ยอมให้ที่ทำให้มีการจัดการพิกัดได้ง่ายในระยะยาว และพิจารณาถึงความเป็นไปได้อื่น ๆ ที่เพิ่มเข้ามาสำหรับการขนส่งสินค้าพิเศษ การติดตั้งชั่วคราว หรืออื่น ๆ

การหาผลรวมของค่าที่ยอมให้ตามขวาง $\sum_j$

ค่าประสิทธิผลของ $\sum_j$ อาจเลือกได้จากค่าที่เป็นไปได้ทั้งค่าตายตัว หาได้จากพื้นฐานของประสบการณ์จากผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐานที่มีบนโครงข่าย หรือค่าที่คำนวณจากพื้นฐานของค่าความคลาดเคลื่อนของการซ่อมบำรุง

เมื่อทำการหาพิกัดโครงสร้างขอบเขต สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าระดับที่ยอมรับได้สามารถหาได้ดังนี้

$$\sum_j = k\sqrt{\sum_{j'} \Delta b_{T_{j'}}{}^2}$$ สมการที่ 2-22

โดยที่ T_j คือ ค่าที่ยอมให้ของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ทำการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นอิสระเชิงสถิตต่อกันควรจะนำมาพิจารณาร่วมกัน เช่น ผลรวมเชิงตัวเลข



ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ k หาได้จากระดับความปลอดภัย ($k \geq 1$) โดยคำอธิบายโดยรายละเอียดแสดงไว้ใน EN 15273-1 และแสดงตัวอย่างการคำนวณ และค่าที่แนะนำสำหรับความคลาดเคลื่อนได้แสดงไว้ในภาคผนวกมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

ค่าที่ยอมให้ในแนวดิ่งของเหตุการณ์แบบสุ่ม

เหตุการณ์ที่พิจารณาค่าที่ยอมให้ได้นิยามเพื่อที่พิจารณาความคลาดเคลื่อนดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบในแนวดิ่งของการหมุนเนื่องจากเหตุการณ์แบบสุ่ม (สำหรับส่วนบนเท่านั้น)

2) ความคลาดเคลื่อนในระของราง T_n

3) ความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่ง

4) ค่าที่ยอมให้เพิ่มเติม

การหาผลรวมของค่าที่ยอมให้ในแนวดิ่ง $\sum_V$

ค่าประสิทธิผลของ $\sum_V$ อาจเลือกได้จากค่าที่เป็นไปได้ทั้งค่าตายตัว หาได้จากพื้นฐานของประสบการณ์จากผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐานที่มีบนโครงข่ายหรือค่าที่คำนวณจากพื้นฐานของค่าความคลาดเคลื่อนของการซ่อมบำรุง

เมื่อทำการหาพิกัดโครงสร้างขอบเขตสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าระดับที่ยอมรับได้สามารถหาได้จากการใช้สมการดังนี้

$$\sum_V = k \sqrt{\sum_{j'} \Delta h_{T_{j'}}{}^2} \qquad \text{สมการที่ 2-23}$$

โดยที่ T_j คือ ค่าที่ยอมให้ของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ทำการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นอิสระเชิงสถิติต่อกันควรจะนำมาพิจารณาร่วมกัน เช่น ผลรวมเชิงตัวเลข

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ k หาได้จากระดับความปลอดภัย ($k \geq 1$) โดยคำอธิบายโดยรายละเอียดแสดงไว้ใน EN 15273-1 และแสดงตัวอย่างการคำนวณ และค่าที่แนะนำสำหรับความคลาดเคลื่อนได้แสดงไว้ในภาคผนวกมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง



2.3.3 ข้อบังคับในการหาพิกัดเชิงพลวัต (Dynamic Gauge)

เส้นแนวอ้างอิงเชิงพลศาสตร์ของพิกัดรางระบุ (Nominal rail gauge) ที่ไม่มีค่ายกโค้งหาได้สำหรับทางรถไฟตรงและเรียบ พิกัดนี้เป็นค่าที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสถานการณ์ของทางรถไฟเฉพาะที่ (ค่ายกโค้ง รัศมีความโค้ง และพิกัดราง)

เหตุการณ์แบบสุ่มมักจะถูกพิจารณาโดยผลรวมของค่าที่ยอมให้ $\sum_j$ พารามิเตอร์ทั้งหมดนั้นถูกพิจารณาให้มีค่าเป็นบวกทางด้านขวาหรือซ้ายของเส้นศูนย์กลางในแนวดิ่งขึ้นอยู่กับแต่ละกรณี

ข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง

ระยะในแนวราบของพิกัดเชิงพลวัตหาได้จากสมการที่ 2-24

$$b_{structure} \geq b_{RP} + S_{i/a} + \sum_j \qquad \text{สมการที่ 2-24}$$

โดยที่ b_{RP} คือ ความกว้างกึ่งหนึ่งของเส้นแนวอ้างอิงทางพลศาสตร์

$S_{i/a}$ คือ การล่มคว่ำเพิ่มเติม

ระยะในแนวดิ่งของพิกัดเชิงพลวัตหาได้จากสมการที่ 2-25

$$h_{structure} \geq h_{RP} + \Delta h_{R_V} + \sum_V \qquad \text{สมการที่ 2-25}$$

โดยที่ h_{RP} คือ ระดับความสูงของเส้นแนวอ้างอิงทางพลศาสตร์

Δh_{R_V} คือ การยก/การลดระดับในช่วงเข้าโค้ง

ค่าที่ยอมให้ตามขวางสำหรับเหตุการณ์แบบสุ่ม

เหตุการณ์ที่พิจารณาค่าที่ยอมให้ได้นิยามไว้ เหตุการณ์ทั้งหลายได้ถูกจัดกลุ่มตามข้างล่างนี้

M_1 คือ รวมผลกระทบของเหตุการณ์แบบสุ่มทั้งหมด เนื่องจากการเคลื่อนตัวจริงของรถไฟ ค่าที่ยอมให้กำหนดขอบเขตการเดินรถ M_1 หาได้จากพื้นฐานของความไม่สมมาตร (η_0)เนื่องจากการปรับจุดรองรับไม่ดี และการกระจายน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่า 1 องศา

M_2 คือ รวมผลกระทบแบบสุ่มที่ทำให้มีการใช้ที่ดีที่สุดของค่ายอมให้ทำให้มั่นใจได้ว่าการซ่อมบำรุงที่ความถี่และทรัพยากรที่ได้เลือกไว้ M_2 หาได้จากพื้นฐานของการขยายความกว้างเพื่อที่จะพิจารณาระยะ



กระจัดของราง T_{track} ระหว่างช่วงการซ่อมบำรุงสองช่วง ส่วนของเรขาคณิต ($h\frac{T_D}{L}$) เท่านั้น เนื่องจากความผิดพลาดของจุดตัดระดับของราง T_D (ในส่วนของผลกระทบกึ่งสถิตให้พิจารณาโดยรถไฟ)

M_3 คือ ค่าที่ยอมให้ที่ทำให้มีการจัดการพิกัดได้ง่ายในระยะยาว และพิจารณาถึงความเป็นไปได้อื่นที่เพิ่มเข้ามาสำหรับการขนส่งสินค้าพิเศษ การติดตั้งชั่วคราว หรืออื่น ๆ

การหาผลรวมของค่าที่ยอมให้ตามขวาง $\sum_j$

ค่าประสิทธิผลของ $\sum_j$ อาจเลือกได้จากค่าที่เป็นไปได้ทั้งค่าตายตัว หาได้จากพื้นฐานของประสบการณ์จากผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐานที่มีบนโครงข่าย หรือค่าที่คำนวณจากพื้นฐานของค่าความคลาดเคลื่อนของการซ่อมบำรุง

เมื่อทำการหาพิกัดโครงสร้างขอบเขต สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าระดับที่ยอมรับได้สามารถหาได้จากการใช้สมการที่ 2-26ดังนี้

$$\sum_j = k\sqrt{\sum_{j'} \Delta b_{T_{j'}}{}^2} \qquad \text{สมการที่ 2-26}$$

โดยที่ T_j คือ ค่าที่ยอมให้ของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ทำการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นอิสระเชิงสถิติต่อกันควรจะนำมาพิจารณาร่วมกัน เช่น ผลรวมเชิงตัวเลข

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ k หาได้จากระดับความปลอดภัย ($k \geq 1$) โดยคำอธิบายโดยรายละเอียดแสดงไว้ใน EN 15273-1 และแสดงตัวอย่างการคำนวณ และค่าที่แนะนำสำหรับความคลาดเคลื่อนได้แสดงไว้ในภาคผนวกมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง

ค่าที่ยอมให้ในแนวดิ่งของเหตุการณ์แบบสุ่ม

เหตุการณ์ที่พิจารณาค่าที่ยอมให้ได้นิยามเพื่อที่พิจารณาความคลาดเคลื่อนดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบในแนวดิ่งของการหมุนเนื่องจากเหตุการณ์แบบสุ่ม (สำหรับส่วนบนเท่านั้น)

2) ความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่งของราง T_n

3) ความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่ง

4) ค่าที่ยอมให้เพิ่มเติม



การหาผลรวมของค่าที่ยอมให้ในแนวดิ่ง $\sum_V$

เนื่องจากไม่มีลำดับของพารามิเตอร์แบบสุ่มดังเช่นในกรณีของความกว้างกึ่งหนึ่ง ความสูงนั้นหาได้จากผลรวมเชิงตัวเลขขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่พิจารณาค่าประสิทธิผลของ $\sum_V$ อาจเลือกได้จากค่าที่เป็นไปได้ทั้งค่าตายตัว หาได้จากพื้นฐานของประสบการณ์จากผู้รับผิดชอบด้านงานโครงสร้างพื้นฐานที่มีบนโครงข่าย หรือค่าที่คำนวณจากพื้นฐานของค่าความคลาดเคลื่อนของการซ่อมบำรุง

เมื่อทำการหาพิกัดโครงสร้างขอบเขต สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าระดับที่ยอมรับได้สามารถหาได้จากการใช้สมการดังนี้

$$\sum_V = k\sqrt{\sum_{j'} \Delta h_{T_{j'}}{}^2} \qquad \text{สมการที่ 2-27}$$

โดยที่ T_j คือ ค่าที่ยอมให้ของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ทำการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นอิสระเชิงสถิติต่อกันควรจะนำมาพิจารณาร่วมกัน เช่น ผลรวมเชิงตัวเลข

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ k หาได้จากระดับความปลอดภัย ($k \geq 1$) โดยคำอธิบายโดยรายละเอียดแสดงไว้ใน EN 15273-1 และแสดงตัวอย่างการคำนวณ และค่าที่แนะนำสำหรับความคลาดเคลื่อนได้แสดงไว้ในภาคผนวกมาตรฐานเขตโครงสร้างทาง



บทที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างทางรถไฟ (Track Structural Geometry)

3.1 ทั่วไป

คู่มือออกแบบและวางแนวเส้นทางรถไฟฉบับนี้ แสดงรายละเอียดและวิธีการออกแบบทางเรขาคณิตของเส้นทางรถไฟภายใต้มาตรฐานการออกแบบและวางแนวเส้นทางรถไฟ (มขร S-T-003-256x) เพื่อให้การก่อสร้างและบำรุงรักษาเส้นทางรถไฟสามารถดำเนินการภายในขอบเขตทางเรขาคณิตที่ปลอดภัย และจำกัดผลของแรงเนื่องจากความเร่งต่อผู้โดยสารทำให้รู้สึกสบายรวมไปถึงแรงกระทำต่อแนวรางซึ่งส่งผลต่อการบำรุงรักษา

คู่มือออกแบบฯฉบับนี้ระบุขั้นตอนทั่วไปสำหรับ

1. การออกแบบทางเรขาคณิตของแนวเส้นทางรถไฟ ซึ่งประกอบด้วย ขนาดทาง แนวทางเส้นตรง โค้งในแนวราบ การขยายขนาดทางบริเวณโค้ง ค่าการยกโค้ง โค้งเปลี่ยนผ่าน ความชัน และโค้งทางดิ่ง
2. การคำนวณเงื่อนไขที่ยอมให้ของแนวเส้นทางและการจำกัดความเร็วการเดินรถในระหว่างก่อสร้างหรือเปลี่ยนรางใหม่
3. การคำนวณความเร็วที่ยอมให้ของแนวเส้นทางเมื่อแนวเส้นทางนั้นมีสภาพเงื่อนไขต่ำกว่ามาตรฐานขั้นต่ำที่ถือว่าปลอดภัยสำหรับความเร็วที่ให้บริการของแนวเส้นทางนั้น

หลักการออกแบบวางแนวเส้นทางเพื่อให้รถไฟสามารถรักษาความเร็วสูงสุดสำหรับการเดินรถได้โดยที่มีความชันและความโค้งเท่าที่จำเป็น ตัวแปรที่ใช้เป็นข้อบังคับในการออกแบบเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบและวางแนวเส้นทางรถไฟ มขร S-T-003-256x ดังตารางที่ 3-1



ตารางที่ 3-1 ค่าตัวแปรสูงสูงสุดที่ยอมให้ในการออกแบบและวางแนวเส้นทางรถไฟตามมาตรฐาน มขร S-T-003-256x

ตัวแปร	หน่วย	ค่าที่ยอมให้					
		ขนาดทาง 1435 มม.			ขนาดทาง 1000 มม.		
		ค่าเป้าหมาย	max	min	ค่าเป้าหมาย	max	min
ตัวแปรทางเรขาคณิตในทางราบ							
รัศมีโค้งทั่วไป	ม.	1600		200	1,600-3000 (160 km/hr.) 900 (120 km/hr.)		
รัศมีโค้งบริเวณสถานี	ม.	ตรง		800	1000		
ค่าการยกโค้งจริง บนเส้นทางหลัก	มม.	110	130		90		
ค่าการยกโค้งจริง บริเวณสถานี	มม.	10	50		[2]Co = 5.559(Vm+5)2/R ≤90 mm [3]Co = 8.338x(0.8Vmax) 2/R ≤ 90 mm		
ส่วนขาดของการยกโค้ง บนเส้นทางหลัก	มม.	80	110		65	100	
ส่วนขาดของการยกโค้ง บริเวณสถานี	มม.	0	50		0		
ส่วนขาดของการยกโค้ง บริเวณประแจ	มม.	80	100		65		
ส่วนเกินของการยกโค้ง	มม.	0	70		0	70	
ความลาดชันของค่ายกโค้ง (Cant gradient)	1:x	1:1000	1:444	-	1:720		
อัตราการการยกโค้งจริง	มม./วิ	25	55				
อัตราการการยกโค้งขาด	มม./วิ	25	55				
การเบนทางราบ	องศา	0	1°50’	0	0	1°50’	



ตัวแปร	หน่วย	ค่าที่ยอมให้					
		ขนาดทาง 1435 มม.			ขนาดทาง 1000 มม.		
		ค่าเป้าหมาย	max	min	ค่าเป้าหมาย	max	min
ความยาวทางตรงระหว่างโค้ง	ม.	max (50 or V/2)	-	25	50 (V>120 km/hr.) 20 (V<120 km/hr.)		
ตัวแปรเรขาคณิตทางดิ่ง							
ความชัน (รวมการชดเชย)	%	1	2				
ความชัน บริเวณสถานี	%	0.5	2				
รัศมีโค้งดิ่ง โค้งคว่ำ	ม.			1300	10000 (160 km/hr.) 5000 (120 km/hr.)		
รัศมีโค้งดิ่ง โค้งหงาย	ม.			1300	10000 (160 km/hr.) 5000 (120 km/hr.)		
ความยาวโค้งดิ่ง	ม.			20			

[1] H = the height of the center of gravity of rolling stock, or 1700 mm

[2] Ballasted track (Vm=ความเร็วออกแบบสูงสุดในช่วงยกโค้ง)

[3] Ballastless Track

3.1.1 มาตรฐานและคู่มือที่เกี่ยวข้อง

- มขร S-T-001-256x มาตรฐานการแบ่งประเภททางรถไฟ
- มขร S-T-002-256x มาตรฐานเขตโครงสร้างทางรถไฟ
- มขร S-T-003-256x มาตรฐานการออกแบบและวางแนวเส้นทาง

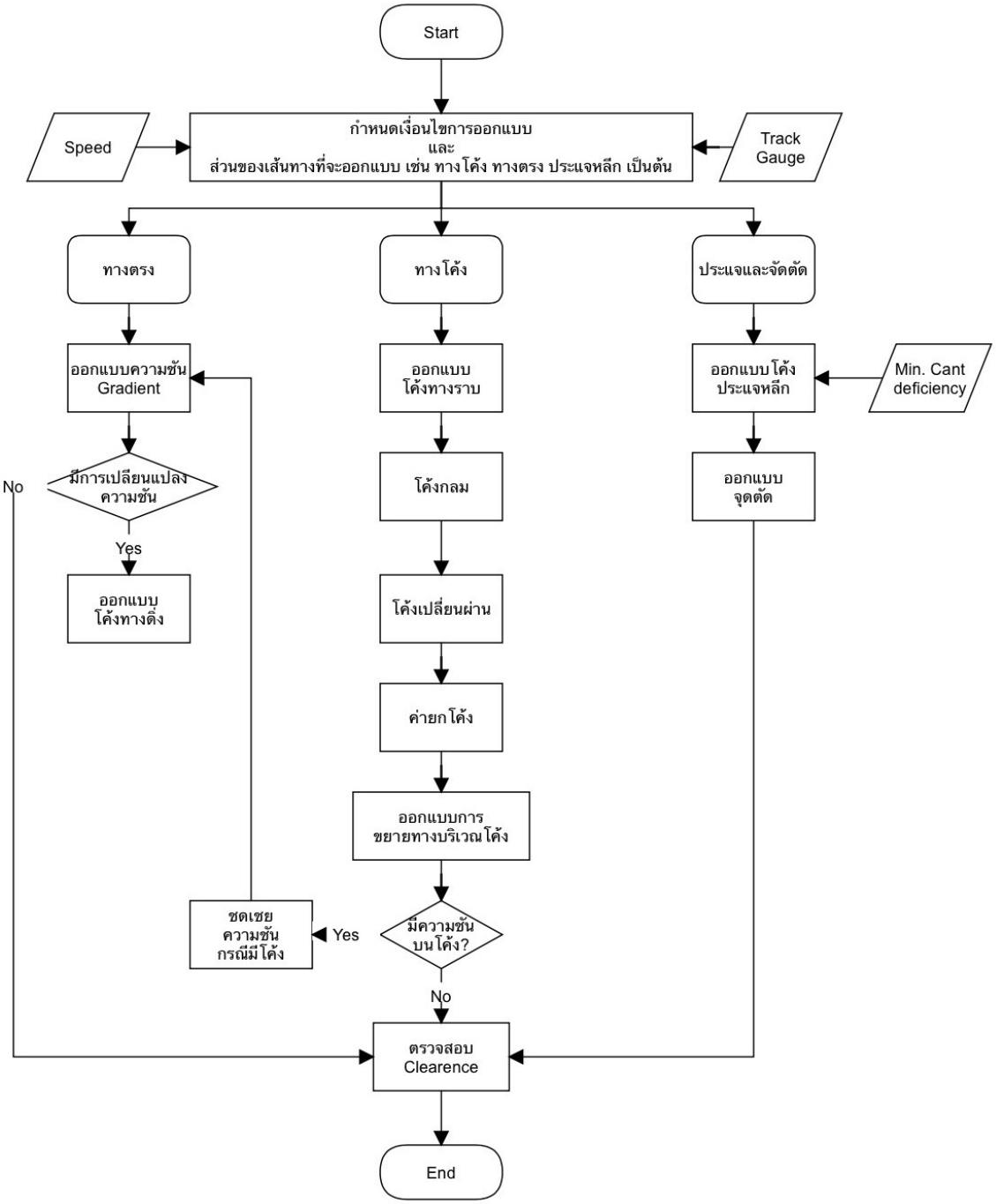


3.2 หลักการและวิธีการออกแบบและวางแนวเส้นทางรถไฟ

หลักการและวิธีการออกแบบและวางแนวเส้นทางรถไฟจะเริ่มตั้งแต่การกำหนดสมรรถนะที่ต้องการและข้อจำกัดของระบบ โดยประกอบไปด้วยปัจจัยหลักดังนี้

- ปัจจัยทางกายภาพ เช่น ความกว้างของทาง สภาพของภูมิประเทศ ขีดจำกัดการยกโค้ง การเอียงของราง เป็นต้น
- ปัจจัยจากตัวรถไฟ ประกอบไปด้วย น้ำหนักลงเพลา ความเร็วในการให้บริการ ความสามารถในการไต่ทางชัน ขีดจำกัดการยกโค้งส่วนขาด พฤติกรรมของช่วงล่างและปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง เป็นต้น

เมื่อมีข้อมูลของค่าสมรรถนะที่ต้องการและข้อจำกัดต่าง ๆแล้ว ในการออกแบบแนวเส้นทางจะประกอบด้วยการวางโค้งราบ โค้งเปลี่ยนผ่าน โค้งต่อเนื่อง การกำหนดรัศมีโค้งและการยกโค้งที่เหมาะสมกับความเร็ว โค้งดิ่ง รูปร่างและลักษณะทางกายภาพของประแจ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3-1 โดยในการก่อสร้างก็จะมีการสำรวจ การวางแนวเส้นทางไปตามภูมิประเทศ การตรวจวัดระดับและความเที่ยงตรงของแนวเส้นทาง โดยเมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วจะมีการตรวจสอบความผิดพลาดของแนวเส้นทางไม่ให้เกินค่าที่ยอมให้ (Construction tolerances)



รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการออกแบบและวางแนวเส้นทางรถไฟ

3.2.1 งานสำรวจและจัดทำพิกัด (Survey and Mapping)

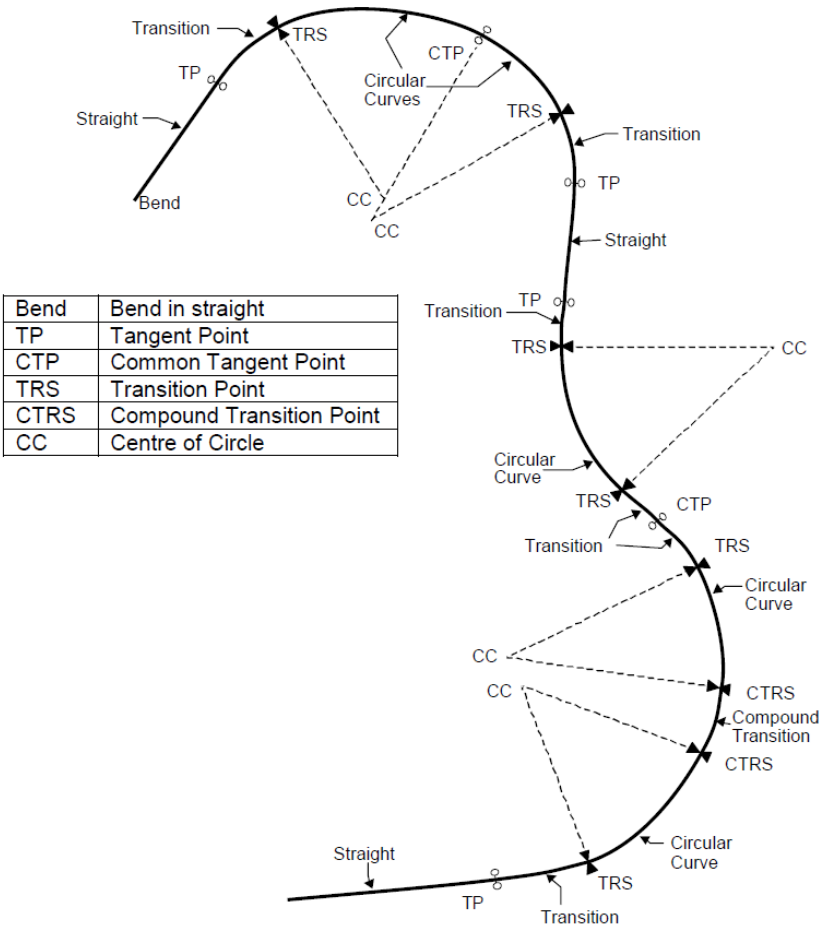
ระบบพิกัดที่ใช้ในงานสำรวจและจัดทำพิกัด ควรเป็นระบบ UTM การคำนวณเพื่อวางหมุดตามแนวเส้นทางทั่วไปให้คำนวณตำแหน่งวางหมุดไม่เกินระยะ 25 เมตร ความคลาดเคลื่อนของการสำรวจต้องไม่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการเดินรถ รวมไปถึงต้องทำให้ทางรถไฟมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินไปจากที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.4

3.2.2 การออกแบบเส้นทางรถไฟในทางราบ (Horizontal Profile)

องค์ประกอบของแนวเส้นทางในแนวราบที่ต้องออกแบบประกอบด้วย

- ทางตรง (Straight)
- โค้งกลม (Circular curve)
- โค้งเปลี่ยนผ่าน (Transition curve)
- โค้งเปลี่ยนผ่านผสม (Compound transition curve)

แสดงดังรูปที่ 3-2



Bend	Bend in straight
TP	Tangent Point
CTP	Common Tangent Point
TRS	Transition Point
CTRS	Compound Transition Point
CC	Centre of Circle

รูปที่ 3-2 องค์ประกอบของแนวเส้นทางรถไฟแนวราบ



แนวเส้นทางรถไฟทางตรง (Straight)

แนวเส้นทางรถไฟทางตรง คือแนวเส้นทางที่วางและวัดระหว่างจุดสัมผัสของเส้นโค้ง จุดและจุดตัดหรือจุดสิ้นสุดของเส้น โดยทั่วไปแล้วจะต้องออกแบบให้มีระดับของรางทั้งสองด้านเท่ากัน ยกเว้นในกรณีที่ไม่มีโค้งเปลี่ยนผ่านให้ออกแบบโดยยกโค้งครึ่งหนึ่งในทางตรงและอีกครึ่งหนึ่งบนโค้งราบ

โค้งราบและการยกโค้ง (Circular Curves and Cant)

- รัศมีโค้ง

รัศมีโค้งแสดงในหน่วยเมตร

- รัศมีโค้งต่ำสุดและสูงสุด

มีค่าสูงสุดและต่ำสุดเป็นไปตามข้อกำหนดใน มาตรฐาน มขร S-T-003-256x ข้อ 3.5.1

- ค่าสูงสุดที่ยอมให้ สำหรับ ค่าการยกโค้งจริง และ ส่วนขาดของการยกโค้ง

เป็นไปตามข้อกำหนดใน มาตรฐาน มขร S-T-003-256x ข้อ 3.5.1

- ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายกโค้ง ความเร็ว และรัศมีโค้ง

ในการออกแบบโค้งราบใช้สมการ ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายกโค้ง ความเร็ว และรัศมีโค้ง ดังนี้

$$R = \frac{C}{D_{EQ}} \cdot V^2$$ สมการที่ 3-1

$$D_{EQ} = D + I$$

$$C = \frac{W}{127}$$

โดยที่ R = รัศมีโค้ง (เมตร)

V= ความเร็วที่ใช้ออกแบบ

D_{EQ} = ค่าการยกโค้งสมดุล

D = ค่ายกโค้งจริง

I = ส่วนขาดของการยกโค้ง

W =ระยะระหว่างศูนย์กลางราง

C = 11.8 มม.•เมตร•ชั่วโมง.^{2}/กิโลเมตร.^{2} กรณี ขนาดทาง 1435 มม

C = 8.43 มม.•เมตร•ชั่วโมง.^{2}/กิโลเมตร.^{2} กรณี ขนาดทาง 1000 มม

ค่าสูงสุดและต่ำสุดของตัวแปรใน เป็นไปตามข้อกำหนดในสมการที่ 3-1 มาตรฐาน มขร S-T-003-256x ข้อ 3.5.1-3.5.4



การเบี่ยงเบนบนทางตรง (Bends)

- การเกิดการเบี่ยงเบน

เกิดจากการวางแนวทางตรงสองแนวที่มีมุมต่อใกล้เคียงกับ 180 องศา โดยไม่ต้องใช้โค้งราบคั่นกลาง ส่วนมากจะพบที่ส่วนปลายของสวิชท์ตรง แต่อาจเกิดจากการวางแนวคลาดเคลื่อนได้ด้วย ดังนั้น นอกเหนือจากส่วนปลายของสวิชท์ตรงแล้ว ควรหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการเบี่ยงเบนขึ้น

- ความเร็วสูงสุดที่ยอมให้ผ่านจุดที่มีการเบี่ยงเบน

ความเร็วสูงสุดผ่านจุดที่มีการเบี่ยงเบนสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3-2

$$V = 2.203\sqrt{\frac{I \times B}{A}}$$ สมการที่ 3-2

โดยที่ V= ความเร็วสูงสุดที่ยอมให้ผ่านจุดที่มีการเบี่ยงเบน

I = ส่วนขาดของการยกโค้ง

B =ระยะระหว่างศูนย์กลางตู้รถไฟ

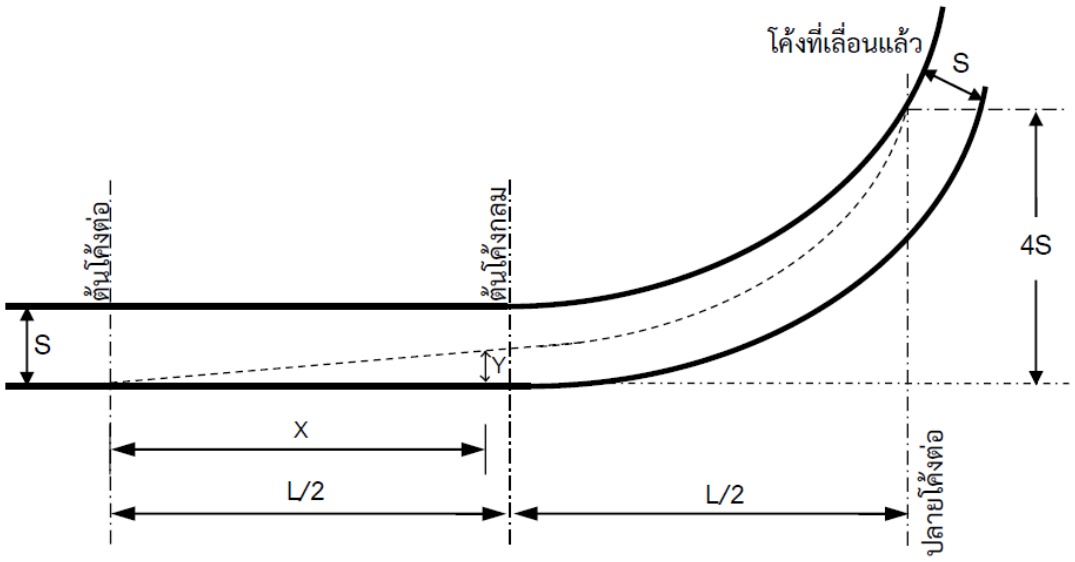
A = มุมเบี่ยงเบนระหว่างแนวเส้นตรงสองแนว

โค้งเปลี่ยนผ่าน (Transition Curves)

- โค้งเปลี่ยนผ่านมาตรฐาน

โค้งเปลี่ยนผ่านทั้งหมดต้องออกแบบตามรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งในสามรูปแบบ ตามมาตรฐาน มขร S-T-003-256x ข้อ 3.6 คือ Clothoid, Cubic Parabola หรือ Half Sine Spiral

เส้นศูนย์กลางของแนวเส้นทางบนเส้นโค้งที่แท้จริงจะถูกเคลื่อนไปตรงกลางของเส้นโค้งโดยการขยับแนวโค้งเดิมเข้าไปข้างในเป็นระยะ S (ดูรูปที่ 3-3)



รูปที่ 3-3 การขยับของแนวโค้งเมื่อใส่โค้งเปลี่ยนผ่านระหว่างเส้นตรงและโค้งราบ

การออกแบบโค้งเปลี่ยนผ่านโดยแบบ Clothoid สามารถคำนวณระยะราบและระยะค้ำเวอร์ไซด์โดยใช้สมการที่ 3-3

$$X = l \cdot \left[1 - \frac{l^4}{40R^2L^2} + \frac{l^8}{3456R^4L^4} - \ldots \right]$$ สมการที่ 3-3

$$Y = \frac{l^3}{6RL} \cdot \left[1 - \frac{l^4}{56R^2L^2} + \frac{l^8}{7040R^4L^4} - \ldots \right]$$

หรือ สำหรับ Cubic Parabola ใช้สมการที่ 3-4

$$Y = \frac{X^3}{6L_kR}$$ สมการที่ 3-4

หรือ สำหรับ Half Sine Spiral ใช้สมการที่ 3-5

$$Y = \frac{X^2}{R} \cdot \left[\frac{a^2}{4} - \frac{1}{2\pi^2} \{1 - \cos a\pi\} \right]$$ สมการที่ 3-5

โดย $a = \frac{x}{X}$ และ x เป็นระยะวัดตามแนวเส้นตรงต่อจากแนวเส้นสัมผัสจนถึง X ซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดโค้งเปลี่ยนผ่าน



ระยะขยับโค้งกลม ใช้สมการที่ 3-6

$$S = \frac{L_k^2}{24R}$$ สมการที่ 3-6

ในเมื่อ Y = ระยะค้ำจากเส้นตรง

X = ระยะจากจุดเริ่มของโค้งเปลี่ยนผ่าน โค้งเปลี่ยนผ่านนี้ครึ่งหนึ่งของความยาวให้วางในทางตรง และอีกครึ่งหนึ่งอยู่ในทางโค้งโดยที่ตรงกลางโค้งต่อนั้นจะอยู่ใกล้กับจุดสัมผัสของโค้งเดิม

S = ระยะขยับโค้งกลม

L_k = ความยาวโค้งเปลี่ยนผ่านวัดตามแนวเส้นตรงต่อจากเส้นสัมผัส

R = รัศมีของโค้ง

ความยาวของโค้งเปลี่ยนผ่านสามารถคำนวณได้จาก มาตรฐาน มขร S-T-003 ข้อ 3.6.1

- โค้งเปลี่ยนผ่านที่ถูกจำกัดความยาว

ในบางกรณีไม่สามารถใช้ความยาวของโค้งเปลี่ยนผ่านปกติตามที่กล่าวข้างต้นได้ สามารถลดความยาวโค้งเปลี่ยนผ่านโดยใช้ ขีดจำกัดพิเศษ ตามมาตรฐาน มขร S-T-003 ข้อ 3.5.2 แล้วคำนวณความยาวโค้งตามมาตรฐาน มขร S-T-003 ข้อ 3.6.1

<u>โค้งต่อเนื่อง (Compound Curves)</u>

ในโค้งต่อเนื่อง โค้งเปลี่ยนผ่านที่อยู่ระหว่างโค้งราบที่มีรัศมีแตกต่างกัน ควรใช้เกณฑ์เช่นเดียวกับโค้งอย่างง่าย โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

- การคำนวณเกี่ยวกับการยกโค้งใช้ค่าส่วนต่างของค่ายกโค้ง จากโค้งราบที่มีรัศมีต่างกันทั้งสองรัศมี
- การคำนวณเกี่ยวกับส่วนขาดของการยกโค้งใช้ค่าส่วนต่างของส่วนขาดของการยกโค้ง จากโค้งราบที่มีรัศมีต่างกันทั้งสองรัศมี
- ค่าการยกโค้งและความเร็วในโค้งกลมควรคำนวณแยกกันในแต่ละโค้ง
- ความยาวของโค้งเปลี่ยนผ่านที่อยู่ระหว่างโค้งกลมสามารถพิสูจน์โดยหลักการเดียวกับความยาวของโค้งเปลี่ยนผ่านสามารถคำนวณได้จาก มาตรฐาน มขร S-T-003 ข้อ 3.6.1 คือ



สมการที่ 3-7

$$L_D \geq \Delta D \cdot \left(\frac{dD}{ds} \right)^{-1}_{\lim}$$

$$L_D \geq \frac{V}{q_v} \cdot \Delta D \cdot \left(\frac{dD}{dt} \right)^{-1}_{\lim}$$

$$L_K \geq \frac{V}{q_v} \cdot \Delta I \cdot \left(\frac{dI}{dt} \right)^{-1}_{\lim}$$

ในกรณีนี้ ΔD และ ΔI เป็นส่วนต่างของค่ายกโค้งและส่วนต่างของส่วนขาดของการยกโค้ง จากโค้งราบที่มีรัศมีต่างกันทั้งสองรัศมี

โค้งกลับทิศ (Reverse curves)

ในโค้งกลับทิศ โค้งเปลี่ยนผ่านที่อยู่ระหว่างโค้งราบที่มีรัศมีแตกต่างกัน ควรใช้เกณฑ์เช่นเดียวกับโค้งอย่างง่าย โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

- การคำนวณเกี่ยวกับการยกโค้งใช้ค่าผลรวมของค่ายกโค้ง จากโค้งราบที่มีรัศมีต่างกันทั้งสองรัศมี
- การคำนวณเกี่ยวกับส่วนขาดของการยกโค้งใช้ค่าผลรวมของส่วนขาดของการยกโค้ง จากโค้งราบที่มีรัศมีต่างกันทั้งสองรัศมี
- ค่าการยกโค้งและความเร็วในโค้งกลมควรคำนวณแยกกันในแต่ละโค้ง
- ความยาวของโค้งเปลี่ยนผ่านที่อยู่ระหว่างโค้งกลมสามารถพิสูจน์โดยหลักการเดียวกับความยาวของโค้งเปลี่ยนผ่านสามารถคำนวณได้จาก มาตรฐาน มขร S-T-003 ข้อ 3.6.1 ในสมการที่ 3-7

โค้งประแจ (Turnout Curves)

การคำนวณ ตัวแปรของโค้งบริเวณประแจหลีก เช่น รัศมีโค้ง ความเร็ว ฯลฯ ให้ยึดขีดจำกัดการยกโค้งขาด มาตรฐาน มขร S-T-003 ข้อ 3.5.1 และ 3.5.2 โดยค่ายกโค้งจริงปกติจะเท่ากับ 0 ส่วนขาดของการยกโค้งบริเวณประแจเป็นไปตามตารางที่ 3-1



3.3 การออกแบบเส้นทางรถไฟทางดิ่ง (Vertical Profile)

3.3.1 ความชันของทาง (Gradient)

ควรให้ค่าความชั้นของแนวเส้นทางเป็น % ความชันของเส้นทางรถไฟใช้ตามมาตรฐาน มาตรฐาน มขร S-T-003 ข้อ 3.9.1

- บริเวณสถานีรถไฟ ความชันสูงสุด ไม่เกิน 0.1%
- ขีดจำกัดปกติ สำหรับความชันของเส้นทางรถไฟ ไม่เกิน 2%
- ขีดจำกัดพิเศษ สำหรับความชันของเส้นทางรถไฟ ไม่เกิน 4% ความชันของเส้นทางรถไฟควรน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

3.3.2 การชดเชยความชัน (Grade Compensation)

ผลของโค้งบนทางรถไฟที่มีความชันส่งผลให้แรงต้าน เนื่องจากความชันนั้นมากยิ่งขึ้น ในการชดเชยความชันที่เพิ่มขึ้นมานั้น ต้องปรับความชั้นบริเวณโค้งให้ราบลง เพื่อไม่ให้แรงต้านจากความชันตามแนวโค้งเกินค่าแรงต้านของความชันในทางตรง

สำหรับเส้นทางที่ก่อสร้างใหม่สามารถปรับชดเชยความชันได้โดย

- ชดเชย [100/R]% สำหรับเส้นโค้งที่ไม่หล่อลื่น และ
- ชดเชย [50/R]% สำหรับเส้นโค้งที่หล่อลื่น
- โดยที่ R คือรัศมีของ**เส้นโค้งราบ**เป็นเมตร

สำหรับเส้นทางที่ก่อสร้างในแนวเดิม สามารถคำนวณความชันเทียบเท่าบนเส้นโค้งที่ไม่ได้ชดเชยความชันจากความชันจริง โดยหลักการเดียวกัน

- เพิ่มขึ้น [100/R]% สำหรับเส้นโค้งที่ไม่หล่อลื่น และ
- เพิ่มขึ้น [50/R]% สำหรับเส้นโค้งที่หล่อลื่น
- โดยที่ R คือรัศมีของ**เส้นโค้งราบ**เป็นเมตร

3.3.3 โค้งดิ่ง (Vertical Curve)

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชัน โค้งดิ่งควรนำมาใช้เชื่อมระหว่างความชันที่แตกต่างกันในรูปแบบของพาราโบลิก โดยความสัมพันธ์ของรัศมีโค้งดิ่ง ความเร่งทางดิ่ง และความเร็ว มีความสัมพันธ์ ตามสมการที่ 3-8 และรูปที่ 3-4

$$R_v = q_R \cdot V^2$$ สมการที่ 3-8

โดย R_v คือ รัศมีโค้งดิ่ง

q_R คือ ความเร่ง (เมตร-ชั่วโมง^2/กิโลเมตร^2)

V คือ ความเร็วของรถไฟ

ข้อจำกัดของตัวแปรข้างต้นเป็นไปตามมาตรฐาน มาตรฐาน มขร S-T-003 ข้อ 3.9.4

และความยาวของโค้งดิ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3-9 และรูปที่ 3-4

$$L = K(a+b)$$ สมการที่ 3-9

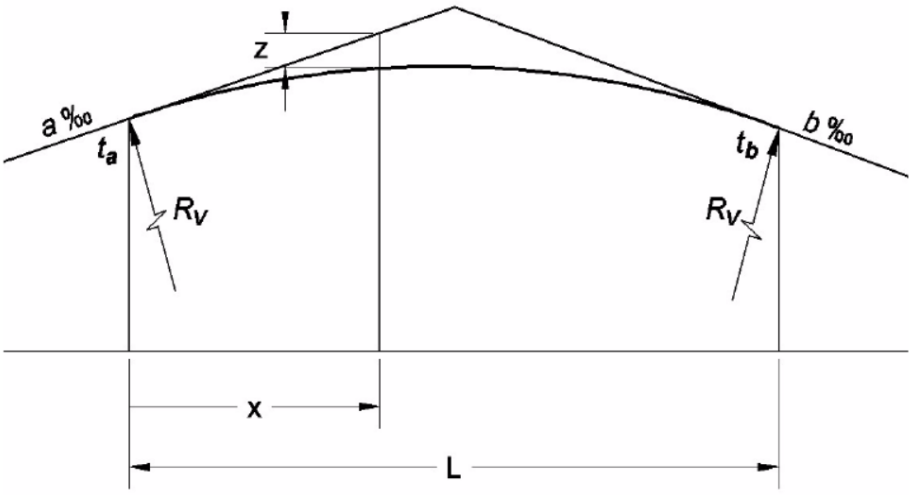
โดย L คือ ความยาวโค้งดิ่ง

K คือ ค่าคงที่

มีค่าเท่ากับ 75 สำหรับโค้งคว่ำ และ 100 สำหรับโค้งหงายที่ก่อสร้างในแนวเส้นทางเดิม

มีค่าเท่ากับ 200 สำหรับโค้งคว่ำและโค้งหงายในแนวเส้นทางที่ก่อสร้างใหม่

มีค่าเท่ากับ 10 บนเส้นทางที่มีความเร็วต่ำกว่า 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 3-4 ลักษณะของโค้งดิ่งและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง



3.4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของแนวเส้นทางรถไฟ (Track Alignment Tolerances)

แนวทางรถไฟจะต้องดำเนินการก่อสร้างให้เป็นไปตามเกณฑ์ความคาดเคลื่อนที่ระบุไว้ในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของทางรถไฟสำหรับการเปลี่ยนรางและการวางรางใหม่ (รวมถึงประแจและทางตัด)

ตัวแปร	ประเภททางรถไฟ				
	I	II	III	IV	V
	ช่วงความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)				
	V≤80	80<V≤120	120<V≤160	160<V≤230	230<V≤360
ขนาดทางทั่วไป (มิลลิเมตร) (แปรปรวนเทียบกับค่าที่ออกแบบ)	+4/-3	+4/-3	+4/-2	+4/-2	+3/-2
ขนาดทางสำหรับประแจและทางตัด (มิลลิเมตร) (แปรปรวนเทียบกับค่าที่ออกแบบ)	+4/-3	+4/-3	+4/-3	+4/-3	+4/-3
ระดับตามขวาง (มิลลิเมตร) (แปรปรวนเทียบกับค่าที่ออกแบบ)	±3	±3	±3	±2	±2
ความคลาดเคลื่อนทางดิ่งตามแนวเส้นคอร์ดขนาด 10เมตร (มิลลิเมตร) (วัดจากค่าเฉลี่ยถึงจุดสูงสุด)	±6	±4	±4	±3	±3
ความคลาดเคลื่อนทางดิ่ง D1 ตามแนวเส้นทาง (มิลลิเมตร) (วัดจากค่าเฉลี่ยถึงจุดสูงสุด)	±4	±3	±3	±2	±2
ความคลาดเคลื่อนทางดิ่ง D2 ตามแนวเส้นทาง (มิลลิเมตร) (วัดจากค่าเฉลี่ยถึงจุดสูงสุด)	N/A	N/A	N/A	±3	±2



ตารางที่ 3-2 (ต่อ) เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของทางรถไฟสำหรับการเปลี่ยนรางและการวางรางใหม่ (รวมถึงประแจและทางตัด)

ตัวแปร	ประเภททางรถไฟ				
	I	II	III	IV	V
	ช่วงความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)				
	V≤80	80<V≤120	120<V≤160	160<V≤230	230<V≤360
ความคลาดเคลื่อนทางดิ่ง D3 ตามแนวเส้นทาง (มิลลิเมตร) (วัดจากค่าเฉลี่ยถึงจุดสูงสุด)	N/A	N/A	N/A	N/A	Reserved
ความคลาดเคลื่อนทางราบตามแนวเส้นคอร์ดขนาด 10เมตร (มิลลิเมตร) (วัดจากค่าเฉลี่ยถึงจุดสูงสุด)	±5	±3	±3	±3	±3
ความคลาดเคลื่อนทางราบ D1 ตามแนวเส้นทาง (มิลลิเมตร) (วัดจากค่าเฉลี่ยถึงจุดสูงสุด)	±4	±2	±2	±2	±2
ความคลาดเคลื่อนทางราบ D2 ตามแนวเส้นทาง (มิลลิเมตร) (วัดจากค่าเฉลี่ยถึงจุดสูงสุด)	N/A	N/A	N/A	±3	±2
ความคลาดเคลื่อนทางราบ D3 ตามแนวเส้นทาง (มิลลิเมตร) (วัดจากค่าเฉลี่ยถึงจุดสูงสุด)	N/A	N/A	N/A	N/A	Reserved
การบิดในช่วง 3เมตร (แปรปรวนเทียบกับค่าที่ออกแบบและจุดสูงสุด)	±4.5	±3	±3	±3	±3

– **หมายเหตุ: ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ ของ รฟม. รฟท. และมาตรฐานอินเดีย แสดงไว้ในภาคผนวก ค**

– **D1 D2 และ D3 คือช่วงความยาวคลื่นของความขรุขระบนทางรถไฟ โดย**

  - **D1 คือ ช่วงที่มีความยาวคลื่น 3 เมตร ถึง 25 เมตร**
  - **D2 คือ ช่วงที่มีความยาวคลื่น 25 เมตร ถึง 75 เมตร**
  - **D3 คือ ช่วงที่มีความยาวคลื่น 75 เมตร ถึง 300 เมตร โดยจะถูกพิจารณาเมื่อมีการให้บริการที่ความเร็วสูงกว่า 250 กิโลเมตร/ชั่วโมง**



บทที่ 4 การออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง

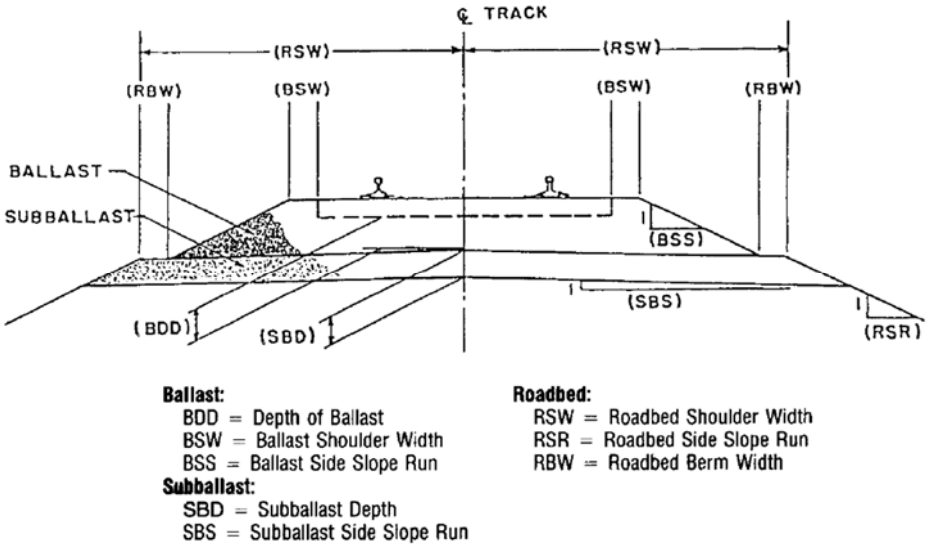
4.1 ทั่วไป

คู่มือฉบับนี้ใช้ประกอบมาตรฐาน มขร S-T-004-256x สำหรับออกแบบและวางแผนการก่อสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง คู่มือนี้อธิบายหลักการสำคัญตลอดจนวิธีการออกแบบโครงสร้างส่วนล่างของทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง ประกอบไปด้วย ชั้นหินโรยทาง ชั้นรองหินโรยทาง และ ชั้นดินพื้นทาง ส่วนสำคัญสำหรับการออกแบบได้แก่ การระบุความหนาของชั้นโครงสร้างทางส่วนต่าง ๆ รูปตัดของทาง คู่มือฉบับนี้ยังได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับเทคนิค และ ข้อปฏิบัติสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างส่วนล่างของทางรถไฟแบบมีหินโรยอีกด้วย มาตรฐาน มขร S-T-004-256x

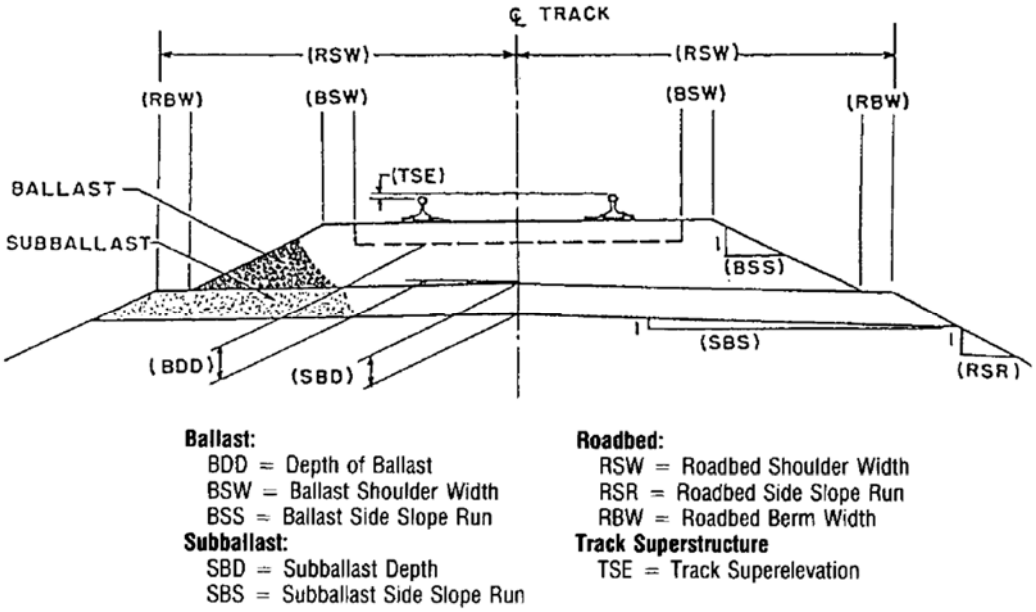
4.2 การออกแบบโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง (ชั้นหินอนุภาค)

4.2.1 คำนิยาม

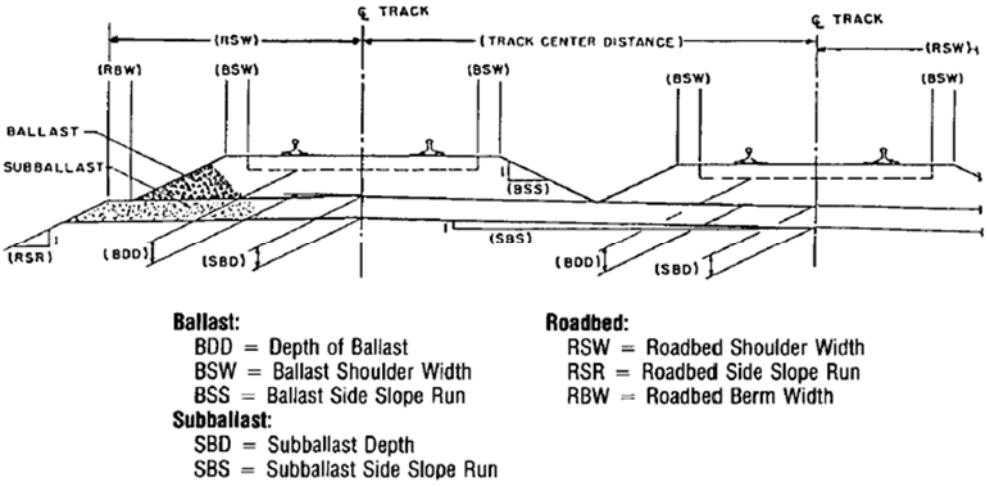
- โครงสร้างส่วนบนของทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง ส่วนของทางรถไฟที่ประกอบไปด้วย ราง แผ่นรองราง เครื่องยึดเหนี่ยวราง และ หมอนรองรางรถไฟ
- โครงสร้างส่วนล่างของทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง ส่วนประกอบของทางที่ต่ำกว่าหมอนรองรางลงมา หน้าที่หลักของโครงสร้างส่วนล่าง คือ รองรับและให้การยึดตัวโครงสร้างส่วนบนของทาง กระจายน้ำหนักจากการจราจรจากโครงสร้างส่วนบนลงไปยังชั้นดินพื้นทาง ระบายน้ำในชั้นโครงสร้างทาง ป้องกันชั้นดินพื้นทางจากสภาพธรรมชาติ ช่วยให้การปรับแก้ทางทำได้ง่ายโดยไม่ต้องรื้อและก่อสร้างทางใหม่
- ชั้นหินโรยทาง ชั้นบนสุดของโครงสร้างทางส่วนล่างก่อสร้างจากหินอนุภาคบดอัด มีช่องว่างระหว่างอนุภาคหิน ทำให้ระบายน้ำได้ดี
- ชั้นหินโรยทาง ชั้นรองของโครงสร้างทางส่วนล่าง อยู่ใต้ชั้นหินโรยทาง และ บนชั้นดินพื้นทาง ก่อสร้างจากหินและดินอนุภาคบดอัด ทำหน้าที่แบ่งแยกและป้องกันไม่ให้ชั้นหินโรยทางแทรกตัวจมลงไปในพื้นทาง
- ชั้นหินอนุภาค ชั้นของโครงสร้างทางรวมชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทางเข้าไว้ด้วยกัน
- พื้นทาง เป็นส่วนล่างสุดของโครงสร้างทาง รองรับทางรถไฟ พื้นทางอาจจะเป็นดิน หรือ หินก็ได้
- ลักษณะรูปตัดของทางรถไฟแบบมีหินโรยทางแสดงในรูปที่ 4-1 ถึง รูปที่ 4-4



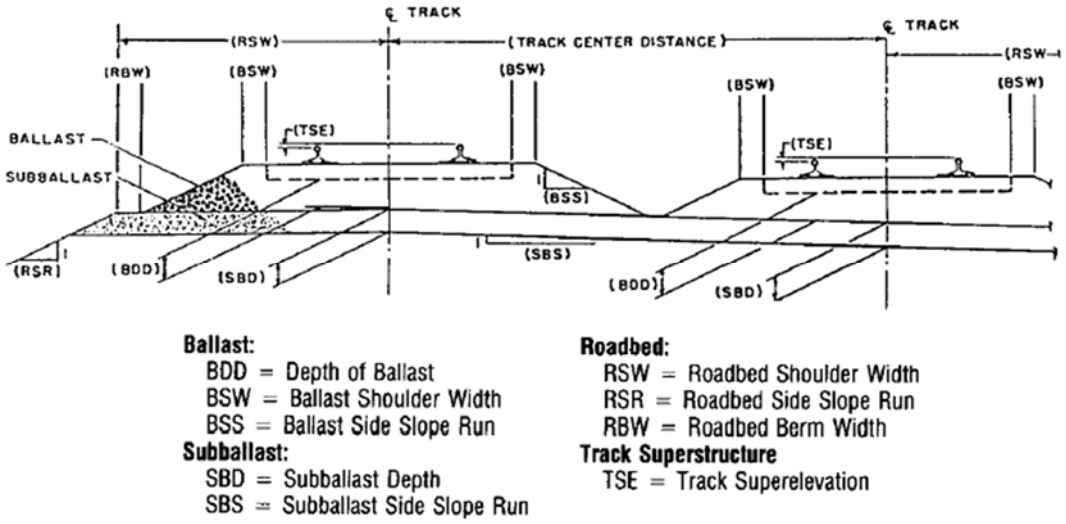
รูปที่ 4-1 รูปตัดปกติของทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง



รูปที่ 4-2 รูปตัดของทางรถไฟแบบมีหินโรยทางแบบทางเดี่ยวมีการยกโค้ง



รูปที่ 4-3 รูปตัดของทางรถไฟแบบมีหินโรยทางแบบหลายทาง



รูปที่ 4-4 รูปตัดของทางรถไฟแบบมีหินโรยทางแบบหลายทางและมีการยกโค้ง

4.2.2 ตัวแปรสำหรับการออกแบบ

ตัวแปรสำหรับออกแบบ ขนาด และ มิติ ของหน้าตัดทางรถไฟแบบมีหินโรยแสดงในรูปที่ 4-1

- ชั้นหินโรยทาง

  BDD ความหนาของชั้นหินโรยทาง

  BSW ระยะคลุมหัวหมอน

  BSS ความเอียงด้านข้างของชั้นหินโรยทาง



- ชั้นรองหินโรยทาง

  SBD ความหนาของชั้นรองหินโรยทาง

  SBS ความเอียงของชั้นรองหินโรยทาง

- ชั้นพื้นทาง

  RSW ความกว้างชั้นพื้นทาง

  RSR ความเอียงด้านข้างของดันทางหรือชั้นพื้นทาง

  RBW ความกว้างไหล่ทางของชั้นพื้นทาง

4.2.3 ขนาด และ มิติ ของหน้าตัดโครงสร้างทางส่วนล่าง

ความหนาของชั้นอนุภาค (BDD+SBD)

ความหนาของชั้นอนุภาค คือผลรวมของความหนาชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทาง

ชั้นหินโรยทาง

- ความหนาของชั้นหินโรยทาง

ชั้นหินโรยทางเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างทางส่วนล่างที่วางตัวอยู่ชั้นบนสุด ชั้นหินโรยทางควรก่อสร้างจากวัสดุที่เป็นไปตามข้อกำหนดในส่วนที่ 4 ของ มาตรฐาน มขร S-T-004

สำหรับทางเดี่ยว ความหนาของชั้นหินโรยทาง (BDD) วัดจากจุดสูงสุดของชั้นรองหินโรยทางจนไปถึงพื้นหมอนรองรางที่แนวกึ่งกลางของทางเมื่อทางอยู่ในแนวราบ หรือ วัดจากพื้นหมอนใต้รางที่อยู่ต่ำกว่าจนถึงส่วนบนสุดของชั้นรองหินโรยทางในกรณีที่ทางมีการยกโค้ง

ในกรณีที่ทางมีหลายช่องจราจร ความหนาของชั้นหินโรยทางวัดจากจุดสูงสุดของชั้นรองหินโรยทางจนไปถึงพื้นหมอนบริเวณใต้รางที่อยู่ประชิด (ด้านขอบทาง) กับจุดสูงสุดของชั้นรองหินโรยทาง หรือ วัดจากพื้นหมอนใต้รางที่อยู่ต่ำกว่าจนถึงส่วนบนสุดของชั้นรองหินโรยทางในกรณีที่ทางมีการยกโค้ง กำหนดให้ความหนาของชั้นหินโรยทางมีค่าอย่างน้อย 25 เซนติเมตร สำหรับทางกว้าง 1 เมตร

- ระยะคลุมหัวหมอน

การกำหนดระยะคลุมหัวหมอน (BSW) ด้วยหินโรยทางให้เป็นไปตามข้อกำหนดในส่วนที่ 2.4 ของคู่มือฉบับนี้ ระยะคลุมหัวหมอนวัดจากปลายขอบของหมอนรองรางไปจนถึงจุดเริ่มต้นของลาดด้านข้างของชั้นหินโรยทาง กำหนดให้ระดับขอบบนของหมอนรองรางเป็นระดับเดียวกันกับจุดเริ่มต้นของลาดด้านข้างของชั้นหินโรยทาง การวัดระยะคลุมหัวหมอนให้วัดที่ระดับขอบบนของหมอนรองรางที่ติดตั้งแล้ว แนะนำให้ระยะคลุมหัวหมอนมีค่าอย่างน้อย 40 เซนติเมตร สำหรับทางกว้าง 1 เมตรที่รางต่อกันด้วยวิธีการเชื่อมยาวต่อเนื่อง



- ความลาดเอียงด้านข้างของชั้นหินโรยทาง

ความลาดเอียงด้านข้างของชั้นหินโรยทาง (BSS) พึงออกแบบเพื่อให้มีให้แรงดันด้านข้างเพียงพอที่จะพยุงชั้นหินโรยทางเองที่ และ ทำหน้าที่กระจายน้ำหนักจากการจราจรลงไปสู่ชั้นรองหินโรยทางได้ โดยชั้นหินโรยทางไม่ขยายตัวออกด้านข้างด้วยอัตราที่เร็วเกินไป

ระยะทางราบของความเอียงด้านข้างของชั้นหินโรยทางวัดตามระดับขอบบนของหมอนรองรางที่ติดตั้งแล้วไปในแนวราบ ในขณะที่ระยะในแนวดิ่งของความเอียงด้านข้างวัดตั้งฉากกับระยะในแนวราบดังกล่าว โดยปกติแนะนำให้ใช้ความเอียงด้านข้างของชั้นหินโรยทางเป็น 1.125 (ในแนวราบ) ต่อ 1 (ในแนวดิ่ง)

<u>ชั้นรองหินโรยทาง</u>

- ความหนาของชั้นรองหินโรยทาง

ชั้นรองหินโรยทางเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างทางส่วนล่างที่วางตัวอยู่ชั้นต่ำสุด กล่าวคืออยู่ใต้ชั้นหินโรยทาง ชั้นรองหินโรยทางควรก่อสร้างจากวัสดุที่เป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน มขร S-T-004

ความหนาของชั้นรองหินโรยทาง (SBD) วัดจากระดับของพื้นทางขึ้นไป ความหนาของชั้นรองหินโรยทางที่ใช้กันโดยทั่วไปอยู่ที่ 30 เซนติเมตร สำหรับทางกว้าง 1 เมตร อย่างไรก็ตามระหว่างการก่อสร้างต้องบดอัดวัสดุรองหินโรยทางให้เป็นชั้นมีความหนาอย่างน้อย 15 ซม. ทั้งนี้เพื่อให้มีกำลังเพียงพอสำหรับทำหน้าที่เป็นตัวแยกหินโรยทางออกจากดินพื้นทางและป้องกันมิให้ชั้นหินโรยทางและพื้นทางเสื่อมสภาพ

- ความเอียงของชั้นรองหินโรยทาง

ความเอียงของชั้นรองหินโรยทาง (SBS) พึงออกแบบเพื่อให้สามารถระบายน้ำที่ไหลลงมาจากชั้นหินโรยทางให้ไหลออกทางด้านข้างของทางเพื่อไปยังร่องระบายน้ำ แนะนำให้ความเอียงของชั้นรองหินโรยทางมีค่าไม่มากกว่า 25 (แนวราบ) ต่อ 1 (แนวดิ่ง) แต่ไม่น้อยกว่า 40 (แนวราบ) ต่อ 1 (แนวดิ่ง) สำหรับทางกว้างขนาด 1 เมตร วิศวกรสามารถพิจารณาเลือกใช้ความเอียงที่น้อยกว่าหากดินมีความทึบน้ำที่มากกว่า (สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินต่ำ)

<u>ดินพื้นทาง</u>

ความกว้างของคันทาง (RSW) ความเอียงด้านข้าง (RSR) ความกว้างไหล่ทางของชั้นพื้นทาง (RSW) ให้พิจารณาออกแบบให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน มขร S-T-004 และข้อที่ 4.3 ของคู่มือฉบับนี้

4.2.4 การวิเคราะห์สำหรับการออกแบบชั้นหินอนุภาค

<u>ค่าการกระแทก</u>

วิศวกรสามารถคำนวณน้ำหนักล้อพลวัต (P_d ขณะรถไฟเคลื่อนที่) สำหรับการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยจากน้ำหนักล้อสถิตย์ (P_s ไม่มีการเคลื่อนที่ของรถไฟ) จากสมการ

$$P_d = \emptyset P_s$$



เมื่อ $\emptyset$ คือค่าการกระแทก (Impact factor) น้ำหนักล้อสำหรับออกแบบได้พิจารณาความเป็นพลวัตแรงกระทำอยู่ในการคำนวณแล้วผ่านตัวแปร $\emptyset$ ค่าของตัวแปร $\emptyset$ แปรเปลี่ยนตามปัจจัยหลายชนิด ได้แก่ ความเร็วรถ น้ำหนักรถ ความแข็งเกร็งของระบบกันสะเทือนของรถ คุณภาพหรือสภาพทางรถไฟ ได้มีการเสนอสูตรสำหรับคำนวณค่าการกระแทกไว้หลากหลาย ตัวอย่างสูตรการคำนวณที่ใช้กันโดยทั่วไปแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 สูตรคำนวณค่าการกระแทก

วิธี	สูตร	ข้อพิจารณา
AREA Formula	$\emptyset = 1 + 0.0052\frac{V}{D}$	พัฒนาจากผลการวัดน้ำหนักในสนามบนทางมาตรฐานกว้าง 1.435 ม.
South African (Lombard' s) Formula	$\phi = 1 + 0.0049\frac{V}{D}$	พัฒนาจากผลการวัดน้ำหนักในสนามบนทางกว้าง 1.067 ม.
Indian (Agarwal's) Formula	$\phi = 1 + \frac{V}{58.14k^{0.5}}$	พัฒนาจากผลการวัดน้ำหนักในสนามบนทางมาตรฐานกว้าง 1.435 ม.

ในสมการดังกล่าว ความเร็วรถ V มีหน่วยเป็น กิโลเมตร ต่อ ชั่วโมง เส้นผ่าศูนย์กลางล้อ D มีหน่วยเป็น เมตร และโมดูลัสของทาง k มีหน่วยเป็น MPa

<u>แรงที่ผิวสัมผัสระหว่างรางกับหมอนรองรางที่มากที่สุด</u>

เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่พิจารณา น้ำหนักกดเพลาจะกระจายตัวในโครงสร้างทางส่วนบน กล่าวคือ แรงกระทำบนรางกระจายตัวต่อลงไปยังหมอนรองราง วิศวกรสามารถประมาณแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างราง (ผ่านแผ่นรองราง) และหมอนรองรางซึ่งมากที่สุด ($q_{r\,max}$) ได้จากน้ำหนักล้อพลวัต P_d ออกแบบ ได้มีการเสนอสูตรสำหรับคำนวณค่า $q_{r\,max}$ ไว้หลากหลาย ตัวอย่างสูตรการคำนวณที่ใช้กันโดยทั่วไปแสดงในตารางที่ 4-2



ตารางที่ 4-2 สูตรคำนวณแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างรางกับหมอนรองราง $q_{r\,max}$

วิธี	สูตร	ข้อพิจารณา
Beam on Elastic Foundation (BOEF) Formula	$q_{r\,max} = \frac{1}{2} s_s \left(\frac{k}{4EI_{xx}}\right)^{0.25} P_d$	พัฒนาจากทฤษฎีอีลาสติก โดยสมมติให้ราง หมอนรองราง และชั้นโครงสร้างทางส่วนล่างเป็นวัสดุอีลาสติก
AREA Formula	$q_{r\,max} = D_f \times P_d$	พัฒนาจากทฤษฎีอีลาสติก โดยสมมติให้ราง หมอนรองราง และชั้นโครงสร้างทางส่วนล่างเป็นวัสดุอีลาสติก
ORE Formula	$q_{r\,max} = \bar{\varepsilon} \times c_1 \times P_d$	เป็นวิธีเชิงประจักษ์ พัฒนาจากผลการวัดแรงในสนามกับบริบทการเดินรถ และ องค์ประกอบทางที่ใช้งานโดยทั่วไปที่ประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส และ เยอรมันนี ปกติกำหนดให้ c_1 เท่ากับ 135 และค่า $\bar{\varepsilon}$ แสดงในตารางที่ 4-4
Three Adjacent Tie Formula	$q_{r\,max} = 0.5 P_d$	เป็นวิธีเชิงตรรกะสมมติให้หมอนรองรางสามตัวรับน้ำหนักจากล้อ โดยแรงมากที่สุดเกิดขึ้นกระทำบนหมอนตัวกลางเมื่อล้ออยู่บนตำแหน่งของหมอนตัวดังกล่าวพอดี แรงที่เกิดขึ้นบนหมอนรองรางด้านข้างสองตัวจะเป็นกึ่งหนึ่งของแรงที่หมอนตัวกลาง

จากสูตรในตารางที่ 4-2 s_s คือระยะระหว่างกึ่งกลางหมอนถึงหมอน (เมตร) E คือ โมดูลัสของยังของวัสดุรางเหล็ก (MPa) I_{xx} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของราง (เมตร^4)

ตารางที่ 4-3 ค่า D_f สำหรับคำนวณแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างรางกับหมอนรองราง $q_{r\,max}$ ด้วยวิธี AREA

ค่า D_f	ข้อพิจารณา
$D_f = 0.40 + 5.77 \times 10^{-2} s_s$	ใช้กับหมอนไม้
$D_f = 0.33 + 6.73 \times 10^{-2} s_s$	ใช้กับหมอนเหล็ก
$D_f = 0.45 + 5.77 \times 10^{-2} s_s$	ใช้กับหมอนคอนกรีต



ตารางที่ 4-4 ค่า $\bar{\varepsilon}$ สำหรับคำนวณแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างรางกับหมอนรองราง $q_{r\,max}$ ด้วยวิธี ORE

Sleeper Type	Sleeper Dimensions length×width×rail seat	Sleeper Spacing (mm)	Area of Sleeper Support	Q (mm)	$\bar{\varepsilon}$
French, type VW Prestressed	2300 × 250 × 140	600	200	400	0.58
British, type F Prestressed Concrete	2515 × 264 × 200	760	269	510	0.40
German, type 58 Prestressed Concrete	2400 × 280 × 190	600	252	450	0.38
French, Hardwood	2600 × 255 × 135	600	281	550	0.61

<u>หน่วยแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างหมอนรองรางกับหินโรยทาง</u>

แรงที่กระทำต่อหมอนจะส่งถ่ายต่อไปยังหินโรยทางเกิดเป็นหน่วยแรงขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหมอนรองรางและหินโรยทาง (P_b) หน่วยแรงในแนวดิ่งในหินโรยทางจะลดลงตามความลึกในชั้นหินโรยทาง หน่วยแรงที่ผิวสัมผัสกับหมอนรองรางไม่ควรเกิน 450 kPa เพื่อป้องกันการแตกหักหรือสึกของหินโรยทางที่มากเกินไป ได้มีการเสนอสูตรสำหรับคำนวณค่า P_b ไว้หลากหลาย ตัวอย่างสูตรการคำนวณที่ใช้กันโดยทั่วไปแสดงในตารางที่ 4-5



ตารางที่ 4-5 สูตรคำนวณหน่วยแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างหมอนรองรางกับหินโรยทาง P_b

วิธี	สูตร	ข้อพิจารณา
Clarke's Method (Simplified)	$P_b = \left(\frac{3q_{r\,max}}{BL}\right)$	สูตรได้จากการสมมติให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหมอนและหินโรยทางที่ถ่ายแรงต่อกันเป็น 1/3 ของความยาวหมอนที่บริเวณปลายหมอนทั้งสองฝั่ง
AREA Method	$P_b = 2\left(\frac{q_{r\,max}}{BL}\right)$	สูตรได้จากการสมมติให้หมอนรองรางถ่ายแรงไปยังหินโรยทางอย่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดความยาวของหมอน

*B คือความกว้างของหมอนรองราง (เมตร) และ L คือ คือความยาวของหมอน (เมตร)

การคำนวณความหนาปลอดภัยของชั้นหินโรยทาง

เมื่อทราบหน่วยแรงที่กระจายตัวจากหมอนรองรางมายังชั้นหินโรยทางแล้ววิศวกรสามารถประมาณความหนาของชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทาง (H) หรือความหนาชั้นอนุภาคที่เหมาะสมได้ หลักการที่ใช้ในการกำหนดความหนาดังกล่าวคือ หน่วยแรงที่กระจายตัวผ่านชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทางจนไปถึงชั้นดินพื้นทางนั้นต้องเบาบางเพียงพอและไม่เหนี่ยวนำให้เกิดการพังวิบัติหรือการเคลื่อนตัวของดินพื้นทางที่มากเกินไปอันส่งผลทำให้ทางมีความคลาดเคลื่อนมากและไม่ปลอดภัย การประเมินความสามารถหรือกำลังของดินที่ไม่ก่อให้เกิดการพังวิบัติหรือการเคลื่อนตัวของดินพื้นทางที่มากเกินนั้นกระทำได้ใน 2 ลักษณะ กล่าวคือ

1. กำหนดให้เป็นกำลังแบกทานปลอดภัย วิธีคือ ประเมินกำลังแบกทานสูงสุดของดินพื้นทางจากนั้นคำนวณกำลังแบกทานปลอดภัยด้วยการทอนกำลังแบกทานสูงสุดลงด้วยอัตราส่วนปลอดภัย การเลืออัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของวิศวกรที่มีต่อดินพื้นทางนั้น กล่าวคือ เมื่อออกแบบด้วยกำลังปลอดภัยดังกล่าว ทางใช้งานได้ดี โดยไม่มีการพังวิบัติหรือการเคลื่อนตัวเสียรูปที่มากเกินไปของดินพื้นทาง หากไม่มีผลการทดสอบดินพื้นทางสำหรับประเมินกำลังแบกทานปลอดภัยของดินเป็นการเฉพาะ The American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) แนะนำให้กำลังแบกทานปลอดภัยของดินพื้นทาง P_a เป็น 138 kPa ความหนาที่เหมาะสมคำนวณได้จากการกระจายตัวของหน่วยแรงตามความลึกของชั้นหินโรยทาง กล่าวคือ หน่วยแรงที่ผิวของดินพื้นทางนั้นต้องไม่มากกว่ากำลังแบกทานปลอดภัยของดินพื้นทางเอง

2. กำหนดให้เป็นการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ของดิน วิธีคือกำหนดเป็นค่าการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ กล่าวคือ เป็นระดับการเคลื่อนตัว (Deformation) ที่ดินพื้นทางไม่เกิดการทรุดตัวที่มากเกินไป หรือ เคลื่อนตัวในระดับที่สื่อว่าเกิดการพังวิบัติของดินพื้นทาง ต่อจากนั้นจึงประเมินระดับหน่วยแรงหรือความเค้นจากชั้นหินโรยทางและ



ชั้นรองหินโรยทางที่กระทำต่อดินพื้นทางที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวเท่ากับการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ และ ใช้หน่วยแรงดังกล่าวเพื่อกำหนดความหนาของชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทางต่อไป

- การคำนวณความหนาของชั้นหินโรยทางจากกำลังปลอดภัยของดินพื้นทาง

ได้มีการเสนอสูตรสำหรับคำนวณค่า H ไว้หลากหลาย ตัวอย่างสูตรการคำนวณที่ใช้กันโดยทั่วไปแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 สูตรคำนวณหน่วยความหนาของชั้นอนุภาค (ชั้นหินโรยทางรวมกับชั้นรองหินโรยทางโดยใช้เกณฑ์เป็นกำลังแบกทานปลอดภัย (P_a)

วิธี	สูตร	ข้อพิจารณา
Talbot's Formula	$\mathrm{P_a} = \mathrm{P_b}\left(\frac{1}{5.9\mathrm{H}^{1.25}}\right)$	พัฒนาจากผลการวัดหน่วยแรงในสนามบนทางมาตรฐานกว้าง 1.435 ม.
Japanese National Railway (JNR) Formula	$\mathrm{P_a} = \mathrm{P_b}\left(\frac{58}{10 + (100\mathrm{H})^{1.35}}\right)$	พัฒนาจากผลการวัดหน่วยแรงในสนามบนทางกว้าง 1 ม.
Clarke's Formula	$\mathrm{P_a} = 2\mathrm{P_b}\frac{\mathrm{BL}}{(\mathrm{B}+2\mathrm{H})(\mathrm{L}+2\mathrm{H})}$	สูตรได้จากการสมมติให้หน่วยแรงที่กระจายตัวในชั้นหินโรยทางลดลงตามความลึกซึ่งเพิ่มขึ้น โดยขนาดความกว้างและยาวของพื้นที่รับเพิ่มขึ้นในอัตราเดียวกับความลึกที่เพิ่มขึ้น
Boussinesq's Formula	$P_a = \frac{6q_{r\,max}}{2\pi H^2}$	พัฒนาจากทฤษฎีอีลาสติก โดยสมมติให้ชั้นโครงสร้างทางส่วนล่างเป็นวัสดุอีลาสติก

<u>การคำนวณความหนาของชั้นหินโรยทางจากการเคลื่อนตัวของดินพื้นทางที่ยอมให้</u>

การออกแบบด้วยวิธีนี้ใช้ผลจากการศึกษาพฤติกรรมของดินพื้นทางเมื่อรับน้ำหนักจากการจราจรซ้ำไปมาและผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของหน่วยแรงในโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรย ผลจากการศึกษาพฤติกรรมของดินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการตรวจวัดในสนามพบว่า ความเครียดแบบไม่คืนตัว (พลาสติก) ของดิน (ε_p) สามารถประมาณได้ด้วยความสัมพันธ์

$$\varepsilon_p(\%) = a\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s}\right)^m N^b$$ สมการที่ 4-1

เมื่อ σ_d คือความเค้นเบี่ยงเบนในดินที่เกิดจากการจราจรของรถไฟ (kPa) และ σ_s คือกำลังของดิน (kPa) N คือจำนวนเพลาผ่าน และ a m และ b เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน การยุบหรือการทรุดตัวในแนวดิ่งของดินพื้นทางเมื่อรับน้ำหนักจากการจราจร (ρ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

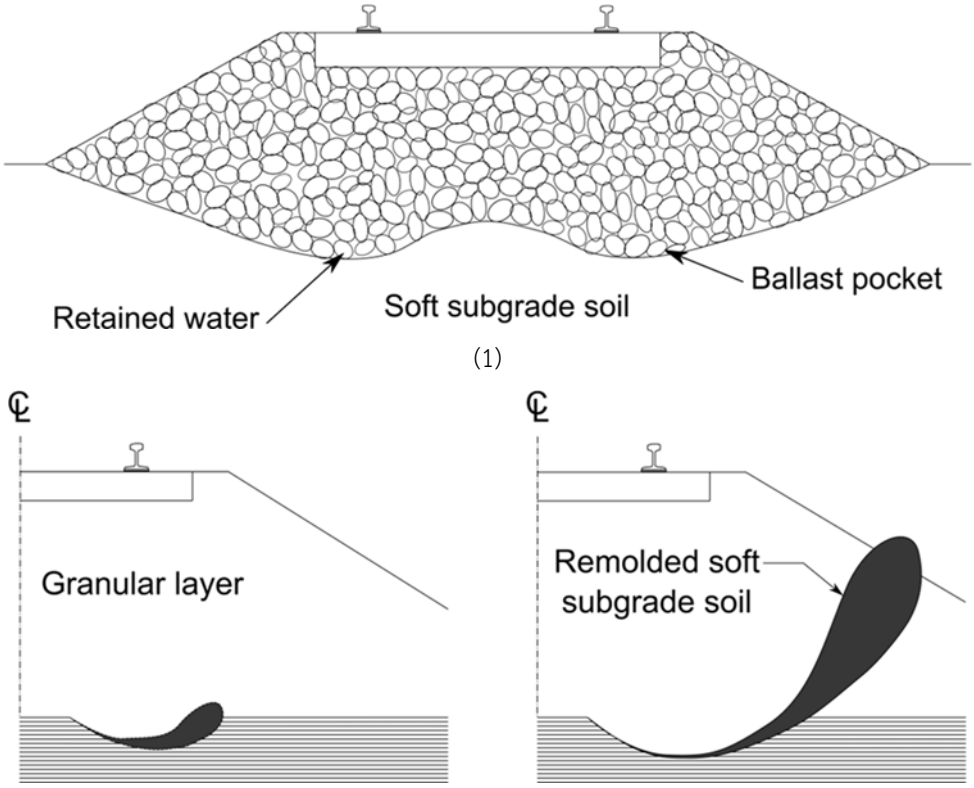
$$\rho = \int_0^T \varepsilon_p(t)dt = \frac{aN^b}{100(\sigma_s)^m}\int_0^T (\sigma_d(t))^m dt$$ สมการที่ 4-2

เมื่อ T คือความหนาของชั้นดินที่ยุบตัวได้ ค่า a m และ b สำหรับดินอ่อนชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ค่า a m และ b ที่แนะนำสำหรับดินอ่อนชนิดต่าง ๆ

ชนิดของดิน	a	b	m
CH (fat clay)	1.20	0.18	2.40
CL (lean clay)	1.10	0.16	2.00
MH (elastic silt)	0.84	0.13	2.00
ML (silt)	0.64	0.10	1.70

สมมติให้การพังวิบัติหรือการเคลื่อนตัวที่มากเกินไปของดินพื้นทางเป็นไปใน 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 ลักษณะการพังวิบัติของดินพื้นทางจากน้ำหนักการจราจรที่มากเกินไป (1) การทรุดตัวของดินพื้นทางที่มากเกินไป (Excessive settlement) (2) การปลิ้นพังของดินพื้นทาง (Progressive shear failure)

สำหรับลักษณะแรก กล่าวคือ การทรุดตัวของดินพื้นทางที่มากเกินไป น้ำหนักจากการจราจรที่กระทำซ้ำไปมาทำให้เกิดความเครียดแบบไม่คืนตัวในชั้นดินและทำให้ชั้นดินพื้นทางยุบหรือทรุดตัวจนมากเกินไป (Excessive settlement) ชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทางเคลื่อนตัวและจมลงตามดินพื้นทางในลักษณะแอ่ง (Ballast pocket) ดังแสดงในรูปที่ 4-5 (1) น้ำ (จากน้ำใต้ดินและน้ำที่ไหลผ่านชั้นอนุภาคลงมา) จะขังอยู่บริเวณแอ่งดังกล่าวและทำให้ดินอิ่มน้ำและกำลังของดินลดต่ำลง กระบวนการนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินมากยิ่งขึ้น ทาง และ รางจะเกิดการเคลื่อนตัวและการเดินรถไม่สามารถทำได้ตามปกติ

ในลักษณะที่สอง คือ การปลิ้นพังของดินพื้นทาง น้ำหนักจากการจราจรที่กระทำซ้ำไปมาและมากเกินไปทำให้ดินพื้นทางที่อ่อนถูกดันให้ปลิ้นออกด้านข้าง เพิ่มขึ้น ๆ ที่ละน้อย (Progressive shear failure) เกิดความเครียดแบบไม่คืนตัวที่ผิวดิน (ε_p) และเกิดกระเปาะดินอ่อนแทรกตัวในชั้นหินอนุภาคและดันตัวออกมาด้านขางของทางดังแสดงรูปที่ 4-5 (2) กระบวนการนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินพื้นทาง ทางและรางจะเกิดการเคลื่อนตัวและการเดินรถไม่สามารถทำได้ตามปกติเช่นกัน

เพื่อป้องกันการเกิดปัญหากับดินพื้นทางในลักษณะทั้งสอง วิศวกรสามารถกำหนดการทรุดตัวหรือความเครียดผิวดินพื้นทางที่ยอมให้ กล่าวคือ ρ_a และ ε_{pa} ตามลำดับ กล่าวคือ สื่อว่าหากการทรุดตัวและความเครียดที่เกิดขึ้นจริงน้อยกว่าค่าที่ยอมให้ ดินพื้นทางยังอยู่ในสภาพที่ดีและทางไม่มีปัญหา การออกแบบคือ

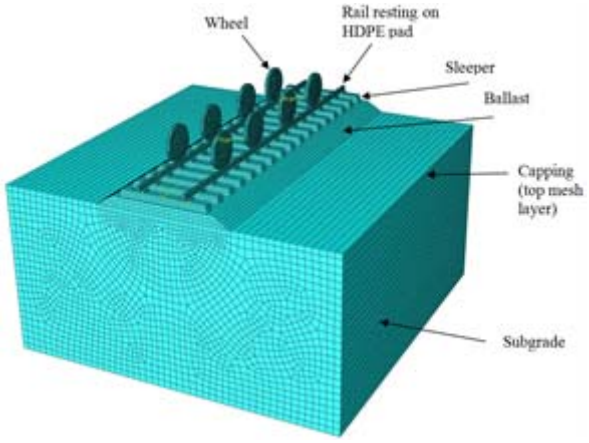
การกำหนดความหนาที่ทำให้หน่วยแรงในดินพื้นทาง (σ_d) เบาบางจนการทรุดตัวหรือความเครียดผิวดินพื้นทางน้อยกว่าค่าที่ยอมให้ นั่นคือ

$$\varepsilon_p \leq \varepsilon_{pa}$$ สมการที่ 4-3

$$\rho \leq \rho_a$$ สมการที่ 4-4

การออกแบบเพื่อป้องกันการปลิ้นพังของดินพื้นทาง

หน่วยแรงในดิน (σ_d) จากการจราจรแปรผันโดยตรงกับน้ำหนักกดเพลาพลวัต (P_d) วิศวกรสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง P_d ซึ่งกระทำที่รางและ σ_d ซึ่งเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในชั้นดินพื้นทางได้หลายวิธี แต่วิธีที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายและมีความแม่นยำที่ดีคือการสมมติให้ทั้งโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่างเป็นวัสดุอีลาสติกจากนั้นวิเคราะห์การกระจายตัวของหน่วยแรงในชั้นโครงสร้างทางด้วยทฤษฎีอีลาสติกโดยใช้วิธีทางตัวเลข (Numerical method) เช่น วิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ เป็นเครื่องมือในการช่วยวิเคราะห์

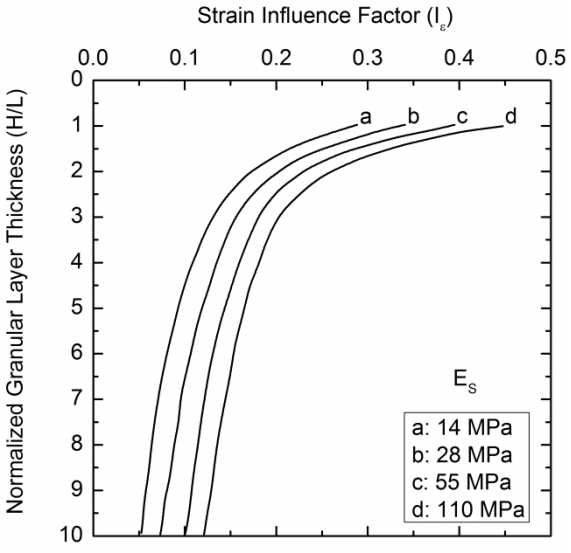


รูปที่ 4-6 ตัวอย่างแบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์สำหรับวิเคราะห์การกระจายตัวของหน่วยแรงในโครงสร้างทางรถไฟจากน้ำหนักการจราจร

โดยตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของหน่วยแรงในโครงสร้างทางตามทฤษฎีอีลาสติกคือ โมดูลัสยืดหยุ่น (Resilient modulus) ของชั้นอนุภาค (E_b) และชั้นดินพื้นทาง(E_s) สำหรับการออกแบบเพื่อป้องกันการปลิ้นพังของดินพื้นทางวิศวกรสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง P_d และ σ_d ได้ผ่านค่าอิทธิพลความเครียด (I_ε Strain influence factor)

$$I_\varepsilon = \frac{\sigma_d A}{P_d}$$ สมการที่ 4-5

เมื่อ A เป็นค่าคงที่ในการคำนวณมีหน่วยเป็นพื้นที่ ค่าอิทธิพลความเครียด (I_ε) เป็นฟังชั่นโดยตรงของ E_b E_s และ H เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของหน่วยแรงในโครงสร้างโดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ (Parametric study) กล่าวคือ ชนิดดินพื้นทาง (ค่า a m และ b) โมดูลัสของชั้นอนุภาค E_b โมดูลัสของชั้นดินพื้นทาง E_s และความหนาของชั้นอนุภาค H วิศวกรสามารถสร้างความสัมพันธ์สำหรับกำหนดความหนาของชั้นอนุภาคในลักษณะกราฟของ H/L และ I_ε ตามตัวอย่างในรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 ตัวอย่างกราฟของ H/L และ I_ε สำหรับดินเหนียวอ่อน Fat clay (CH) ชั้นหินโรยทางมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 550 MPa

เมื่อ L เป็นค่าคงที่ในการคำนวณมีหน่วยเป็นความยาว เมื่อจะออกแบบให้วิศวกร

- กำหนดค่าความเครียดพลาสติกที่ยอมให้ ε_{pa} เช่น 3%
- จากนั้นคำนวณหน่วยแรงที่ยอมให้ σ_{da} จากสมการที่ 4-1
- คำนวณค่าอิทธิพลความเครียด I_ε จาก σ_{da} จากสมการที่ 4-5
- เลือกกราฟ H/L และ I_ε ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากชนิดของดิน โมดูลัสของชั้นอนุภาค และ โมดูลัสของชั้นดินพื้นทาง
- กำหนดค่า H/L ในกราฟ กราฟ โดยพิจารณาโมดูลัสของชั้นดินพื้นทาง E_s
- จากนั้นคำนวณค่า H กล่าวคือ ความหนาของชั้นอนุภาคที่เพียงพอสำหรับป้องกันการปลิ้นพังของดินพื้นทาง

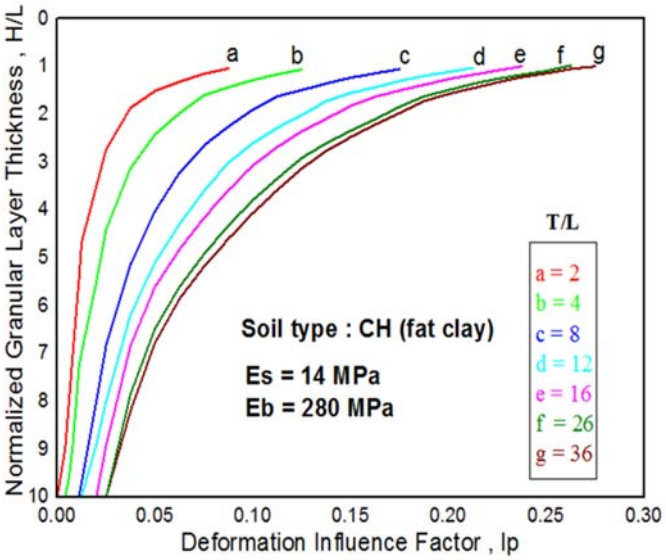
การออกแบบเพื่อป้องกัน Excessive settlement

$$\rho = \frac{aN^b}{100(\sigma_s)^m}\int_0^T \left(\sigma_d(t)\right)^m dt = I_\rho La\left(\frac{P_d}{\sigma_s A}\right)^m \frac{N^b}{100} \qquad \text{สมการที่ 4-6}$$

เมื่อ

$$I_\rho = \int_0^T \left(\frac{\sigma_d(t)A}{P_d L}\right)^m dt \qquad \text{สมการที่ 4-7}$$

เมื่อทราบลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงในโครงสร้างทางจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข เช่น วิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ วิศวกรสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง P_d และ σ_d ได้โดยผ่านค่าอิทธิพลการเคลื่อนตัว I_ρ (Deformation influence factor) ค่าอิทธิพลการเคลื่อนตัวเป็นฟังชั่นโดยตรงของ E_b E_s H และ T เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของหน่วยแรงในโครงสร้างโดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ (Parametric study) กล่าวคือ ชนิดดินพื้นทาง (ค่า a m และ b) โมดูลัสของชั้นอนุภาค E_b โมดูลัสของชั้นดินพื้นทาง E_s ความหนาของชั้นอนุภาค H และความหนาของชั้นดินพื้นทางที่ยุบตัวได้ T วิศวกรสามารถสร้างความสัมพันธ์สำหรับกำหนดความหนาของชั้นอนุภาคในลักษณะกราฟของ H/L และ I_ρ ตามตัวอย่างในรูปที่ 4-8



รูปที่ 4-8 ตัวอย่างกราฟของ H/L และ I_ρ สำหรับดินเหนียวอ่อน Fat clay (CH) ชั้นอนุภาคมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 280 MPa และ ชั้นดินพื้นทางมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 14 MPa

เมื่อจะออกแบบให้วิศวกร

- กำหนดค่าการเสียรูปพลาสติกที่ยอมให้ ρ_a เช่น 1 เซนติเมตร
- คำนวณค่าอิทธิพลการเสียรูป I_ρ จาก ρ_a

$$I_{\rho a} = \frac{\frac{\rho_a}{L}}{a\left(\frac{P_d}{\sigma_s A}\right)^m N^b} \times 100$$



- เลือกกราฟ $\mathrm{H/L}$ และ $\mathrm{I_\rho}$ ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากชนิดของดิน โมดูลัสของชั้นอนุภาค และ โมดูลัสของชั้นดินพื้นทาง
- กำหนดค่า $\mathrm{H/L}$ ในกราฟ โดยพิจารณาความหนาของชั้นดินพื้นทางที่ยุบตัวได้ T
- จากนั้นคำนวณค่า H กล่าวคือ ความหนาของชั้นอนุภาคที่เพียงพอสำหรับป้องกันการทรุดตัวของดินพื้นทางที่มากเกินไป

<u>การกำหนดความหนาของชั้นหินโรยทางและความหนาชั้นรองหินโรยทาง</u>

เมื่อกำหนดความหนาของชั้นอนุภาคปลอดภัยตามวิธีใดวิธีหนึ่งที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว วิศวกรสามารถกำหนดความหนาของชั้นหินโรยทางแยกออกจากชั้นรองหินโรยทางโดยมีข้อพิจารณาดังนี้

- ความหนาของชั้นหินโรยทาง (BDD) ต้องเพียงพอเพื่อให้ซ่อมบำรุงชั้นหินโรยทาง เช่น การอัดหินโดยใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่นั้นทำได้โดยไม่ทำให้ชั้นรองหินโรยทางเสียหาย
- หน่วยแรงที่ผิวระหว่างชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทางต้องไม่มากเกิน 285 kPa หากหน่วยแรงมากเกินกว่าค่านี้ทำให้หินโรยทางฝังแทรกเข้าไปในชั้นรองหินโรยทางได้และทำให้ชั้นรองหินโรยทางเสียหาย
- ความหนาของชั้นหินโรยทางโดยพิจารณาถึงปัจจัยข้างต้น อย่างต่ำให้เท่ากับ 25 เซนติเมตร
- ขณะทำการก่อสร้าง ให้บดอัดชั้นรองหินโรยเป็นชั้นและแต่ละชั้นให้มีความหนาไม่น้อยกว่า 15 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้มีกำลังเพียงพอสำหรับทำหน้าที่แยกหินโรยทางออกจากดินพื้นทางและป้องกันมิให้ชั้นหินโรยทางและพื้นทางเสื่อมสภาพ
- โดยสรุป แนะนำให้ ความหนาของชั้นหินโรยทาง BDD = 25 เซนติเมตร ความหนาของชั้นรองหินโรยทาง $SBD = \mathrm{H} - \mathrm{BDD}$ โดยที่ $SBD \geq$ 15 ซม.

<u>การคำนวณระยะคลุมหัวหมอน</u>

การออกแบบระยะคลุมหัวหมอนให้มีข้อพิจารณาดังนี้

- แรงที่ทำให้หมอนรองรางซึ่งฝังอยู่ในชั้นหินโรยทางที่มีระยะคลุมหัวหมอน 15 เซนติเมตร เป็น 150 กิโลกรัม โดยที่ไม่มีแรงในแนวดิ่งกระทำต่อหมอน
- แรงในแนวนอนจากรางที่โค้งและเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = 1.182 \times \mathrm{D} \times \Delta\mathrm{T}$$

เมื่อ P คือแรงด้านข้าง (กิโลกรัม/เมตร ตามความยาวของราง) D คือมุมโค้งของทาง (องศา) $\Delta\mathrm{T}$ คือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (เซลเซียส)

- ตัวอย่างการคำนวณ กำหนด D = 8 องศา $\Delta\mathrm{T}$ = 36 เซลเซียส ระยะระหว่างหมอน 60 เซนติเมตร คำนวณแรงในแนวนอนจากราง

P = 1.182(8)(36) = 340.42 กิโลกรัม/เมตร



ระยะระหว่างหมอนเป็น 60 เซนติเมตร ดังนั้นแรงด้านข้างที่หมอนหนึ่งตัวต้องรับ เท่ากับ (340.42)(0.6) = 204.25 กิโลกรัม

- จากที่ทราบว่าเมื่อระยะคุมหัวหมอนเป็น 15 เซนติเมตร หมอนรองรางสามารถรับแรงได้ 150 กิโลกรัม ดังนั้นถ้าแรง 204.25 กิโลกรัม ต้องมีระยะคลุมหัวหมอนอย่างน้อยเท่ากับ

(204.25/150)(15) = 20.43 เซนติเมตร

- อย่างไรก็ตามเพื่อความปลอดภัยกำหนดให้ระยะคลุมหัวหมอนสำหนรบทางหนึ่งเมตรไม่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตร

4.3 การออกแบบและก่อสร้างชั้นดินพื้นทางและคันทางสำหรับทางรถไฟแบบมีหินโรย

4.3.1 การสำรวจและการทดสอบวัสดุฐานราก

การสำรวจและการทดสอบ (Exploration and testing) ถือได้ว่าเป็นส่วนสำคัญและมีผลอย่างมากในขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรย ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการออกแบบ (Design) หรือแม้กระทั่งการบำรุงรักษา (Maintenance) คันทาง สามารถลดลงได้จากการสำรวจและการทดสอบวัสดุฐานรากที่มีประสิทธิภาพ ควรพิจารณาให้มีการสำรวจบริเวณก่อสร้าง (Site investigation) ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 ช่วง คือ

- การสำรวจบริเวณก่อสร้างเบื้องต้น (Preliminary site investigation) คือการตรวจสอบข้อมูลที่มีอยู่จากรายงานหรือการทดสอบก่อนหน้า (Previous investigation) ในบริเวณใกล้เคียง เช่น ประวัติและสาเหตุการเบาทาง การซ่อมทาง การเปลี่ยนแปลงระบบระบายน้ำ การพังวิบัติและ ความถี่ของการเกิดการพังวิบัติ และความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมทางที่ไม่พึงประสงค์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ เป็นต้น

- การตรวจสอบหน้างานอย่างละเอียด (Detailed site investigation) คือ การตรวจสอบจากการวิเคราะห์สมบัติและพฤติกรรมของดิน หิน น้ำใต้ดิน และ การระบายน้ำผิวดิน วิศวกรควรพิจารณาให้มีการเจาะสำรวจ ทดสอบวัสดุฐานรากในสนามและเก็บตัวอย่างเพื่อมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

<u>การสำรวจเบื้องต้น (Preliminary exploration)</u>

- การรวบรวมข้อมูลที่มีอยู่แล้ว (Information available)

ควรให้มีการรวบรวมข้อมูลทางธรณีวิทยา ภูมิศาสตร์ สภาพอากาศในบริเวณก่อสร้างจากแหล่งข้อมูลที่มีอยู่ หรือจากรายงานการสำรวจบริเวณก่อสร้างก่อนหน้า ข้อมูลเหล่านี้ถือว่าเป็นประโยชน์อย่างมากในการวางแผนการสำรวจในรายละเอียดต่อไป ควรมีการสำรวจปัญหาต่าง ๆ ที่พบมาในอดีต เช่นประวัติและสาเหตุการเบาทาง การซ่อมทาง การเปลี่ยนแปลงระบบระบายน้ำ การพังวิบัติและ ความถี่ของการเกิดการพังวิบัติ และความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมทางที่ไม่พึงประสงค์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ



- การสำรวจโดยการอาศัยภาพถ่าย (Photogrammetry)

วิศวกรสามารถรวบรวมข้อมูลที่เป็นประโยชน์จากการสำรวจโดยภาพถ่าย วิธีการสำรวจที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การสำรวจโดยภาพถ่ายทางอากาศ (Aerial photograph) ภาพถ่ายทางอากาศสามารถช่วยอธิบายลักษณะต่าง ๆ ของบริเวณก่อสร้างได้เป็นอย่างดี ความละเอียดของข้อมูลในภาพถ่ายทางอากาศขึ้นอยู่กับอัตราส่วน (Scale) ภาพถ่ายทางอากาศเมื่อนำมาฉายโดยใช้อุปกรณ์เทคนิคการซ้อนภาพ (Stereo-optic viewing of overlapping aerial photographs) จะเห็นรายละเอียดการวางตัวของพื้นดิน (Land forms) การเคลื่อนตัวของดิน (Landslides) ทางระบายน้ำ (Drainage) รวมทั้งสภาพการกัดเซาะ (Erosion Features)

- การตรวจบริเวณก่อสร้าง (Site Reconnaissance)

วิศวกรควรจัดให้มีการตรวจบริเวณก่อสร้าง ทั้งนี้เพราะจะทำให้เข้าถึงรายละเอียดที่ปรากฏจริงที่หน้างานและใช้สำหรับตัดสินใจในการเลือกการทดสอบแบบละเอียดที่เหมาะสมต่อไป การตรวจบริเวณก่อสร้างควรประกอบด้วย การสำรวจผิวดินและหินที่ปรากฏให้เห็น รูปแบบการระบายน้ำของพื้นที่ อุปสรรคหรือปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับโครงการก่อสร้าง ทางเลือกและวิธีการแก้ปัญหาหน้างาน

<u>การสำรวจดินฐานรากอย่างละเอียด (Detailed Geotechnical Exploration In Soil)</u>

โดยทั่วไปการก่อสร้างคันทางรถไฟเกี่ยวพันกับการขุดและการถมไม่ว่าจะเป็นดินโดยธรรมชาติ (Naturally Deposit) หรือดินที่ได้ก่อสร้างขึ้นมาก่อน (Mechanically Placed Soils) ความมั่นคงและเสถียรภาพของคันทางจะถูกควบคุมโดยสมบัติของดินคันทางและดินฐานราก การมีอยู่ของน้ำในดิน และ การไหลของน้ำที่ผิวดิน

- การสำรวจดินฐานรากสำหรับดินถม (Embankment Foundation)

วิศวกรควรสำรวจฐานรากดินถมเพื่อได้ข้อมูลสำหรับการออกแบบที่เพียงพอ วัตถุประสงค์หลักคือออกแบบให้ได้คันทางมีเสถียรภาพ ไม่พังวิบัติ หรือ ไม่เกิดการทรุดตัวที่มากเกินไป ข้อมูลจากการสำรวจควรประกอบด้วยลักษณะชั้นดินฐานราก ระดับน้ำใต้ดิน และ การไหลของน้ำที่ผิวดิน ควรให้มีการเก็บตัวอย่างดิน (Sampling) เพื่อทดสอบสำหรับดินมวลละเอียด (Fine-Grained Soil) หากดินฐานรากเป็นดินอนุภาคหรือมวลหยาบ (Granular or Coarse-Gained Soil) พิจารณาทดสอบกำลังของดินในสนาม ความลึกและจำนวนของหลุมเจาะควรมีความเหมาะสมเพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการออกแบบที่เพียงพอ

- การสำรวจดินฐานรากสำหรับทางตัด (Cut)

สำหรับการก่อสร้างทางตัด หรือ การขุดจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการสำรวจเพื่อออกแบบความลาดชันและ การทำคันดินถมถ่วงน้ำหนัก (Berm) ในกรณีของดินมวลละเอียดหรือดินเหนียวควรมีการเก็บตัวอย่างดินด้วยกระบอกบาง (Thin-Walled Tube) เพื่อนำไปทดสอบหากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) จำแนกชนิดดิน (Soil Classification) และระบุระดับน้ำใต้ดิน สำหรับดินมวลหยาบ เช่น ดินทราย หรือ กรวด การทดสอบในสนาม เช่น การทดสอบ SPT ถือว่าได้ข้อมูลเพียงพอสำหรับการออกแบบ โดยทั่วไปการเก็บตัวอย่างดินทดสอบ หรือ การทดสอบในสนามควรกระทำจนถึงความลึกที่เกินการตัด หรือ อาจลึกกว่านั้นขึ้นอยู่กับดุลย



พินิจของวิศวกร ควรมีการตรวจวัดระดับน้ำใต้ดิน วิศวกรอาจพิจารณาติดตั้งท่อวัดระดับน้ำ (Standpipe) ในบริเวณนั้น สำหรับชั้นดินมวลหยาบควรมีการตรวจสอบอย่างใกล้ชิดเนื่องจากแรงดันน้ำใต้ดินอาจส่งผลให้เกิดการกัดเซาะของผิวทางตัดและอาจก่อให้เกิดการพังวิบัติในอนาคตได้ วิศวกรควรพิจารณาตรวจสอบการบวมตัวของดิน (Swelling) โดยเฉพาะดินมวลละเอียดที่น้ำหนักกดทับที่มีมาแต่เดิมคลายออกจากการตัดหรือขุด

- การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์ผล (Laboratory Testing and Analysis)

การเลือกวิธีสำหรับทดสอบตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการณ์และการวิเคราะห์ผลนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่พบ รูปแบบการก่อสร้าง งบประมาณ และความยากง่ายในการเก็บตัวอย่างทดสอบ มาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจดินฐานรากและการทดสอบดินทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการอย่างละเอียดแสดงในตารางที่ 4-8 และ ตารางที่ 4-9 การทดสอบเหล่านี้พิจารณาให้เป็นการทดสอบขั้นต่ำ วิศวกรสามารถดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของดินเพิ่มเติมนอกเหนือจากวิธีเหล่านี้ได้เมื่อเห็นสมควร

ตารางที่ 4-8 มาตรฐานการสำรวจดินฐานราก เก็บตัวอย่าง และ การทดสอบสมบัติทางกลของดินในสนาม

การทดสอบ	มาตรฐาน ASTM
คุณสมบัติหน้างานสำหรับการออกแบบและก่อสร้างทางวิศวกรรม	D 420
การสำรวจและเจาะเก็บตัวอย่างดินโดยสว่านเจาะ	D 1452
การทดสอบ Penetration test และการเก็บตัวอย่างกระบอกผ่า	D 1586
การเก็บตัวอย่างดินโดยใช้กระบอกบาง	D 1587
การทดสอบแรงเฉือนในดินเหนียวโดยใช้ Field vane shear test	D 2573
การทดสอบหาค่าเสียดทานโดย Cone penetration test	D 3441

ตารางที่ 4-9 มาตรฐานการทดสอบสมบัติทางกลของดินในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบ	มาตรฐาน ASTM
การทดสอบการคละขนาดอนุภาคดินด้วยวิธีการล้าง	C 117
การวิเคราะห์การกระจายตัวของดิน	D 422
การทดสอบการบดอัดของดินแบบมาตรฐาน (Standard effort)	D 698
ความถ่วงจำเพาะของดิน	D 854
การทดสอบการบดอัดของดินแบบปรับปรุง (Modified effort)	D 1557
การหาความหนาแน่นและหน่วยน้ำหนักของดินด้วยวิธี Sand cone	D 1556
การทดสอบกำลังของดินเหนียวแบบแกนเดียว	D 2166
การหาความหนาแน่นและหน่วยน้ำหนักของดินด้วยวิธี Rubber balloon	D 2167
การทดสอบหาปริมาณความชื้นในดินและหิน	D 2216

ตารางที่ 4-9 (ต่อ) มาตรฐานการทดสอบสมบัติทางกลของดินในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบ	มาตรฐาน ASTM
การทดสอบการบวมตัว (Swelling) และการทรุดตัว (Settlement) แบบแกนเดียวในดินเหนียว	D 4546
การจำแนกประเภทของดินโดยหลักทางวิศวกรรม	D 2487
การอธิบายดินโดยการประเมินจากสายตาและการทดสอบอย่างง่าย	D 2488
การทดสอบขีดจำกัดความข้นเหลวของดิน (LL และ PL) และดัชนีพลาสติกของดิน (PI)	D 4318
การหาความหนาแน่นและหน่วยน้ำหนักสูงสุดของดินโดยใช้โต๊ะสั่น (Vibratory table)	D 4253
การหาความหนาแน่นและการคำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์	D 4254
การทดสอบกำลังของดินเหนียวแบบสามแกน	D 4767

การสำรวจหินฐานรากอย่างละเอียด (Detailed geotechnical exploration in rock)

เมื่อมีการก่อสร้างคันทางที่ในหิน วิศวกรควรให้มีการสำรวจและทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ ข้อมูลเหล่านี้เป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับประมาณค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและวางแผนทำงาน การศึกษารูปแบบการวางตัวของชั้นหิน (Rock formation) สามารถดำเนินการได้สองลักษณะ คือ 1) วิธีเชิงประจักษ์ (Empirical method) ซึ่งเป็นการศึกษาจากข้อมูลทางธรณีวิทยาและลักษณะที่ปรากฏ (Visible surface feature) และ 2) วิธีแบบแทรกแซง (Intrusive method) ซึ่งเกี่ยวพันกับการสำรวจและทดสอบหิน วิศวกรควรศึกษาความไม่ต่อเนื่องในโครงสร้าง (Structural discontinuities) รอยแตกแยกเสมอเมื่อจะวิเคราะห์เสถียรภาพของทางตัดในหิน

- กระบวนการในการสำรวจหิน (Rock Exploration Methodology)

ให้พิจารณาศึกษารวบรวมข้อมูลทางธรณีวิทยาบริเวณโครงการก่อสร้าง สิ่งต่าง ๆ ที่ปรากฏพ้นผิวดิน ช่วยคาดการณ์แนวชั้นหิน (Strike) และมุมเอียง (Dip) ความไม่ต่อเนื่องและรอยแตกของหิน ในกรณีที่ชั้นหินไม่ปรากฏบนผิวดิน อาจทำการเจาะสำรวจ แผนการสำรวจควรมีความต่อเนื่องตามโครงสร้างของหิน ควรพิจารณาเก็บตัวอย่างหินแบบคงสภาพเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการณ์ โดยปกติขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างควรอยู่ระหว่าง 4 ซม. ถึง 6 ซม. หรืออาจใหญ่กว่าตามคำแนะนำจากนักธรณีวิทยาหรือวิศวกร สำหรับความลึกและระยะห่างของหลุมเจาะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของโครงการ แต่อย่างน้อยควรลึกพอเพื่อให้ประเมินกำลังของชั้นพื้นทาง วิศวกรควรพิจารณาขยายพื้นที่สำรวจออกไปจากเส้นศูนย์กลาง (Center line) เพื่อสำรวจความไม่ต่อเนื่องของชั้นหินซึ่งอาจจะมีผลต่อการออกแบบทางลาด



- การตรวจสอบและการทดสอบ (Examination And Testing)

ตัวอย่างหินที่ได้จากการเจาะสำรวจถือได้ว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง การเก็บตัวต้องดำเนินการในลักษณะที่สมบัติของหินถูกรักษาให้ใกล้เคียงกับสภาวะธรรมชาติให้มากที่สุด ตารางที่ 4-10 อธิบายลักษณะที่พบในตัวอย่างหิน วิศวกรควรมีการจัดทำ Boring Log และรูปตัดของหิน (Cross-Sectional Mapping Of Rock) และนำข้อมูลเหล่านี้ไปประเมินกำลังของหิน การเสียรูปเคลื่อนตัว และ วิเคราะห์เสถียรภาพของหินได้ นอกจากนั้นข้อมูลดังกล่าวยังใช้ประเมินแนวโน้มที่หินจะเสื่อมสภาพจากการผุพังตามธรรมชาติ มาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจและทดสอบหินฐานรากอย่างละเอียดแสดงในตารางที่ 4-11การทดสอบเหล่านี้พิจารณาให้เป็นการทดสอบขั้นต่ำ วิศวกรสามารถดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของหินเพิ่มเติมนอกเหนือจากวิธีเหล่านี้ได้เมื่อเห็นสมควร

ตารางที่ 4-10 ลักษณะปรากฏที่พบได้บ่อยในตัวอย่างหิน

รูปแบบ	ลักษณะ	ความสำคัญ
ความไม่ต่อเนื่อง - รูปแบบ	รอยต่อ รอยเลื่อน แนววางตัวชั้นหิน (Bedding plane) แนวการแยกตัว (Cleavage plane) รอยแตกซึ่งแนวไถล (Slickenslide)	ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในหิน กำลังของหิน และการเสียรูปของมวลหิน
- ตำแหน่ง	รอยชิดและการหมุนตัวของรอยต่อ ความหนาของชั้นหิน ความยาวของตัวอย่างหินที่ต่อเนื่อง มุมเอียงของการเจาะ	ข้อมูลสำคัญสำหรับออกแบบทางการตัดและอุโมงค์
- พื้นผิว	รอยแตกชิด หรือ เปิด รูปแบบ : เรียบ โค้ง หรือ ไม่สม่ำเสมอ เนื้อวัสดุ : ลื่น เรียบ หรือ หยาบ	ปัจจัยสำหรับประเมินกำลังรับแรงเฉือนของรอยแยกหรือความไม่ต่อเนื่อง
วัสดุที่แทรกตัวในความไม่ต่อเนื่อง	คุณสมบัติ : ชนิด ความแข็ง ความหนา และความเปลี่ยนแปลงของวัสดุ กำเนิด : จากหินในบริเวณเดียวกัน หรือแทรกซึมมาจากแหล่งอื่น	ส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวตลอดแนวความไม่ต่อเนื่องของหิน
ชนิดหินและเนื้อวัสดุ	- ชื่อทางธรณีซึ่งขึ้นกับแร่ธาตุ เนื้อวัสดุ และ กำเนิด - ขนาดและเหลี่ยมมุมของผลึก - เนื้อวัสดุ : การเชื่อมประสานของมวลวัสดุ	



ตารางที่ 4-10 (ต่อ) ลักษณะปรากฏที่พบได้บ่อยในตัวอย่างหิน

รูปแบบ	ลักษณะ	ความสำคัญ
ความแข็งของหิน	- ความแข็งสัมพันธ์ (Relative Hardness)	ช่วยในการออกแบบและก่อสร้าง ซึ่งความแข็งอาจมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเฉลี่ย
ความสมบูรณ์ของตัวอย่าง	- ความสมบูรณ์ของตัวอย่าง เช่น RQD	จำแนกชนิดของหินตามกำลัง

4.3.2 การออกแบบ

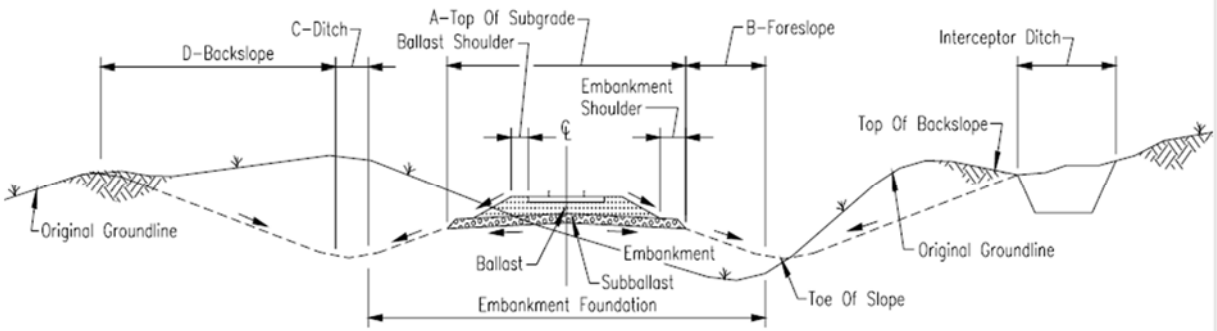
ส่วนนี้ของคู่มืออธิบายหลักการออกแบบการขุดและการถมสำหรับก่อสร้างคันทางรถไฟแบบมีหินโรย

ลาดดินจากการขุด

ในโครงการก่อสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยการขุดดินจะเกี่ยวข้องกับการปรับระดับพื้นทางในบริเวณที่เป็นเนินให้ต่ำลง หรือ ขุดเพื่อให้ได้วัสดุสำหรับเป็นดินถมในบริเวณอื่น วัสดุที่พบได้ประจำในการขุดดินได้แก่ ดินมวลหยาย ดินมวลละเอียดและหิน ส่วนประกอบของลาดหรือหลุมจากการขุดและการถมแสดงในรูปที่ 4-9

ตารางที่ 4-11 มาตรฐานการทดสอบสมบัติทางกลของหิน

การสำรวจและการทดสอบ	วิธี ASTM	ข้อเสนอแนะ
การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซับ มวลหยาบ มวลละเอียด	C 127 C 128	
การทดสอบความแข็งแกร่งด้วย โซเดียมซัลเฟต หรือแมกนีเซียม ซัลเฟต	C 88	เพื่อบ่งบอกการทนทานของหินต่อสภาพอากาศ
ความต้านทางและการเสื่อมสภาพจากการกระแทกและการขัดสี โดยวิธี Los Angeles มวลหยาบขนาดใหญ่ มวลหยาบขนาดเล็ก	C 535 C 131	เพื่อวัดการย่อยลสายของแร่ธาตุจากการบดอัด การกระแทก และการถลอก
การตรวจสอบ Petrographic ของมวลหิน	C 295	
การทดสอบกำลังรับแรงอัด Uniaxial การทดสอบ Triaxial Strength of Undrained ของหินโดยไม่วัดแรงดันน้ำ	D 2664	เพื่อจำแนกกำลังของหิน และพฤติกรรมการเสียรูป ซึ่งมีประโยชน์ในการเจาะ เพื่อหามุมต้านทานแรงเฉือนของหิน โดยการชุ่มทิศทางของรอยต่อหิน เพื่อจัดลำดับความเค้นที่ปรากฏหน่างาน



รูปที่ 4-9 องค์ประกอบหลุมหรือลาดที่ได้จากการขุดและการถม

หน้าที่ของส่วนประกอบต่าง ๆ อธิบายในตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 หน้าที่ของส่วนประกอบหลุมหรือลาดที่ได้จากการขุดและการถมและความกว้างสำหรับออกแบบ

ส่วนประกอบ	วัตถุประสงค์	ความกว้าง
พื้นทาง (Top of subgrade)	เป็นฐานสำหรับรองรับชั้นรองหินโรยทาง หินโรยทาง หมอน ราง ถนนข้างทางเพื่อการซ่อมบำรุง	ความกว้างมาตรฐานจากการออกแบบ
ลาดชิดทาง (Fore slope)	เพื่อรองรับและให้เสถียรภาพกับทางและพื้นทาง ยกระดับพื้นทางให้พ้นระดับน้ำสำหรับออกแบบ	ความกว้างมาตรฐานจากการออกแบบ
ร่องน้ำ (Ditch)	ระบายน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินที่ไหลซึมเข้ามาในหลุดตัดหรือถม ช่วยป้องกันไม่ให้พื้นทางอ่อนตัวจากน้ำในดินที่มากเกินไป	ออกแบบให้เพียงพอกับปริมาณและการไหลของน้ำ
ลาดไกลทาง (Back slope)	เกิดจากการขุดพื้นดินเดิม ตำแหน่งอยู่ระหว่างร่องน้ำกับพื้นดินเดิม	เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับ ความสูงหรือความลึกของการขุด เสถียรภาพของดิน สภาพการกัดเซาะ
ร่องดักน้ำ (Interceptor ditch)	ดักและระบายน้ำผิวดิน ไม่ให้ไหลเข้ามาในหลุดตัดหรือถม	ออกแบบให้เพียงพอกับปริมาณและการไหลของน้ำ

การออกแบบลาดไกลทาง

การออกแบบความเอียงของลาดไกลทางให้เป็นไปตามผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เพื่อให้ลาดมีความปลอดภัย วิศวกรควรพิจารณาว่าต้องขยายขนาดขอบเขตทางเพื่อป้องการพังวิบัติของลาดดินที่อาจเกิดขึ้นหากลาดมีความเอียงมากเกินไปหรือไม่ หากลาดดินประกอบไปด้วยวัสดุดินหรือหินต่างชนิดอาจต้องออกแบบความเอียงของแต่ละชั้นต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำลังของวัสดุ



การออกแบบร่องระบายน้ำในหลุมขุดหรือถม

ต้องออกแบบให้ร่องมีขนาดใหญ่และเอียงเพียงพอที่รองรับปริมาณน้ำผิวดินสำหรับการออกแบบในบริเวณโครงการก่อสร้างได้ ร่องต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะทำความสะอาดได้อย่างสะดวก ข้อกำหนดและแนะนำสำหรับออกแบบร่องระบายน้ำอย่างละเอียดอยู่ในมาตรฐาน มขรS-T-010-256x

การขุดดิน

ลาดดินจากการขุดต้องมีเสถียรภาพ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพลาดดินได้แก่ กำลังของวัสดุ ความชื้นในดิน มุมของลาดดิน และ ลักษณะการระบายน้ำ ลาดดินต้องอยู่ในเสถียรภาพทั้งระหว่างการก่อสร้างและระหว่างเปิดใช้ทางแล้ว ควรให้มีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเป็นกรณีเฉพาะโดยวิศวกรเมื่อเมื่อลาดดินมีความสูงมากกว่า 3-5 เมตร

ลาดดินที่ออกแบบต้องมีความกว้างเพียงพอสำหรับร่อง หรือท่อระบายน้ำด้านข้างทาง หากจำเป็น ให้ออกแบบให้มีระบบลดแรงดันน้ำในลาดดินเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของลาด ในกรณีเป็นลาดจากการขุดในหินควรออกแบบให้เพิ่มความกว้างของการขุดเพื่อรองรับหินหรือเศษวัสดุอื่น ๆ ที่อาจตกลงมากับลาดและป้องกันมิให้วัสดุเหล่านั้นกระเด็นไปในบริเวณของทางที่มีการจราจรได้ การออกแบบอาจใช้เทคนิคลาดเป็นขั้น ทั้งนี้เพื่อลดแรงดันที่ฐานและเพิ่มเสถียรภาพของลาด

การขุดในดินทรายและกรวด

ในกรณีปกติที่ลาดดินสูงไม่เกิน 5 ม. ความเอียงปลอดภัยของลาดโดยปกติจะไม่เกิน 2 (แนวราบ) ต่อ 1 (แนวดิ่ง) ในกรณีที่มีปัจจัยอื่นที่อาจมีผลกระทบต่อเสถียรภาพลาดดินหรือลาดดินสูงกว่า 5 ม. ให้มีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเป็นกรณีเฉพาะโดยวิศวกร

การขุดในดินดินเหนียวและตะกอนทราย

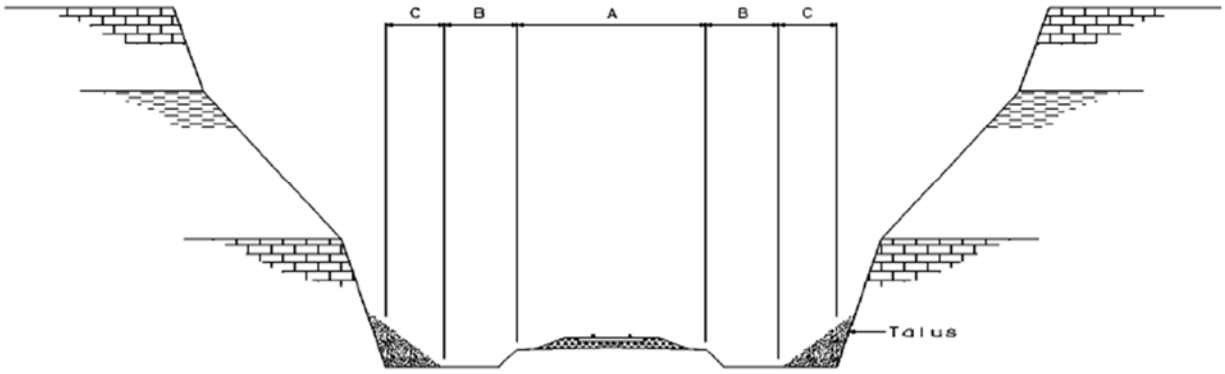
ในกรณีปกติที่ลาดดินสูงไม่เกิน 3 ม. ความเอียงปลอดภัยของลาดโดยปกติจะไม่เกิน 2 (แนวราบ) ต่อ 1(แนวดิ่ง) ในกรณีที่มีปัจจัยอื่นที่อาจมีผลกระทบต่อเสถียรภาพลาดดินหรือลาดดินสูงกว่า 3 ม. ให้มีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเป็นกรณีเฉพาะโดยวิศวกร หากออกแบบลาดดินในบริเวณที่มีการพังวิบัติของลาดดินอยู่บ่อยครั้งอาจออกแบบทางให้มีความกว้างเพียงพอ กล่าวคือแม้เกิดการพังวิบัติขึ้น และมีมวลดินเคลื่อนตัวเข้ามาในทาง จะไม่ไปถึงระดับพื้นทางและการจรารจรของรถไฟยังสามารถดำเนินได้เป็นปกติ

การขุดในชั้นดินประกอบด้วยดินหลายชนิด

กรณีนี้ควรออกแบบโดยให้มีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเป็นเฉพาะโดยวิศวกร

การขุดในหิน

ความกว้างของการขุดในหินประกอบด้วย 3 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 4-10หน้าที่ของส่วนประกอบและความกว้างอธิบายในตารางที่ 4-13



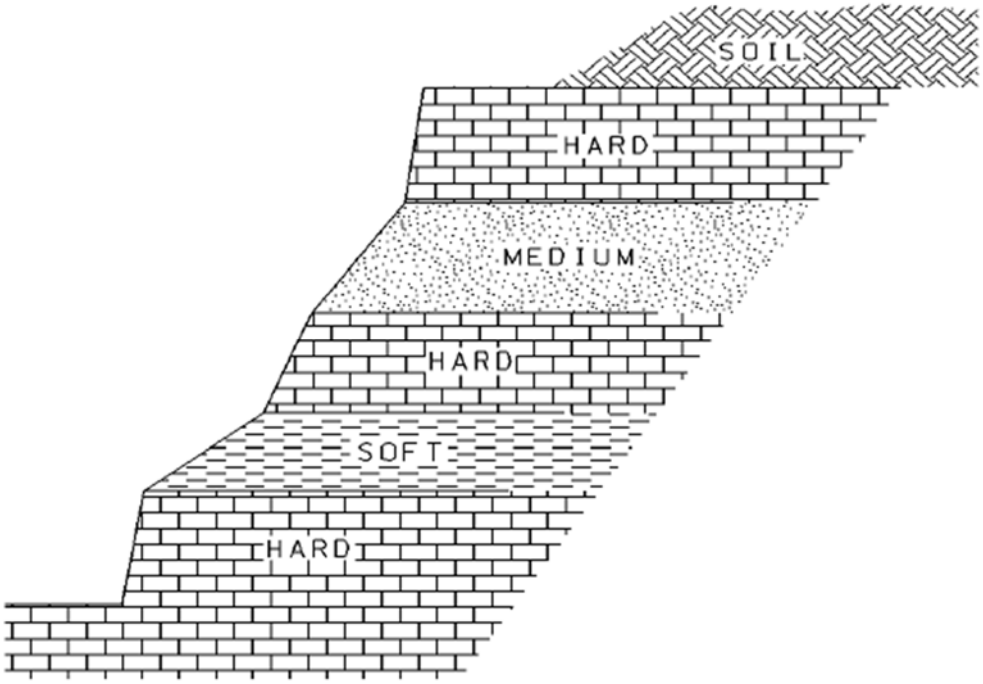
รูปที่ 4-10 องค์ประกอบสำหรับกำหนดความกว้างของการขุดในหิน

ตารางที่ 4-13 หน้าที่ของส่วนประกอบลาดที่ได้จากการขุดในหินและความกว้างสำหรับออกแบบ

ส่วนประกอบ	วัตถุประสงค์	ความกว้าง
พื้นทาง (A) (Top of subgrade)	เป็นฐานสำหรับรองรับชั้นรองหินโรยทาง หินโรยทาง หมอน ราง และถนนข้างทางเพื่อการซ่อมบำรุง	ความกว้างมาตรฐานจากการออกแบบ
ร่องน้ำ (B) (Ditch)	ระบายน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินที่ไหลซึมเข้ามาในหลุดตัดหรือถม ช่วยป้องกันไม่ให้พื้นทางอ่อนตัวจากน้ำในดินที่มากเกินไป	ออกแบบให้เพียงพอกับปริมาณและการไหลของน้ำ
ร่องดัก (C) (Catchment ditch)	ดักและเก็บวัสดุหินที่อาจร่วงลงมาตามลาด ใช้เข้าถึงทางรถไฟเพื่อวัตถุประสงค์ในการซ่อมบำรุง	ควรออกแบบให้มีร่องดักในบริเวณที่ขุดในหินที่ไม่แข็งแรง กะเทาะได้ง่าย และ เสื่อมสภาพไว ความกว้างแปรเปลี่ยนไปตามความสูง ขนาดและอัตราการร่วงของหิน หลักการสำคัญคือร่องต้องกว้างพอให้หินที่ร่วงตกลงมาไม่กระเด็นเข้าไปในบริเวณราง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดหิน

ความเอียงปลอดภัยของลาดหินขึ้นอยู่กับสมบัติทางวิศวกรรมของหิน ในลาดหนึ่งอาจออกแบบความเอียงที่หลากหลายทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการเรียงตัวของชั้นหินหลายชนิด รูปที่ 4-11 แสดงลักษะณะการความเอียงของลาดหินแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4-11 ลาดการตัดทางในหินที่มีความเอียงของลาดที่หลากหลาย

เสถียรภาพของลาดหินขึ้นอยู่กับแนววางตัวของชั้นหิน รอยแตกแยก ลักษณะการเชื่อมต่อของรอยแตก พฤติกรรมของหินนั้นควรพิจารณาเป็นบริเวณและกำหนดด้วยลักษณะรอยของแตก ไม่ควรพิจารณาเสถียรภาพเป็นมวลรวมขนาดใหญ่นอกเสียจากลาดเป็นส่วนหนึ่งของหินอัคนีมวลไพศาลที่มีความสมบูรณ์ของมวลอย่างยิ่ง

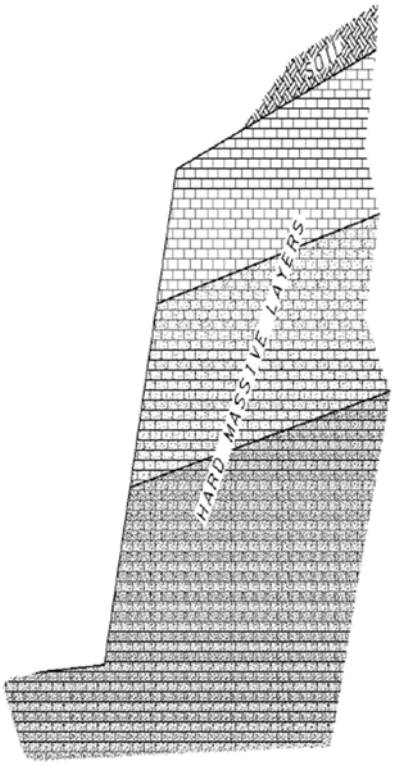
การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดหินควรเป็นการวิเคราะห์แบบสามมิติทั้งนี้เพื่อพิจารณารอยแตกแยกของหินในการวิเคราะห์ อาจใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ ไม่ควรรวมแรงเชื่อมประสานอยู่ในการประเมินกำลังของมวลหิน การวิเคราะห์ควรกระทำด้วยวิศวกรปฐพีผู้มีประสบการณ์

ข้อแนะนำสำหรับการออกแบบลาดหินในกรณีทั่วไปในตารางที่ 4-14 น้ำในหินส่งผลกระทบเชิงลบ 2 ประการต่อเสถียรภาพของลาดกล่าวคือ 1) เพิ่มแรงขับให้ลาดเคลื่อนตัวจากน้ำหนักและแรงดันของน้ำในหิน 2) ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของหินลดต่ำลง วิศวกรควรออกแบบลาดหินในลักษณะที่ป้องกันน้ำมิให้ไหลเข้ามาใกล้ลาดให้มากที่สุด พิจารณาออกแบบให้มีร่องดักน้ำที่ขอบบนของลาด หรือติดตั้งระบบระบายน้ำตามแนวราบจากผิวของลาดเข้าไป ระบบระบายน้ำสามารถติดตั้งได้ทั้งที่บริเวณกลางลาดหรือฐานด้านล่างของลาด

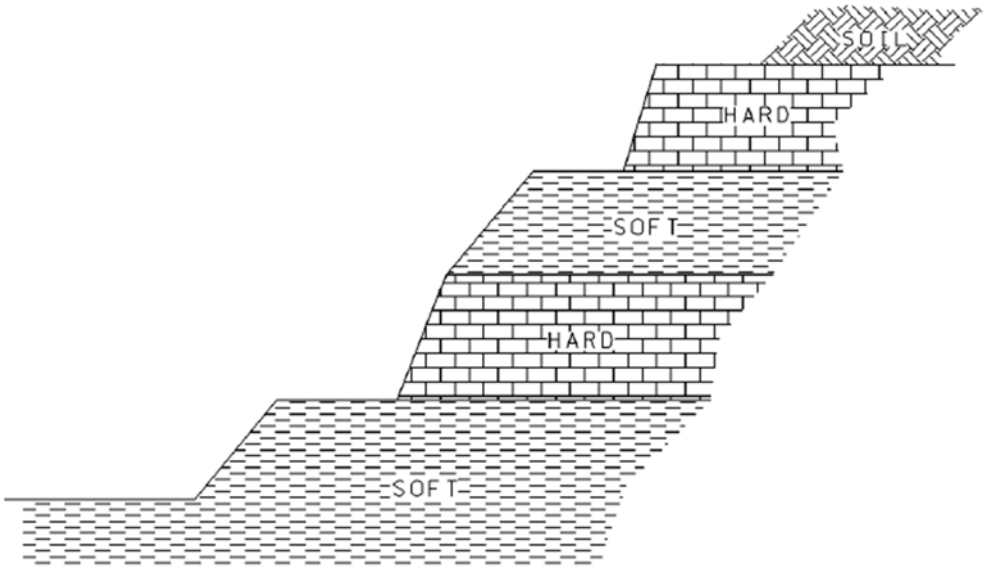
การระเบิดหิน

การระเบิดหินโดยมิได้ควบคุมให้เหมาะสมนั้นเหนี่ยวนำให้รอยแตกในหินเปิดกว้างขึ้น และเป็นการเร่งการเสื่อมสภาพ การแทรกตัวของน้ำเข้าไปในรอยแตก หน้าหินกะเทาะร่วงและลาดมีเสถียรภาพที่ต่ำ การเลือกชนิดและวางแผนการระเบิดควรเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของการออกแบบลาดหิน จากประสบการณ์ที่ผ่านมาพบว่าวิธีแยกระเบิดก่อน (Pre-splitting) ด้วยการฝังระเบิดเป็นแนวและห่างกันน้อยกว่า 1.2 เมตร

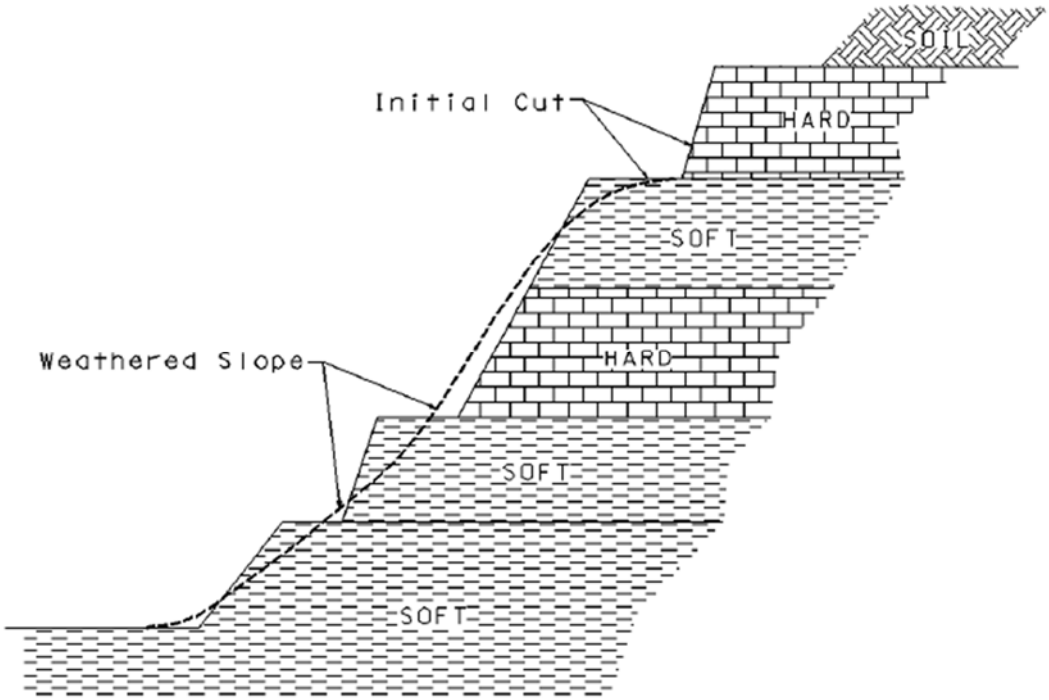
ให้ผลเป็นที่น่าพอใจสำหรับกรณีทั่วไป การเลือกชนิดและวางแผนการระเบิดควรเป็นไปตามคำแนะนำของวิศวกรผู้มีประสบการณ์



รูปที่ 4-12 ลาดการตัดทางในหินที่มีความเอียงเดียว



รูปที่ 4-13 การตัดทางในหินให้มีชั้นหรือหิ้งถาวร



รูปที่ 4-14 การตัดทางในหินให้มีชั้นหรือหิ้งชั่วคราว

ตารางที่ 4-14 ข้อแนะนำสำหรับการออกแบบลาดหินในกรณีทั่วไป

สภาพหิน	การออกแบบลาด
หินแข็ง	เนื้อหินไม่แยกตัวเป็นชั้นอย่างชัดเจน รอยแยกไม่ต่อเนื่องกัน แรงดันน้ำในหินต่ำ ก่อสร้างด้วยวิธีแยกระเบิดก่อน หากมิได้กำหนดเป็นอย่างอื่นให้ความเอียงของลาดหินที่ออกแบบไม่เกิน 70 องศา หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้นการออกแบบให้มีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเป็นกรณีเฉพาะโดยวิศวกร
หินชั้น	หากมุมเอียงเข้าหาลาดดิน กำหนดให้ความเอียงของลาดหินที่ออกแบบไม่เกิน 70 องศา หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้นการออกแบบให้มีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดเป็นกรณีเฉพาะโดยวิศวกร
หินที่มีรอยแตกกระจายอยู่ทั่วไปและหินที่เริ่มผุพังแล้ว	การออกแบบให้มีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดเป็นกรณีเฉพาะโดยวิศวกร
หินชั้นที่เกิดจากดินเหนียว	หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้นการออกแบบให้มีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดเป็นกรณีเฉพาะโดยวิศวกร



การตัดลาดหินเป็นชั้น

วิศวกรควรพิจารณาออกแบบลาดหินให้เป็นชั้น (Bench) เพื่อ 1) ดักหินไม่ให้เคลื่อนที่ลงไปยังบริเวณทางและราง 2) ป้องกันชั้นหินแข็งห้อยจากการเสื่อมสภาพที่ไวกว่าของชั้นหินที่อ่อนซึ่งวางตัวอยู่ด้านล่าง 3) เพื่อลดแรงขับให้ลาดหินเคลื่อนตัวที่ฐานของลาด และ 4) เพื่อปรับปรุงการระบายน้ำผิวดินบนลาด

วิศวกรสามารถออกแบบให้ลาดหินมีชั้นหรือหิ้งอย่างถาวร ในกรณีนี้ควรพิจารณาออกแบบให้ชั้นหิ้งมีความกว้างเพียงพอเพื่อให้สามารถเข้าถึงพื้นเพื่อทำความสะอาดและเก็บเศษหินที่ร่วงได้ ชั้นหิ้งควรมีความกว้างอย่างน้อย 7-10 เมตร

อีกทางเลือกหนึ่งวิศวกรสามารถออกแบบให้มีชั้นหิ้งชั่วคราวในลาดที่มีหินที่ผุพังและเสื่อมสภาพได้เร็ว เช่น หินดินดาน หินผุ หรือหินอื่น ๆ ที่มีกำลังต่ำ และ กะเทาะแตกตัวง่าย เกิดการผุพังเศษหินจะที่ร่วงลงจะกองตัวอยู่บนชั้นหรือหิ้งดังแสดงในรูป ในกรณีเช่นนี้ไม่จำเป็นต้องออกแบบเพื่อให้สามารถเข้าถึงพื้นชั้นหิ้งเพื่อทำความสะอาด

ในกรณีที่ออกแบบเพื่อป้องกันชั้นหินแข็งห้อยจากการเสื่อมสภาพที่ไวกว่าของชั้นหินที่อ่อนซึ่งวางตัวอยู่ด้านล่าง ออกแบบให้ชั้นหินแข็งเขยิบเข้าไปจากชั้นหินที่อ่อนตัวกว่าซึ่งอยู่ด้านล่าง ความกว้างของหิ้งที่เขยิบเข้าไปนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะและอัตราการผุพังของชั้นหินที่อ่อน ความสูงและความเอียงของลาด ในกรณีเช่นนี้ไม่จำเป็นต้องออกแบบเพื่อให้สามารถเข้าถึงพื้นชั้นหิ้งเพื่อทำความสะอาด

ในกรณีที่ลาดหินมีความสูงหรือลึกมาก วิศวกรควรพิจารณาออกแบบให้ลาดหินมีชั้นหรือหิ้งเพื่อเพื่อลดแรงขับให้ลาดหินเคลื่อนตัวที่ฐานของลาด

วิศวกรควรออกแบบสามารถระบายน้ำจากหิ้งได้อย่างรวดเร็ว วิธีการหนึ่งที่ได้ผลดีคือ ตัดให้ชั้นหรือหิ้งเอียงตัวเข้ามาหาลาด หากมีรอยแตกขนาดใหญ่บนหิ้ง อาจออกแบบเพื่อปิดร่องเหล่านั้นด้วยการบดอัดชั้นวัสดุทึบน้ำเช่น ดินเหนียว เป็นต้น

การออกแบบร่องดักหิน

ในบริเวณก่อสร้างลาดในหินที่ไม่แข็งแรงและมีแนวโน้มที่หินจะร่วงและไม่สามารถออกแบบลาดให้มีชั้นหรือหิ้งที่เพียงพอได้ วิศวกรอาจออกแบบให้มีร่องดักหินให้เป็นส่วนหนึ่งของทาง ลาดหินที่อยู่ชิดกับร่องควรมีความชันมากที่สุดเท่าจะที่ปลอดภัย ทั้งนี้เพราะหินที่ตกลงกระทบลาดที่มีความเอียงไม่มากจะกระเด็นเข้าไปในบริเวณทางและราง และ เป็นปัญหากับการจราจรได้

โดยปกติวิศวกรสามารถกำหนดขนาดของความกว้างของร่องดักหินโดยใช้ระยะเดียวกับความกว้างของกองเศษหินที่ร่วงตกลงมาเองโดยธรรมชาติในลาดที่ได้ทำการตัดก่อสร้างไว้เป็นเวลานานแล้ว หากไม่มีข้อมูลดังกล่าวให้พิจารณาออกแบบเผื่อความกว้างของร่องดักหินให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ เหตุเพราะการขยายขนาดความกว้างของการขุดในหินภายหลังการเปิดใช้งานของทางแล้วจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก



<u>คันดินถม</u>

ดินถมมีเพื่อปรับเพิ่มระดับพื้นทางให้อยู่ในระดับที่ต้องการ มีการถมดินเพื่อให้ได้ความลาดของทางที่เหมาะสม หรือ ยกระดับทางให้เหนือระดับน้ำหลากสูงสุดที่ใช้ในการออกแบบ หรือ การยกทางเพื่อให้ข้ามสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ในการออกแบบคันดินถมนั้นต้องพิจารณาสมรรถนะทางวิศวกรรมขององค์ประกอบ 2 ส่วน ได้แก่ 1) คันทาง และ 2) ดินฐานรากซึ่งรองรับคันทาง

วิศวกรพึงออกแบบคันดินถม

- ให้คันดินซึ่งรับน้ำหนักจากการจราจรของรถไฟมีเสถียรภาพ
- ให้คันดินที่รับน้ำหนักจากการจราจรของรถไฟพร้อมทั้งดินฐานรากมีเสถียรภาพ
- ให้มีระดับสูงเพียงพอการเผื่อการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นที่พื้นทาง กล่าวคือแม้เกิดการทุดตัวของโครงสร้างทางขึ้นระดับรางยังอยู่ในแนวที่ยอมรับได้ของการจราจรอยู่

การจะได้คันดินที่ต้องตามวัตถุประสงค์ วิศวกรผู้ออกแบบพึงเลือกใช้วัสดุก่อสร้างคันดินที่เหมาะสม ควบคุมการก่อสร้างและตำแหน่งและระดับของการบดอัด ออกแบบเผื่อระยะการทรุดตัวของคันทาง หากคันทางต้องทำหน้าที่เป็นคันกั้นน้ำด้วย ต้องพิจารณาออกแบบให้คันทางมีความทึบน้ำเพียงพอและมีเสถียรภาพตลอดเวลาแม้ว่าระดับน้ำที่คันกั้นอยู่จะลดลงหรือเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

วิศวกรสามารถคำนวณค่าปรับตัว (Balance Factor) สำหรับประมาณปริมาตรดินถมที่บดอัดแล้วจากปริมาตรดินขุดจากแหล่งยืมทั้งนี้เพราะดินในสภาพทั้ง 2 มีความหนาแน่นและปริมาณความชื้นในดินที่ไม่เท่ากัน ค่าปรับตัวนี้ควรคำนวณจากการทดสอบบดอัดชั้นดินให้มีความหนาแน่นตามที่ต้องการในสนาม วิศวกรอาจพิจารณาเพิ่มค่าปรับตัวเพื่อเผื่อสำหรับปริมาณดินที่หายไประหว่างการขนส่งจากแหล่งยืมมายังแหล่งถม

- ฐานรากของลาดดินถม

ฐานรากของลาดดินถมต้องแข็งแรงมั่นคงโดยมีสมรรถนะทางวิศวกรรมเช่นเดียวกันกับดินฐานรากของฐานรากแบบตื้นในงานโครงสร้างอาคาร ฐานรากของลาดดินต้องสามารถรับน้ำหนักจากดินถมและน้ำหนักจากการจราจรได้อย่างปลอดภัย หากดินฐานรากเป็นดินอ่อนยุบตัวได้มากให้ปรับปรุงดินนั้นก่อนทำการก่อสร้างลาดดิน วิธีการปรับปรุงดินฐานรากสำหรับก่อสร้างลาดดินถมสำหรับทางรถไฟที่ใช้กันทั่วไปได้แก่

- ลอกดินอ่อนออกและบดอัดใหม่
- ก่อสร้างลาดดินเป็นชั้น ๆ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพ
- การวางน้ำหนักก่อนให้ดินบีบตัวคายน้ำแล้วจึงนำน้ำหนักออก
- ติดตั้งอุปกรณ์เพื่อน้ำดึงใต้ดินออกจากดินฐานรากและเหนี่ยวนำให้เกิดการบีบตัวคายน้ำของดิน

ก่อนทำการก่อสร้างต้องลอกวัชพืชที่คลุมดินฐานรากออกเพื่อให้เกิดการยึดเกาะที่ดีระหว่างดินถมกับดินฐานราก



การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินถมและฐานรากควรใช้ทฤษีและวิธีที่ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำที่ดี เช่น Modified Bishop หรือ Bishop Simplified Method หรือ Janbu Simplified Method วิศวกรพึงออกแบบให้ลาดดินถมมีอัตราส่วนปลอดภัยประมาณ 1.5 วิศวกรสามารถออกแบบให้อัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินมากกว่า 1.5 ได้ในกรณีที่ความรู้เกี่ยวกับสมบัติทางวิศวกรรมของดินฐานรากนั้นมีอยู่อย่างจำกัด หากดินฐานรากอ่อนเกินไปจนไม่สามารถรองรับน้ำหนักของลาดดินถมได้ วิศกรสามารถเลือกใช้วิธีดังต่อไปนี้เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินและดินฐานราก

- ขุดลอกดินอ่อนทั้งหมดหรือบางส่วนออกและแทนที่ด้วยชั้นดินบดอัด
- ลดความเอียงของลาดดินและวางกองดินบดอัดถ่วงน้ำหนัก (Berm) ที่ฐานของลาดดินออกแบบก่อสร้างกองดินทอดยาวออกไปเกินระยะที่ระนาบการพังวิบัติตัดกับผิวดินเดิม
- ออกแบบให้มีระบบระบายน้ำใต้ดินเพื่อลดแรงดันน้ำในดิน
- ก่อสร้างคันดินเป็นชั้น ๆ
- หากดินฐานรากเป็นดินทรายหลวม ปรับปรุงดินดังกล่าวให้แน่นด้วยวิธีเช่น การใช้สั่น
- ใช้วัสดุน้ำหนักเบาในการก่อสร้างดินถม
- เสริมกำลังฐานราก เช่นใช้วิธี เสาเข็มดินซีเมนต์ หรือ มีฐานรากรับแรง เช่น เสาเข็ม เป็นต้น
- การวางน้ำหนักก่อนเพื่อเร่งการบีบตัวคายน้ำของดินแล้วจึงนำน้ำหนักออก

วิเคราะห์การทรุดตัวของดินฐานรากโดยเฉพาะกรณีที่ดินฐานรากเป็นดินอ่อน เช่น ดินเหนียว หรือตะกอนทราย วิศวกรควรวิเคราะห์การยุบตัวของลาดดินด้วย ประมาณการทรุดของระดับคันทางโดยรวมการทรุดตัวของลลาดดินและดินฐานรากเข้าด้วยกัน ปรับความสูงของดินคันทางให้เพียงพอเพื่อเผื่อการทรุดตัวโดยรวม เกิดขึ้น กล่าวคือแม้เกิดการทุดตัวของโครงสร้างทางขึ้นระดับรางยังอยู่ในแนวที่ยอมรับได้ของการจราจรอยู่

- วัสดุดินถม

ลาดหรือคันดินถมประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ แกน เปลือก และ ระบบระบายน้ำ หากใช้แกนและเปลือกเป็นวัสดุเดียวกันลาดดินจะเป็นเนื้อเดียว หากคันดินต้องทำหน้าที่เป็นคันกันน้ำด้วยแกนต้องก่อสร้างจากวัสดุที่ทึบน้ำเช่น ดินเหนียวที่บดอัดด้านเปียกของ Optimum Water Content ในส่วนของเปลือกอาจเป็นวัสดุที่แข็งแรงและน้ำไหลระบายผ่านได้ดีกว่า

ควรออกแบบลาดหรือคันดินถมโดยให้เป็นไปตามผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ให้วิศวกรปฐพีที่รับผิดชอบเป็นผู้กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโดยอ้างอิงจากผลการทดสอบดินทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ อัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินขึ้นอยู่กับ ดินที่นำมาก่อสร้าง การบดอัด ขนาดและตำแหน่งของกองดินบนอัดเพื่อเพิ่มเสถียรภาพ กำลังของดินหลังจากการบดอัดแล้ว หากมิได้มีผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ



โดยอ้างอิงจากผลการทดสอบดินทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ แนะนำให้ความเอียงของลาดดินที่ปลอดภัยคือ 2 (ทางราบ) ต่อ 1 (ทางดิ่ง) หรือน้อยกว่า สำหรับทั้งดินทรายและดินเหนียว

วิศวกรควรพิจารณาผลกระทบจากการก่อสร้างคันดินถมที่มีต่อการระบายน้ำในพื้นที่ การระบายน้ำที่มีประสิทธิภาพจะเพิ่มเสถียรภาพ สมรรถนะ และความปลอดภัยของลาดดิน พิจารณาการทรุดตัวของคันดิน กรณีที่มีท่อลอดผ่านเพื่อระบายน้ำ ให้เผื่อระดับท่อลอดในกรณีที่เกิดการทรุดตัวของคันดินและท่อลอด ทั้งนี้เพื่อให้ท่อลอดยังมีความเอียงเพียงพอที่น้ำจะไหลผ่านไปในทิศทางที่ต้องการได้

ดินสำหรับก่อสร้างลาดดินถมนั้นมีอยู่มากมายหลายประเภทซึ่งการทำงานมีความยากง่ายต่างกัน ปัจจัยหลักหนึ่งที่ใช้ในการเลือกดินถม คือ เป็นดินที่ได้มาโดยประหยัด ดินที่นำมาก่อสร้างคันดินอาจเป็นดินมวลหยาบ เช่น กรวด หรือ ทราย หรือ ดินมวลละเอียด เช่น ตะกอนทราย หรือ ดินเหนียว โดยปกติแล้วดินมวลหยาบจะมีมุมเสียดทานภายในมากกว่าดินมวลละเอียด ดินมวลหยาบสามารถบดอัดได้ดีด้วยการใช้อุปกรณ์แบบสั่น และโดยปกติจะได้ความหนาแน่นหลังจากการบดอัดแล้วมากกว่า น้ำเป็นตัวช่วยเพิ่มประสิทธิผลสำหรับการบดอัดดินประเภทนี้ ดัชนีที่ควรใช้วัดระดับการบดอัดของดินมวลหยาบคือความหนาแน่นสัมพัทธ์

ดินมวลละเอียดนั้นประกอบไปด้วยตะกอนทรายและดินเหนียว ลักษณะเฉพาะตัวของดินมวลละเอียดที่ต้องพิจารณาระหว่างการออกแบบคันดินถมมีดังนี้

- ความชื้นในดินส่งผลอย่างยิ่งต่อผลการบดอัดดิน
- กำลังของดินจะเพิ่มขึ้นตามระดับของการบดอัด
- หากน้ำไหลซึมเข้าไปในมวลดินจนอิ่มน้ำ กำลังของดินจะต่ำลง
- กำลังของดินมวลละเอียดประมาณได้จากพารามิเตอร์สองตัว คือ มุมเสียดทานภายใน และแรงเชื่อมประสาน
- การบดอัดจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้นถบดตีนแกะ
- ปริมาณดินเหนียว (Clay Content) ในดินมวลละเอียดที่เพิ่มขึ้นจะให้ดินบวมตัวและหดตัวจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินได้ดียิ่งขึ้น

ความทนทานต่อการกัดเซาะของดินหลายชนิดสรุปในตารางที่ 4-15 และตารางที่ 4-16 หลักที่ 7 เสถียรภาพของลาดดินถมที่บดอัดแล้วจากดินชนิดต่าง ๆ อยู่ในหลักที่ 10 และ 11 ของ ตารางที่ 4-15 และตารางที่ 4-16

แหล่งดินเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับโครงการก่อสร้างดินถม พิจารณาค่าใช้จ่ายในส่วนการขุด การขนย้าย และการก่อสร้างสำหรับเลือกแหล่งดินถมที่เหมาะสมที่สุด ดินถมอาจได้มาจากการขุดดินบริเวณใกล้เคียงโครงการ จากแหล่งยืม หรือ สั่งซื้อจากผู้ผลิต วิศวกรสามารถกำหนดให้มีการปรับปรุงดินถมเพื่อเพิ่มเสถียรภาพลาดดิน วิธีการปรับปรุงดินนั้นมีด้วยกันหลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน การเลือกวิธีการปรับปรุงดินเพื่อให้ได้สมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการโดยต้องเหมาะสมกับเครื่องมือเครื่องจักร องค์ความรู้ และเป็นไปโดยประหยัด วิธีการที่ใช้ปรับปรุงดินถมโดยทั่วไปแสดงในตารางที่ 4-17



- ดินถมใหม่ข้างลาดดินเดิม

การออกแบบและก่อสร้างดินถมใหม่ข้างลาดดินเดิมเกี่ยวพันกับการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินทั้งลาดดินด้านล่างและด้านบน การวิเคราะห์เสียรภาพให้ทำแยกวิเคราะห์ของแต่ละลาด และ วิเคราะห์เสถียรภาพรวม

การก่อสร้างต้องป้องกันไม่ให้ลาดดินใหม่ไถลบนลาดดินเดิม ให้พิจารณาดำเนินการดังต่อไปนี้

- นำพืชที่คลุมลาดดินเก่าออกให้หมด
- เซาะลาดดินเก่าให้เป็นขั้นบันไดหรือเป็นร่องลดหลั่นไปตามลำดับ
- บดอัดดินในขั้นหรือร่อง ปรับแต่งให้ผิวไม่เรียบทั้งนี้เพื่อให้มีความฝืดและเพิ่มแรงเกาะยึดระหว่างผิว
- ต้องให้มีระบบระบายน้ำที่ลาดดินด้านบนที่เพียงพอเพื่อป้องกันน้ำขังและซึมผ่านลงไปตามรอยต่อระหว่างลาดดินเก่ากับลาดดินใหม่
- ต้องมีการจัดการเพื่อป้องการการเซาะผิวหน้าของลาดดิน
- ป้องกันมิให้มีการขุดดินที่ฐานของลาดดินถมใหม่ด้านล่างและป้องกันมิให้มีการวางน้ำหนักทับกดทับลาดดินด้านบน ทั้งนี้เพราะเป็นการเพิ่มแรงผลักที่จะทำให้ลาดดินใหม่เคลื่อนตัว

- หินถม

หินถมมีแนวโน้มที่จะยุบตัวในแนวดิ่งเมื่อเวลาใช้งานของทางเพิ่มขึ้นทั้งนี้เกิดจากการอัดตัวแน่นขึ้นของหินถมเอง ปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยกระบวนการยกทางและเติมหิน อย่างไรก็ตามหากไม่สามารถยอมรับการทรุดตัวของทางในระดับดังกล่าวได้เลยได้วิศวกรควรเลือกใช้สะพานสำหรับรองรับทางแทน

หินถมอ่อน

หินถมอ่อนหมายถึงวัสดุหินที่ได้จากการใช้เครื่องมือกลปกติกัดเซาะหินออกมาจากแหล่ง หรือหินที่เสื่อมสภาพลงอย่างเร็วเมื่อนำออกมาจากแหล่งและเผชิญกับสภาพอากาศแบบต่าง ๆ แม้ว่าจะผลิตจากการระเบิดก็ตาม

หินถมอ่อนอาจทำให้คันทางทึบน้ำได้ดังนั้นควรจัดหาระบบระบายน้ำที่เหมาะสม การออกแบบลาดดินต้องอยู่บนพื้นฐานของผลการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการ โดยต้องคำนึงถึงการลดลงของกำลังวัสดุตามเวลา แนะนำให้ความเอียงมากที่สุดของลาดหินถมอ่อนที่มีความสูงไม่เกิน 10 เมตร เป็น 2 (แนวราบ) ต่อ 1 (แนวดิ่ง) การออกแบบลาดจากหินถมอ่อนควรอยู่ในดุลยพินิจของวิศวกรปฐพี

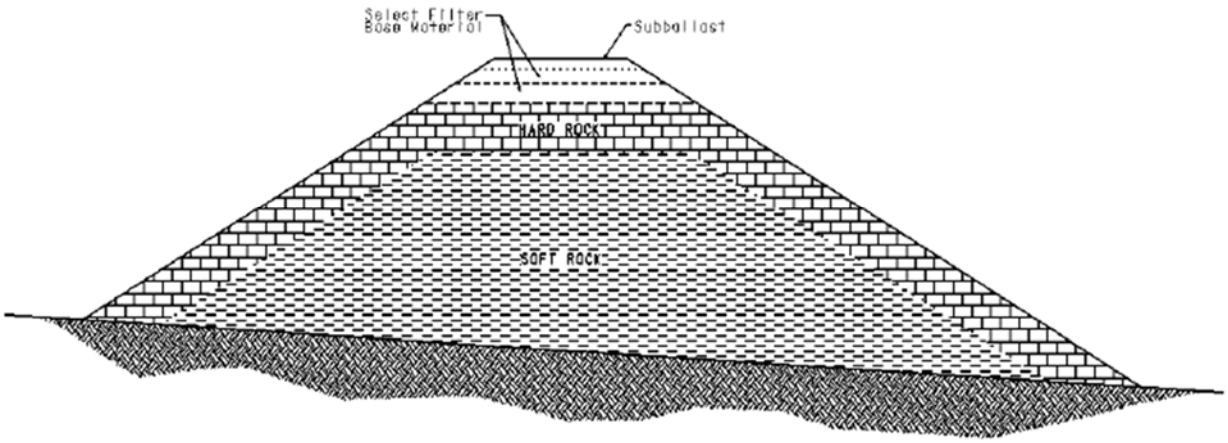
หินถมแข็ง

โดยปกติหินแข็งได้จากการระเบิดแหล่งหิน หินถมแข็งมีความแข็งแกร่งและไม่เสื่อมสภาพเร็วนักเมื่อเทียบกับเวลา เวลา ความเอียงมากที่สุดของลาดหินถมอ่อนที่มีความสูงไม่เกิน 17 เมตร ให้เป็น 1.5 (แนวราบ) ต่อ 1 (แนวดิ่ง) หากลาดสูงกว่านั้นให้ความเอียงมากสุดเป็น 2 (แนวราบ) ต่อ 1 (แนวดิ่ง)

ปริมาณช่องว่างของหินถมแข็งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการยุบตัวในแนวดิ่ง วิศวกรสามารลดการทรุดตัวเหล่านี้ได้โดยการก่อสร้างและบดอัดหินเป็นชั้นโดยแต่ละชั้นหนา 60 ถึง 75 เซนติเมตร และขนาดของหินต้องไม่หนาเกินความหนาของชั้น แนะนำให้ใช้รถบดที่หนักกว่า 5 ตันเพื่อบดอัดให้หินถมมีความหนาแน่น 83-88% ของความหนาแน่นของหินในแหล่งตามธรรมชาติ

ตำแหน่งของหินถมอ่อนและแข็งในลาด

หากออกแบบให้ใช้ทั้งหินถมอ่อนและแข็งในคันทางเดียวกัน วิศวกรกำหนดตำแหน่งการวางสำหรับหินทั้งสองชนิดเพื่อให้เกิดสมรรถนะโดยรวมของคันหินสูงสุด พิจารณาออกแบบให้ลาดหินเป็นไปตามรูปที่ 4-15 กล่าวคือให้หินถมอ่อนเป็นแกนอยู่ด้านในและหินแข็งเป็นเกราะหรือเปลือกด้านนอก ทั้งนี้เพราะหินที่อ่อนด้านในจะได้รับการปกป้องจากการเสื่อมสภาพด้วยหินแข็งด้านนอก หินถมอ่อนนั้นบดอัดได้ดีให้ได้ความหนาแน่นมากกว่าดังนั้นการเลือกใช้หินถมอ่อนเป็นแกนจะลดการทรุดตัวโดยรวมคันทางได้



รูปที่ 4-15 ตำแหน่งของหินถมอ่อนและแข็งในลาด

ตารางที่ 4-15 ความเหมาะสมของดินมวลหยาบชนิดต่าง ๆ สำหรับเป็นวัสดุดินถม

(1)		(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Symbol		Soil Group	Field Identification	Frost Heaving	Drainage	Value as Filter Layer	Erosion on Exposed Slope	Value as Subgrade	Pumping Action	Stability in Compacted Fills	Compaction Characteristics	Typical Duty Type Geotextile Fabric Use
Gravels	GW	Well-graded GRAVELS and well-graded GRAVELS with SAND mixtures, trace to no silt or clay	Wide range in grain sizes, substantial amounts of all intermediate sizes, no dry strength	None to very slight	Excellent	Fair	None*	Excellent	None	Very Good	Excellent; crawler-type tractor, rubber-tired roller, steel-wheeled roller	None required
	GP	Poorly-graded GRAVELS and poorly-graded GRAVEL with SAND mixtures, trace to no silt or clay	Predominantly one size, or a range of sizes with some missing, no dry strength	None to very slight	Excellent	Fair to poor	None*	Excellent	None	Reasonably good	Good; crawler-type tractor, rubber-tired roller, steel-wheeled roller	None required
	GM	SILTY GRAVEL and SILTY GRAVEL with sand mixture	Fines with low or no plasticity, slight to no dry strength	Slight to medium	Fair to very poor	Very poor	None to slight	Good	None	Reasonably good	Good with close moisture control; rubber-tired roller, sheepfoot roller	None required
	GC	CLAYEY GRAVEL and CLAYEY GRAVEL with sand mixture	Plastic fines, medium to high dry strength	Slight to medium	Poor to very poor	Not to be used	None to slight	Good	Slight	Fair	Excellent; rubber-tired roller, sheepfoot roller	None required
Sands	SW	Well-graded SAND and well-graded SAND with GRAVEL mixtures, trace to no silt or clay	Wide range in grain sizes, substantial amounts of all intermediate sizes, no dry strength	None to very slight	Excellent	Excellent	Slight to high with decreasing gravel content	Excellent	None	Very good	Excellent; crawler-type tractor, rubber-tired roller	None required
	SP	Poorly graded SAND and poorly graded SAND with GRAVEL mixtures, trace to no silt or clay	Predominantly one size, or a range of sizes with some missing, no dry strength	None to very slight	Excellent	Fair to poor	High	Good	None	Reasonably good with flat slopes	Good; crawler-type tractor, rubber-tired roller	None required
	SM	SILTY SAND and SILTY SAND with GRAVEL mixtures	Fines of low to no plasticity, slight to no dry strength	Slight to high	Fair to very poor	Very poor	High	Poor	None to slight	Fair	Good with close moisture control; rubber-tired roller, sheepfoot roller	Slight regular
	SC	CLAYEY SAND and CLAYEY SAND with GRAVEL mixture	Plastic fines, medium to high dry strength	Slight to high	Very poor	Not to be used	Slight	Poor	Slight	Fair	Excellent; rubber-tired roller, sheepfoot roller	Slight regular

ตารางที่ 4-16 ความเหมาะสมของดินมวลหยาบชนิดต่าง ๆ สำหรับเป็นวัสดุดินถม

(1)		(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Symbol		Soil Group	Field Identification	Frost Heaving	Drainage	Value as Filter Layer	Erosion on Exposed Slope	Value as Subgrade	Pumping Action	Stability in Compacted Fills	Compaction Characteristics	Typical Duty Type Geotextile Fabric Use
Silts and Clays	Of Low Plasticity	ML	SILT or SILT with SAND or GRAVEL; SANDY SILT or SANDY SILT with GRAVEL; GAVELLY SILT or GRAVELLY SILT with SAND mixture	Fine grained, slight to no dry strength	Medium to very high	Fair to very poor	Not to be used	Very high	Poor	Slight to bad	Poor	Poor to good with close control of moisture; rubber-tired roller; sheepfoot roller	Yes regular
		CL	Lean CLAY or Lean CLAY with SAND or GRAVEL; SANDY LEAN CLAY or SANDY Lean CLAY with GRAVEL; GRAVELLY Leam CLAY or GRAVELLY Lean CLAY with SAND mixtures	Medium to high dry strength	Medium to high	Very poor	Not to be used	None to slight	Bad	Bad	Reasonable	Fair to good; rubber-tired roller, sheepfoot roller	Yes heavy
	Of High Plasticity	MH	Elastic SILT or elastic SILT with SAND or GRAVEL; SANDY elastic SILT or SANDY elastic SILT with GRAVEL; GRAVELLY elastic SILT or GRAVELLY elastic SILT with SAND mixtures	Slight to medium dry strength	Medium to very high	Poor to very poor	Not to be used	None to slight	Bad	Very bad	Poor	Poor to very poor; sheepfoot roller	Yes heavy
		CH	Fat CLAY or fat CLAY with SAND or GRAVEL; SANDY fat CLAY or SANDY fat CLAY with GRAVEL; GRAVELLY fat CLAY or GRAVELLY fat CLAY with SAND mixtures	Sticky when wet, high dry strength	Medium	Very poor	Not to be used	None	Bad	Very bad	Fair with flat slopes	Fair to poor; sheepfoot roller	Yes extra heavy
ORGANIC		OH	Organic SILT or CLAY and with SAND or GRAVEL; SANDY or GRAVELLY organic SILT or CLAY with GRAVEL or SAND respectively	High smell, dark colour, mottled appearance, slight to high dry strength	Medium to high	Poor to very poor	Not to be used	Variable	Bad	Very bad	Not to be used	Poor to very poor	Yes extra heavy
		PT	PEAT	Dark colour, spongy feel and fibrous texture	Slight to high	Poor	Not to be used	Not applicable	Remove completely	Very bad	Not to be used	Compaction not possible	Yes extra heavy

Adapted from ASTM Method D 2487T

NOTES:

Column 2: Soil types in capitals and underlined make up more than 50% of sample. Other soil types in capitals make up more than 5%.

Column 4: Tendency of soil to frost heave.

Column 5: Ability of soil to drain water by gravity. Drainage ability decreases with decreasing average grain size.

Column 6: Value of soil as filter backfill around subdrain pipes to prevent clogging with fines, and as filter layer to prevent migration of fines from below.

Column 7: Ability of natural soil to resist erosion on an exposed slope. Soils marked * may be used to protect eroding slopes of other materials.

Column 8: Value as stable subgrade for roadbed, when protected by suitable ballast and sub-ballast material. Good soils may be used to protect poorer soils in subgrade.



ตารางที่ 4-17 วิธีการปรับปรุงดิน

Improvement by	Methods	Procedure
Densification	Compaction	Rolling or vibrating of fill in layers with moisture control.
	Other Methods*	Vibration in depth (Vibrofloation – patented method) Compaction piles, blasting, dynamic compaction, compaction grouting, geo-piers.
Drainage	Gravity Pumping Consolidation* Transpiration	Gravity removal of water using surface and subsurface drains. Mechanical removal of water. Surcharge loading with drainage. Planting or seeding with vegetation.
Modification	Blending* Cement, lime, bitumen or calcium chloride*	Adding select soil, mixing, compacting. Adding to soil in small quantities, mixing with moisture control, compacting, curing.
*Method requires specialist advice.		

4.3.3 การก่อสร้าง

<u>การเตรียมพื้นที่</u>

ผู้รับผิดชอบการก่อสร้างทางต้องจัดให้มีการเตรียมสถานที่บริเวณโครงการก่อสร้างให้เรียบร้อย พิจารณาป้องกันไม่ให้ระบบสาธารณูประโภคที่มีอยู่เดิมเสียหาย หากจำเป็นให้ทำการย้ายระบบสาธารณูประโภคเหล่านั้นไปอยู่ในที่ ๆ เหมาะสม ผู้รับผิดชอบการก่อสร้างต้องนำสิ่งกีดขวางออกจากพื้นที่บริเวณที่เกี่ยวข้องกับงานดินทั้งหมด รวมถึงบริเวณที่จะก่อสร้างร่องระบายน้ำ หรือ คันกั้นน้ำ

ให้เตรียมและถางพื้นที่ไม่น้อยกว่า 2 เมตรขึ้นไปจากระดับการตัดทาง หรือ ไม่น้อยกว่า 2 เมตรจากฐานของลาดทางตัด หรือ คันดินถมออกไป การเตรียมพื้นที่ประกอบไปด้วย การนำต้นไม้ ตอไม้ พุ่มไม้ หรือ สิ่งอื่นใดที่ไม่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางออกจากพื้นที่ที่กำหนด ปิดช่องว่างและโพรงที่เกิดขึ้นจากจากเตรียมพื้นที่ให้เรียบร้อยด้วยวัสดุที่แข็งแรงและต้องทำการบดอัดให้มีความแข็งแรงไม่ยุบ วัสดุที่ได้จากการเตรียมพื้นที่ให้ขนย้ายและจัดการนอกบริเวณโครงการก่อสร้าง

4.3.4 การลอกหน้าดินและนำวัสดุที่ไม่แข็งแรงออก

ผู้รับผิดชอบการก่อสร้างต้องพิจารณาลอกหน้าดินที่ไม่แข็งแรงมีสมรรถนะทางวิศวกรรมที่ต่ำออก วัสดุที่จัดว่าไม่แข็งแรงและต้องถูกนำออกได้แก่ หน้าดินอ่อน ดินที่มีอินทรีย์วัตถุปนอยู่เป็นจำนวนมาก เศษไม้ ตอไม้ วัสดุที่ย่อยสลายได้ วัสดุที่ถูกนำมาทิ้งจากแหล่งอื่น ก้อนหิน วัสดุติดไฟ ดินที่เกิดการกัดเซาะได้ง่าย เช่นทรายละเอียด หากพบวัสดุหน้าดินที่ไม่แข็งแรงลงไปในระดับที่ลึกมาก อาจต้องมีการปรับปรุงดิน การจัดการให้เป็นไปตามคำแนะนำของวิศวกรปฐพีที่ได้รับมอบหมาย



งานขุด หรือ ตัดทาง

รูปตัดการขุดดินต้องเป็นไปตามแบบอย่างเคร่งครัด และอยู่ภายใต้การดูแลของวิศวกรผู้รับผิดชอบ พิจารณาป้องกันไม่ให้ระบบสาธารณูประโภคที่มีอยู่เดิม เช่น สายไฟฟ้า สายสัญญาณ ท่อประปา ท่อแก๊ส เสียหาย ผู้รับผิดชอบการก่อสร้างต้องจัดให้มีระบบระบายน้ำที่เพียงพอตลอดเวลาที่ขุดตัดทาง รางระบายน้ำต้องมีความยาวและความเอียงเหมาะสม การระบายดินออกควรจัดเส้นทางเฉพาะให้ยานพาหนะเพื่อเลี่ยงไม่ให้ยานพาหนะก่อให้เกิดการเคลื่อนตัว แอ่ง หลุมบนผิวดินที่ตัด หรือ ขุดแล้ว ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้น้ำขังตัว ดินอ่อนกำลังลง อันจะนำมาซึ่งปัญหาในภายหลัง ผู้รับผิดชอบการก่อสร้างควรจัดหาระบบที่เหมาะสมสำหรับป้องกันฝุ่นจากการดำเนินงานทั้งหมด

สำหรับการขุดในดิน หากดินพื้นทางที่เปิดออกไม่แข็งแรงเพียงพอ วิศกรอาจพิจารณานำหน้าดินออกและแทนที่วัสดุที่แข็งแรงกว่า การบดอัดให้เป็นไปดุลยพินิจของวิศวกรผู้รับผิดชอบ พิจารณาก่อสร้างร่องดักน้ำที่ยอดของหลุมตัดเพื่องลดปริมาณน้ำที่จะไหลเข้าบ่อ หากวิศวกรพิจารณาแล้วเห็นว่าวัสดุที่ขุดออกมานั้นมีความแข็งแรงไม่เพียงพอและไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุถมให้นำวัสดุขุดเหล่านั้นออกไปเพื่อจัดการนอกบริเวณโครงการก่อสร้าง

สำหรับการขุดในหิน ผู้รับผิดชอบการก่อสร้างต้องควบคุมงานอย่างพิถีพิถัน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นกับผิวหินลึกเกินไปกว่าที่ระบุในแบบก่อสร้าง หากหลังจากการระเบิดแล้วมีส่วนของหินที่อาจจะเสียเสถียรภาพได้ในอนาคต วิศวกรสามารถให้ดำเนินการเอาส่วนหินเหล่านั้นออก หากเอาออกไม่ได้ให้เสริมกำลังส่วนดังกล่าวให้มีเสถียรภาพ โดยค่าใช้จ่ายผู้รับผิดชอบการก่อสร้างเป็นผู้ออก พื้นของการขุดหรือตัดในหิน ต้องมีการระบายน้ำที่ดี ไม่ควรมีน้ำขังได้ในช่วงเวลาใด ๆ

ขนาดและรูปตัดลาดดิน หรือ หิน และพื้นที่เกิดจากการขุด หรือ ตัดทางที่กำหนดในแบบนั้นเป็นไปตามสมมุติฐานที่ว่าวัสดุที่คาดว่าจะพบในงานก่อสร้างเป็นอย่างเดียวกับวัสดุที่ออกแบบ ระหว่างการก่อสร้างต้องพิจารณาว่าวัสดุที่พบจริงนั้นเป็นไปตามที่คาดการณ์หรือออกแบบไว้หรือไม่ หากเบี่ยงเบนไปต้องแจ้งให้วิศวกรผู้รับผิดชอบทราบเพื่อปรับแก้และควบคุมให้การก่อสร้างเป็นไปด้วยความปลอดภัย พิจารณาเผื่อระดับการขุดสำหรับวางชั้นรองหินโรยทาง ระดับความเอียงของพื้นทางการขุด หรือ ตัดทางจากกึ่งกลางของทางให้เป็นไปตามที่กำหนดในแบบ

หากไม่ได้ระบุเป็นการเฉพาะและความลึกของการขุดไม่เกิน 7 เมตร อาจพิจารณาควบคุมให้ความเอียงสำหรับการขุด หรือ ตัดทางให้เป็นไปตามค่าที่แนะนำตารางที่ 4-18



ตารางที่ 4-18 ความเอียงแนะนำสำหรับการขุดหรือตัดทางในดินหรือหินในกรณีที่การขุด หรือ ตัดทางลึกไม่เกิน 7 เมตร

วัสดุ		ความเอียง	
		ระยะตามแนวนอน	ระยะตามแนวตั้ง
1	ทราย	2	1
2	ดินเหนียวเปียก กรวดร่วน	2	1
3	ดินเหนียวปนทราย หินก้อนใหญ่ ดินเหนียว ดินบดอัดปนกรวด	1.75	1
4	หินความแข็งแรงต่ำ	1.5	1
5	หินดินดานที่ระนาบโครงสร้างเอียงเข้าหาทางรถไฟ กรวดที่มีการเชื่อมประสาน	1	1
6	หินทั่วไป	1	1
7	หินแข็ง	0.25	1
ใช้กับงานขุดหรือตัดลึกไม่เกิน 7 เมตร			

งานถม และ ก่อสร้างคันทาง

หน้าตัดการถมดินต้องเป็นไปตามแบบอย่างเคร่งครัด และอยู่ภายใต้การดูแลของวิศวกรผู้รับผิดชอบ วิศวกรควรพิจารณาเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมจากการขุดในบริเวณโครงการก่อสร้างก่อนพิจารณาเลือกใช้วัสดุจากแหล่งภายนอก ผู้รับผิดชอบการก่อสร้างต้องจัดให้มีระบบระบายน้ำที่เพียงพอตลอดเวลา รางระบายน้ำต้องมีความยาวและความเอียงเหมาะสม การถมดินควรกระทำด้วยความระมัดระวังเพื่อป้องกันผลกระทบเชิงลบต่อส่วนประกอบอื่นของทางที่ได้ก่อสร้างไปแล้ว เช่น ร่องระบายน้ำ หรือทางระบายน้ำตามธรรมชาติ การนำวัสดุถมเข้าออกควรจัดเส้นทางเฉพาะให้ยานพาหนะเพื่อเลี่ยงไม่ให้มีการเคลื่อนตัว แอ่ง หลุมบนผิวดินถม ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้น้ำขังตัว ดินอ่อนกำลังลง อันจะนำมาซึ่งปัญหาในภายหลัง ผู้รับผิดชอบการก่อสร้างควรจัดหาระบบที่เหมาะสมสำหรับป้องกันฝุ่นจากการดำเนินงานทั้งหมด

ผู้รับผิดชอบการก่อสร้างพึงเตรียมฐานของส่วนดินถม ขั้นตอนประกอบด้วยการเตรียมพื้นที่ ลอกหน้าดินและหรือวัสดุที่มีกำลังต่ำไม่มีเสถียรภาพออก และนำวัสดุที่แข็งแรงเข้ามาบดอัดทดแทน ในกรณีที่จะก่อสร้างคันดินบนลาดดินตามธรรมชาติหรือลาดดินที่ก่อสร้างไว้อยู่ก่อนแล้ว ควรพิจารณาตัดลาดดินเดิมดังกล่าวให้เป็นขั้นคล้ายบันได โดยขั้นควรมีความกว้างอย่างน้อย 1.5 เมตร หากวัสดุที่ขุดออกมาจากการทำขั้นมีความเหมาะสมสามารถใช้วัสดุดังกล่าวสำหรับบดอัดเพื่อก่อสร้างคันดินได้ แต่หากไม่เหมาะสมให้นำออกและจัดการนอกบริเวณโครงการก่อสร้าง บริเวณฐานรากของคันดินนั้นควรขูดผิวดินเป็นร่อง หรือ ริ้ว ไปตามความยาวของคันดิน ควรวางวัสดุถมหนาอย่างน้อย 10 ซม จากนั้นทำการบดให้วัสดุใหม่แทรกตัวเข้าไปในดินฐานราก การทำเช่นนี้จะทำให้เกิดแรงจับยึดระหว่างดินสองส่วนและลดโอกาสที่จะเกิดการไถล

เมื่อก่อสร้างคันดินบนดินฐานรากอ่อน เช่น ดินเหนียว หรือเป็นที่ลุ่มมีน้ำท่วมได้ การออกแบบและก่อสร้าง รวมถึง การลอกดิน หรือ การนำดินอ่อนมาใช้ประโยชน์อย่างอื่น การใช้วัสดุเสริมกำลัง และเทคนิคการก่อสร้างให้เป็นไปตามคำแนะนำของวิศวกรปฐพีที่ได้รับมอบหมาย



ผู้รับผิดชอบการก่อสร้างพึงจัดหาเครื่องจักรหรืออุปกรณ์สำหรับบดอัดดินสอดรับกับอัตรากการถมดิน โดยปกติรถบดแบบตีนแกะสามารถบดอัดดินมวลละเอียด เช่น ดินเหนียว และ ตะกอนทราย ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่รถบดแบบสั่นจะใช้งานได้ดีกับดินทราย หรือ กรวด เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานต้องสามารถบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นเป็นไปตามที่ระบุในมาตรฐาน มขร S-T-004

- วัสดุถมสำหรับก่อสร้างคันทาง

คันทางรถไฟควรประกอบไปด้วยดินบดอัดสองส่วนคือ ส่วนดินถมโครงสร้าง และส่วนดินถมทั่วไป สมบัติดินสำหรับก่อสร้างดินถมส่วนโครงสร้างควรเป็นไปตามข้อแนะนำในตารางที่ 4-19

ตารางที่ 4-19 สมบัติของดินถมสำหรับก่อสร้างชั้นดินถมโครงสร้าง

มาตรฐานการทดสอบ	ข้อกำหนด	เกณฑ์	ความถี่ในการทดสอบ
ASTM C 117 ASTM D 422	การคละขนาดอนุภาค ร้อยละผ่านตะแกรง 53 มม ร้อยละผ่านตะแกรง 2.36 มม ร้อยละผ่านตะแกรง 0.43 มม ร้อยละผ่านตะแกรง 0.075 มิลลิเมตร	 80-100 15-100 0-70 0-30	หนึ่งการทดสอบ ทุก ๆ 50 ลูกบาศก์เมตร
ASTM D 4318	พิกัดเหลว	มากสุด 35	
ASTM D 4318	ดัชนีพลาสติก	มากสุด 11	
ASTM D 698	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	ต่ำสุด 1.8 ตัน/ลูกบาศก์เมตร	
ASTM D 1883	ค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (บดอัดมาตรฐาน)	อย่างน้อย 8 %	

- การถมดิน

ระหว่างการก่อสร้างคันทางควรถมดินเป็นชั้นให้เต็มทั้งความกว้างทั้งชั้นและทำการบดอัด หากออกแบบให้มีคันดินถ่วงน้ำหนัก (Stabilization berm) ควรก่อสร้างคันดินถ่วงน้ำหนักขึ้นเป็นชั้นเท่ากันและพร้อมกันกับคันดินหลัก โดยปกติแล้วความหนาสำหรับบดอัดแต่ละชั้นควรไม่เกิน 20 เซนติเมตร หากใช้ความหนามากกว่า 20 เซนติเมตร ต้องพิสูจน์ทราบได้ว่าความหนาที่ใช้ยังให้ค่าการบดอัดตามเกณฑ์ที่กำหนด หลีกเลี่ยงการใช้วัสดุที่แตกต่างกันมากในการบดอัด (ทั้งในชั้นเดียวกัน หรือ ระหว่างชั้น) ขนาดอนุภาคของวัสดุที่นำมาบดอัดต้องไม่มากกว่า 2 ใน 3 ของความหนาสำหรับบดอัดชั้นดิน ระหว่างก่อสร้างต้องจัดให้มีระบบระบายน้ำที่ดี น้ำไม่ท่วมขัง ป้องกันไม่ให้เกิดการกัดเซาะ ปรับแต่งผิวบนของคันดินให้เรียบตามระดับที่ต้องการและพร้อมสำหรับการก่อสร้างชั้นรองหินโรยทางต่อไป แนะนำให้ความเอียงของลาดดินถมที่ปลอดภัยคือ 2 (ทางราบ) ต่อ 1 (ทางดิ่ง) หรือน้อยกว่า สำหรับทั้งดินทรายและดินเหนียว



- การบดอัดดินคันทาง

ต้องบดอัดดินที่ปริมาณน้ำในดินตามที่กำหนดทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่าการบดอัด (ความหนาแน่นแห้งสูงสุด) ตามเกณฑ์ ซึ่งโดยปกติอยู่ในไม่เกินช่วง 2% ของ ปริมาณน้ำที่ความหนาแน่นสูงสุด เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำในดินตามที่กำหนดอาจต้องพรมน้ำอย่างสม่ำเสมอบนชั้นดินที่จะบดอัดหรือตากหรือพึ่งชั้นดินเพื่อลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่ต้องการ วิศวกรอาจพิจารณาผสมดินแห้งเข้าไปในดินเปียกเพื่อลดความชื้นในดินก่อนการบดอัด ระหว่างการบดอัดสามารถเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างชั้นด้วยการพรมน้ำให้เปียกหรือการเซาะร่องในชั้นที่บดอัดแล้วก่อนการบดอัดชั้นต่อไป

หากระหว่างการบดอัดความหนาแน่นของดินคันทางไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน มขร S-T-004 ให้หยุดการดำเนินการและให้รื้อชั้นดินดังกล่าวขึ้น เพิ่ม หรือ ลดปริมาณความชื้นในดินจากนั้นทำการบดอัดใหม่ ทำเช่นนี้จนกว่าจะได้ความหนาแน่นของดินคันทางเป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน การผสมปูนขาว เถ้าลอย หรือ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในดินสามารถเพิ่มประสิทธิผลของการบดอัดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของวิศวกร และข้อกำหนดสำหรับการบดอัดดินคันทางให้เป็นไปตามตารางที่ 4-20

ตารางที่ 4-20 ข้อกำหนดสำหรับการบดอัดดินคันทาง

การบดอัด A	ดินมวลละเอียด ค่าการบดอัดสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่า 100 % โดยอิงจากผลทดสอบบดอัดมาตรฐาน ASTM D 698 หิน หรือ ดินมวลหยาบ บดอัดด้วยรถแบบสั่น หนัก 10 ตัน 8-10 เที่ยวและไม่มีแอ่งที่สังเกตุได้บนผิวดิน
การบดอัด B	ค่าการบดอัดสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่า 95 % โดยอิงจากผลทดสอบบดอัดมาตรฐาน ASTM D 698

การบดอัดคันดินในส่วนต่าง ๆ ของคันทางให้ดำเนินการตามข้อกำหนดในตารางที่ 4-21

ตารางที่ 4-21 ข้อกำหนดสำหรับการบดอัดดินในส่วนต่าง ๆ ของคันทาง

ดินถมทั่วไป	ต่ำกว่าส่วนดินถมโครงสร้างให้บดอัดตามมาตรฐาน B
ดินถมโครงสร้าง	จากชั้นดินถมทั่วไปจนถึงระดับ 50-100 ซม ต่ำจากระดับพื้นทางให้บดอัดตามมาตรฐาน A

- การถมและบดอัดดินใกล้เคียงกับสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่เดิม

ผู้ดำเนินงานก่อสร้างต้องเพิ่มความระมัดระวังขณะบดอัดดินในระยะ 5 เมตร จากโครงสร้างอื่นที่มีอยู่เดิม เช่นกำแพงผนังค้ำยันสะพาน ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างเหล่านั้น ควรงดใช้อุปกรณ์สำหรับบดอัดดินที่เป็นแบบสั่น ในบริเวณดังกล่าว บริเวณช่องระบายน้ำ ควรติดตั้งวัสดุระบายและ



กรองน้ำ เป็นระยะอย่างน้อย 30 เซนติเมตา และลึกเข้าไปในชั้นดิน และเป็นระยะอย่างน้อย 45 เซนติเมตร เหนือช่องระบายน้ำขึ้นไป วัสดุที่นำมาบดอัดบริเวณใกล้โครงสร้างให้เป็นวัสดุคัดคล้ายกับวัสดุชั้นรองหินโรยทาง แต่ต่างที่ต้องค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 2.36 มม อย่างน้อย 60% ระยะที่บดอัดด้วยวัสดุคัดนี้ให้เป็นไปตามตารางที่ 4-22

ตารางที่ 4-22 ข้อแนะนำสำหรับบดอัดดินในบริเวณใกล้โครงสร้างเดิม

โครงสร้าง	ความกว้างและความสูงของวัสดุคัด (อย่างน้อย)	วิธีการบดอัด
กำแพงกันดินสะพาน	กว้าง 2 เมตร ตลอดความสูง	เครื่องบดอัดแบบเดินตาม ตลอดความสูงเป็นระยะ 2 ใน 3 ของความสูง
รอบท่อลอด (กลม)	กว้างออกด้านละ 30 ซม ตลอดทั้งความสูง	เครื่องบดอัดแบบเดินเป็นระยะเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อออกไปในทิศด้านข้าง จนถึงหลังท่อ
รอบท่อลอด (เหลี่ยม) พร้อมกำแพงกันดินรอบ ๆ	หนึ่งในสามของความสูง และตลอดความสูง	เครื่องบดอัดแบบเดินตาม ตลอดความสูงเป็นระยะ 2 ใน 3 ของความสูง

- การก่อสร้างคันทางด้วยหิน

หากพิจารณาใช้หินที่มีการคละขนาดที่ดีสำหรับถมเพื่อก่อสร้างคันทาง ควรเลี่ยงการเทออกจากรถบรรทุกโดยตรงเพื่อป้องกันการแยกตัวของอนุภาคที่มีขนาดต่างกัน หากเลี่ยงมิได้ต้องผสมหินถมใหม่ในที่ หรือ เพิ่มขนาดหินที่เล็กลงเข้าไปก่อนที่จะทำการบดอัด ทั้งนี้เพื่อลดการเคลื่อนตัวของอนุภาคหินที่มีขนาดเล็กเข้าไปยังบริเวณที่มีการคละขนาดของหินที่ไม่ดี

ระหว่างการก่อสร้างคันทางควรถมหินเป็นชั้น ๆ ให้เต็มทั้งความกว้างทั้งชั้นในแนวราบ ความหนามากที่สุดของชั้นหินก่อนที่จะทำการบดอัดคือ 1.3 เท่าของอนุภาคหินที่มีขนาดใหญ่สุด จากนั้นทำการบดอัดด้วยเครื่องจักรหรืออุปกรณ์สำหรับบดอัดที่เหมาะสม โดยทั่วไปรถบดที่ใช้สำหรับบดอัดหินได้แก่ รถบดล้อยาง รถบดแบบสั่น หรือรถตีนตะขาบ ยกตัวอย่าง เช่น หากบดอัดหินที่มีขนาดอนุภาค 60 เซนติเมตร ควรถมหินให้ชั้นมีความหนา 80 เซนติเมตร จากนั้นบดอัดโดยใช้รถตีนตะขาบหนัก 25 ตัน อย่างไรก็ตามการกำหนดขนาดน้ำหนักรถที่เหมาะสมเฉพาะกรณีนั้นให้อยู่ในดุลยพินิจของวิศวกร โดยปกติคันทางที่ก่อสร้างจากหินถมจะมีการทรุดตัวในระดับหนึ่ง ปริมาณนั้นขึ้นอยู่กับความสูงของคันทาง ขนาดช่องว่างระหว่างอนุภาคหิน และ ระดับของการบดอัดตอนก่อสร้าง การทรุดตัวจะมากขึ้นหากมีน้ำไหลเข้าออกจากคันหินถมและทำให้หินอิ่มน้ำเป็นพัก ๆ

- การขยายคันดินถมเดิมให้กว้างขึ้น

ส่วนขยายออกของคันทางถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างทางเดิม ดังนั้นการขยายคันทางต้องดำเนินการอย่างระมัดระวัง โดยหลัก การขยายคันทางเดิมควรใช้เทคนิคการการตัดดินเดิมให้เป็นขั้นหรือหิ้งและถมดินใหม่เสริมด้านข้าง การตัดดินเดิมต้องทำในลักษณะที่ไม่ทำให้เสถียรภาพของคันดินเดิมเสียไป

ข้อพิจารณาประกอบด้วย 1) จังหวะและช่วงเวลาสำหรับการตัดดินเดิม 2) การระบายน้ำจากคันดินเดิมและคันดินใหม่จากแอ่งซึ่งเกิดจากลาดของทั้งสองฝั่ง 3) การไม่รบกวนฐานรากของคันดินเดิม

กระบวนการก่อสร้างควรประกอบด้วยการลอกหน้าดินอ่อน พืชคลุมดิน หรือวัสดุอื่นใดที่มีเสถียรภาพต่ำออกจากบริเวณที่จะเป็นฐานของคันดินใหม่ ปรับแก้หน้าดินในลักษณะเดียวกันกับลาดของคันดินเก่าที่ประชิดติดกับคันดินใหม่ จัดให้มีระบบระบายน้ำ ระมัดระวังอย่าให้มีน้ำขังที่รอยต่อระหว่างคันทางเก่าและคันทางใหม่ที่ขยายออก วิศวกรอาจออกแบบให้มีสมอยึด (Key) ระหว่างคันดินเก่าและคันดินใหม่ นอกเหนือจากหิ้งหรือขั้นที่ได้ตัดในลาดของคันดินเก่า การก่อสร้างสมอยึดทำได้โดยขุดร่องในดินกว้างประมาณ 1 เมตร ลงในบริเวณขอบฐานของคันทางเก่า โดยความลึกให้อยู่ในดุลยพินิจของวิศวกรผู้รับผิดชอบ บดอัดดินลงในช่องว่างดังกล่าวให้เป็นส่วนหนึ่งของคันทางใหม่ สมอยึดจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของลาดดิน กล่าวคือ ช่วยป้องกันไม่ให้คันทางใหม่ไถลเมื่อเปรียบกับคันทางเดิม

4.4 การออกแบบและก่อสร้างชั้นรองหินโรยทางรถไฟ

ส่วนนี้ของคู่มือการออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยวิธีการออกแบบและการก่อสร้างชั้นรองหินโรยทาง ชั้นรองหินโรยทางออกแบบและก่อสร้างให้วางตัวอยู่ใต้ชั้นหินโรยทางและอยู่เหนือพื้นทาง ชั้นหินโรยทางควรก่อสร้างจากดินอนุภาคที่คละขนาดดีและบดอัดให้แน่น วัสดุชั้นรองหินโรยทางควรมีดินมวลละเอียดปนอยู่อย่างเพียงพอทั้งนี้เพื่อบดอัดให้ได้ความหนาแน่นที่สูง

ในการก่อสร้างทางรถไฟโดยทั่วไปกำหนดให้ความหนาของชั้นอนุภาค (Granular layer) หนาไม่น้อยกว่า 50 เซนติเมตร ชั้นอนุภาคประกอบด้วย ชั้นหินโรยทาง และชั้นรองหินโรยทาง ในทางปฏิบัติพบว่าทางที่มีชั้นรองหินโรยทางหนาไม่น้อยกว่า 30 ซม. มีสมรรถนะทางวิศวกรรมที่ดี ไม่เกิดปัญหาที่ต้องซ่อมบำรุงอยู่บ่อยครั้ง

ชั้นรองหินโรยทางทำหน้าที่สำคัญกล่าวคือ

- เป็นกันชน (Buffer) หรือชั้นกรอง (Filter) ไม่ให้ดินพื้นทางแทรกตัวขึ้นมายังชั้นรองหินโรยทาง
- ระบายน้ำออกจากบริเวณส่วนบนของพื้นทาง



4.4.1 การออกแบบ

การออกแบบโครงสร้างทางต้องเป็นไปในลักษณะที่พื้นทาง ชั้นรองหินโรยทาง และหินโรยทาง รองรับโครงสร้างส่วนบนของทางและกระจายแรงในโครงสร้างทางอย่างสม่ำเสมอ กำลังของพื้นทางจะเป็นปัจจัยหลักที่ใช้กำหนดความหนาของชั้นอนุภาค

การออกแบบชั้นรองหินโรยทางต้องพิจารณาปัจจัยเหล่านี้

- สมบัติทางวิศวกรรมของดินพื้นทาง
- กำลังแบกทานน้ำหนักของดินพื้นทาง
- หน่วยแรงจากการกระจายตัวของน้ำหนักจากการจราจรที่ปรากฏที่ผิวสัมผัสระหว่างหมอนรองรางกับหินโรยทาง
- ความหนาของชั้นอนุภาค
- สมบัติทางกลของหินโรยทาง
- การคละขนาดอนุภาคของหินโรยทาง
- การก่อสร้าง (เทวาง และ บดอัด) ชั้นรองหินโรยทาง

<u>ดินพื้นทาง</u>

ข้อมูลเบื้องต้นของชั้นดินพื้นทางสำหรับใช้วิเคราะห์ออกแบบชั้นหินโรยทางได้แก่ ชนิดของดิน และกำลังรับแรงเฉือนของดิน (ประมาณกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำที่สุดของดินเท่าที่จะเป็นไปได้) การประเมินกำลังรับแรงเฉือนต่ำสุดให้พิจารณาชั้นดินจากพื้นทางลงไปถึงระดับความลึก 60 เซนติเมตร วิศวกรสามารถใช้การทดสอบดินตามมาตรฐานในตารางที่ 4-23เพื่อจำแนกชนิดและทราบสมบัติทางกลของดินพื้นทาง 2 การทดสอบเหล่านี้พิจารณาให้เป็นการทดสอบขั้นต่ำ วิศวกรสามารถดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของดินเพิ่มเติมนอกเหนือจากวิธีเหล่านี้ได้เมื่อเห็นสมควร

ตารางที่ 4-23 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินพื้นทาง

สมบัติทางกล	การทดสอบ
ขีดจำกัดพลาสติก และ ดัชนีพลาสติก	ASTM D 4318
การคละขนาดอนุภาค	ASTM D 421 ASTM D 422
ลักษณะการการบดอัด	ASTM D 698 (Standard Proctor test) ASTM D 1557 (Modified Proctor test)
กำลังรับแรงเฉือนของดิน	ASTM D 2166 (Unconfined compression test)



ในกรณีที่ดินฐานรากเป็นดินมวลละเอียดวิศวกรควรประเมินกำลังรับแรงเฉือนของดินในระยะ 60 เซนติเมตรแรกจากการทดสอบ Unconfined compression test หากไม่มีผลการทดสอบดังกล่าวอาจพิจารณาเลือกใช้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินมวลละเอียดที่ยอมให้เป็น 138 kPa

ความเค้นที่ผิวพื้นทางต้องไม่เกินระดับของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ (ปลอดภัย) ในการคำนวณกำลังที่ยอมให้ให้ใช้อัตราส่วนปลอดภัยตั้งแต่ 2 ถึง 5 ทั้งนี้เพื่อป้องกันการพังวิบัติหรือการเคลื่อนตัวเสียรูปที่มากไปในดินพื้นทาง หากกำลังของดินต่ำ หรือ มีขีดจำกัดเหลวเกิน 30 หรือ ดัชนีพลาสติกเกิน 12 ต้องเพิ่มความระมัดระวังในการคำนวณกำลังที่ยอมให้ วิศวกรอาจพิจารณาเปลี่ยนหรือปรับปรุงดินพื้นทางเพื่อให้มีกำลังดีขึ้นสำหรับรองรับโครงสร้างทางตั้งแต่ชั้นรองหินโรยทางขึ้นไป

<u>การวิเคราะห์กระจายตัวของความเค้นในชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทาง (อ้างอิงจากส่วนที่ 2 ของคู่มือฉบับนี้)</u>

ตัวอย่างการวิเคราะห์ ออกแบบความหนาของชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทางรองรับการจราจรของรถไฟน้ำหนักล้อ 10 ตัน ความเร็ว 90 กิโลเมตร/ชั่วโมง เส้นผ่าศูนย์กลางของล้อ 1 เมตร บนรางขนาด 60 กิโลกรัม/เมตร หมอนคอนกรีต ขนาด กว้าง 0.21 สูง 0.25 เมตร ยาว 2.1 เมตร ระยะระหว่างหมอน 0.6 เมตร สมมติให้กำลังรับน้ำหนักแบกทานปลอดภัยของดินพื้นทางเป็น 120 kPa

คำนวณสัมประสิทธิ์กระแทก (AREA) และน้ำหนักพลวัตออกแบบ

$$\emptyset = 1 + 0.0052\frac{V}{D} \rightarrow \emptyset = 1 + 0.0052\frac{90}{1} = 1.468$$

$$P_d = \emptyset P_s \rightarrow P_d = (1.468)(10) = 14.68 \text{ ตัน หรือ } 144 \text{ kN}$$

คำนวณแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างรางกับหมอนรองราง $q_{r\,max}$ *(AREA)*

$$q_{r\,max} = D_f \times P_d$$

$$D_f = 0.45 + 5.77 \times 10^{-2} s_s = 0.45+0.0577(0.6) = 0.485$$

$$q_{r\,max} = D_f \times P_d = 0.485(144) = 69.79 \text{ kN}$$

หน่วยแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างหมอนรองรางกับหินโรยทาง

$$P_b = 2\left(\frac{q_{r\,max}}{BL}\right)$$

$$P_b = 2\left(\frac{69.79}{(0.21)(2.1)}\right) = 316.51 \text{ kPa}$$



คำนวณความหนาของชั้นอนุภาค (Talbot's Formula)

$$P_a = P_b\left(\frac{1}{5.9H^{1.25}}\right) \rightarrow H = 0.24\left(\frac{P_b}{P_a}\right)^{0.8} = 0.24\left(\frac{316.51}{138}\right)^{0.8} = 0.466 \text{ ม.}$$

ความหนาของชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทาง

กำหนดให้ความหนาของชั้นหินโรยทางเป็น 30 เซนติเมตร และชั้นรองหินโรยทางเป็น 17 เซนติเมตร หรือ กำหนดให้ความหนาของชั้นหินโรยทางเป็น 30 เซนติเมตร และชั้นรองหินโรยทางเป็น 20 เซนติเมตร

4.4.2 วัสดุสำหรับก่อสร้างชั้นรองหินโรยทาง

วัสดุสำหรับก่อสร้างชั้นรองหินโรยทางทั่วไปมีความคล้ายคลึงกับชั้นรองผิวทางในงานทางหลวง กล่าวคือ เป็นการผสมกันระหว่างหินบดหรือกรวดและทราย วัสดุรองหินโรยทางอาจผสมขึ้นเพื่อใช้งานเฉพาะ หรือเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่มีสมบัติทางวิศวกรรมเป็นไปตามข้อกำหนดก็ได้

วัสดุหินโรยทางควรมีลักษณะเป็นอนุภาค (Granular soil) ที่มีการคละขนาดอนุภาคที่ดีเพื่อป้องกันการแทรกตัวของดินพื้นทางและป้องกันการแทรกตัวของหินโรยทางเข้ามาในชั้นรองหินโรยทางดังนั้นในการออกแบบชั้นรองหินโรยทางจึงต้องพิจารณาวัสดุเป็นชั้นกรองและวิเคราะห์ตามหลักการกรอง (Filter principle) อนุภาคมีลักษณะเนื้อแข็ง ไม่ผุ ห้ามมิให้นำวัสดุประเภท Shale มาเป็นวัสดุก่อสร้างชั้นรองหินโรยทาง วิศวกรพึงทราบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดินพื้นทาง ระบุขนาดอนุภาคของดินพื้นทางที่ 15% และ 50% ผ่าน จากนั้นใช้ค่าในตารางที่ 4-25 คำนวณช่วงขนาดอนุภาค ที่ 15% และ 50% ผ่าน ของวัสดุรองหินโรยทาง ขนาดใหญ่สุดของอนุภาควัสดุชั้นรองหินโรยทางต้องไม่เกินขนาดอนุภาคหินโรยทางที่ใหญ่ที่สุดและไม่ควรมีวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 5% ของน้ำหนักวัสดุชั้นรองหินโรยทาง ตัวอย่างการออกแบบการคละขนาดของวัสดุชั้นรองหินโรยทางที่เป็นไปตามมาตรฐานแสดงในรูปที่ 4-16

ตารางที่ 4-24 การคละขนาดที่ยอมให้สำหรับวัสดุรองหินโรยทาง

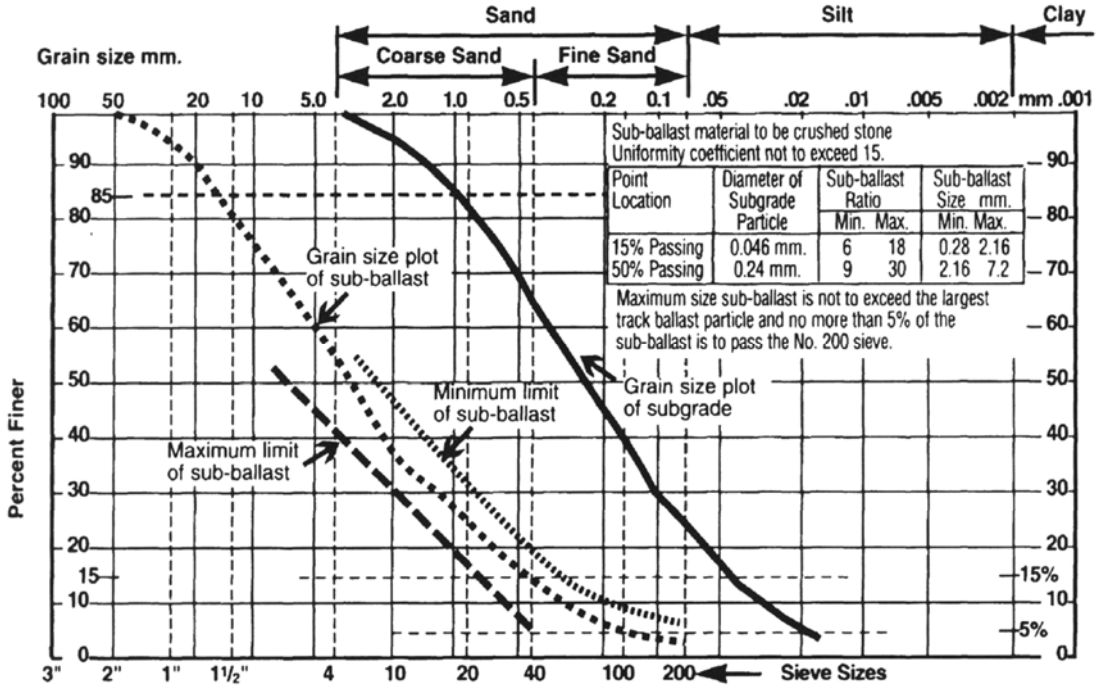
Character of Filter Materials	Ratio R_{50}	Ratio R_{15}
Uniform grain-size distribution (U = 3 to 4)	5 to 10	–
Well graded to poorly graded (non-uniform); subrounded grains	12 to 58	12 to 40
Well graded to poorly graded (non-uniform); angular particles	9 to 30	6 to 18

$R_{50} = D_{50}$ of filter material / D_{50} of material to be protected

$R_{15} = D_{15}$ of filter material / D_{15} of material to be protected

Note: Grain-size curves (semilogarithmic plot) of sub-ballast and subgrade should be approximately parallel in the finer range of sizes.

This table was prepared especially for earth dam design and since the use here is for a different purpose the values given may be slightly exceeded. In event that soil in subgrade may be subject to piping, position the maximum percentage value of D for the sub-ballast to be less than 5 ¥ D85 of the subgrade soil. The sub-ballast in this case should be well graded.



รูปที่ 4-16 ตัวอย่างการคำนวณช่วงขนาดอนุภาค ที่ 15% และ 50% ผ่าน สำหรับกำหนดวัสดุรองหินโรยทาง

ตารางที่ 4-25 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นรองหินโรยทางและค่าแนะนำสำหรับการออกแบบ

สมบัติทางวิศวกรรม	การทดสอบ	ข้อแนะนำ
การคละขนาด	ASTM D 422	ดูส่วนที่ 4.2 ของคู่มือฉบับนี้
ความหนาแน่นสำหรับบดอัด	ASTM D 1557	บดอัดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด บดอัดที่ความชื้นที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด
ขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติก	ASTM D 423 ASTM D 424	พิกัดเหลวน้อยกว่า 25 ดัชนีพลาสติกน้อยกว่า 6
ความทนทานต่อการขัดสี (ลอสแองเจลิส)	ASTM C 131	ไม่เกิน 40%
ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	ASTM C 88	ค่าเปลี่ยนแปลงได้[1]
ปริมาณวัสดุผ่านตะแกรงเบอร์ 200	ASTM C 117	น้อยกว่า 5%
ค่า California Bearing Ratio แบบแช่น้ำ	ASTM D 1883	ไม่น้อยกว่า 80%
สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ	ASTM D 2434	ค่าเปลี่ยนแปลงได้[1]
ความถ่วงจำเพาะ	ASTM C 127	ค่าเปลี่ยนแปลงได้[1]
ค่าเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของหินโรยทาง ดินพื้นทางและวัสดุชั้นรองหินโรยทางเอง หน่วยงานเจ้าของทางสามารถกำหนดค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเฉพาะกรณีไป		



4.4.3 การก่อสร้างชั้นรองหินโรยทาง

การก่อสร้างชั้นรองหินโรยทางประกอบไปด้วยการเท ไถปาด ขึ้นรูป และการบดอัดตามที่กำหนดในแบบก่อสร้าง ควรบดอัดให้ผิวของชั้นรองหินโรยทางส่วนบนมีความหนาแน่นค่อนข้างสม่ำเสมอ ปราศจากลูกคลื่น หลุม หรือแอ่งที่ทำให้เกิดน้ำขัง ควรมีวิศวกรผู้รับผิดชอบตรวจสอบความเรียบร้อยของการก่อสร้างชั้นรองหินโรยทาง

การขนส่งวัสดุรองหินโรยทางต้องทำในลักษณะที่ไม่ก่อให้เกิดการแยกตัวของอนุภาค หรือ วัสดุสูญหายระหว่างการขนส่ง เท และปาดเกลี่ยให้วัสดุรองหินโรยทางแต่ละชั้นให้หนาระหว่าง 7.5 – 15 เซนติเมตร จากนั้นบดอัดให้ได้ความหนาและความหนาแน่นเป็นไปตามข้อกำหนด เมื่อบดอัดแล้วชั้นรองหินโรยทางต้องได้รูปร่างตามที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง ผิวต้องไม่มีลูกคลื่น หลุม หรือแอ่งที่ทำให้เกิดน้ำขัง

ต้องควบคุมมิให้มีการจราจรบนชั้นรองหินโรยทางที่บดอัดแล้วเกินกว่าความจำเป็น ผู้รับเหมาก่อสร้างต้องควบคุมให้ผิวของชั้นรองหินโรยทางบดอัดแน่น เรียบและรูปร่างเป็นไปตามแบบก่อสร้าง นอกจากนั้นยังต้องควบคุมให้ความหนาแน่นหลังจากบดอัดแล้วเป็นไปตามข้อกำหนดใน ส่วนที่ 6 มาตรฐาน มขร S-T-004

4.4.4 ข้อพิจารณาเพิ่มเติม

ในทางเก่าที่มีอายุการใช้งานยาวนานอาจเกิดวัสดุคล้ายชั้นรองหินโรยทางขึ้นตามธรรมชาติจากการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

สำหรับการก่อสร้างทางใหม่และปรับปรุงทางเก่าโดยมีการปรับปรุงถึงชั้นดินพื้นทาง ควรพิจารณาออกแบบให้มีชั้นรองหินโรยทาง ชั้นรองหินโรยทางมีหน้าที่สำคัญดังนี้

- ชั้นรองหินโรยทางต้องทึบน้ำเพียงพอที่จะบังคับน้ำที่ไหลลงมาจากชั้นหินโรยทางให้ไหลออกด้านข้างไปยังร่องระบายน้ำ และป้องกันมิให้ดินพื้นทางอิ่มน้ำและมีกำลังต่ำอันเป็นสาเหตุให้เกิดการพังวิบัติได้
- ชั้นรองหินโรยทางต้องมีความพรุนเพียงพอเพื่อให้น้ำไหลได้เล็กน้อยทั้งนี้เพื่อป้องกันการสะสมตัวของแรงดันน้ำในดินพื้นทาง (ใต้ชั้นรองหินโรยทาง) แรงดันน้ำสะสมนี้ทำให้กำลังของดินพื้นทางต่ำและเป็นสาเหตุให้เกิดการพังวิบัติได้ หากชั้นรองหินโรยทางมีความพรุนไม่เพียงพออาจพิจารณาออกแบบให้มีชั้นทรายซึ่งมีสมบัติทางวิศวกรรมเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับชั้นรองหินโรยทางในมาตรฐานนี้ เพื่อทำหน้าที่ระบายแรงดันน้ำในดินพื้นทางแทน
- ชั้นรองหินโรยทางต้องมีความแข็งแกร่ง มีกำลังเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนักจากชั้นหินโรยทางและกระจายส่งต่อน้ำหนักดังกล่าวไปยังชั้นดินพื้นทาง
- ผิวของชั้นรองหินโรยทางที่บดอัดเรียบร้อยแล้วต้องมีความแข็งแรงทนทานรองรับการทำงานของเครื่องจักรระหว่างก่อสร้างชั้นหินโรยทางและการวางโครงสร้างด้านบนของทางโดยไม่เกิดการเคลื่อนตัวเป็นหลุม แอ่ง หรือลูกคลื่น ที่กักเก็บน้ำ ที่อาจก่อให้เกิดกระเปาะ หรือแอ่งหินโรยทาง (Ballast pocket) ได้

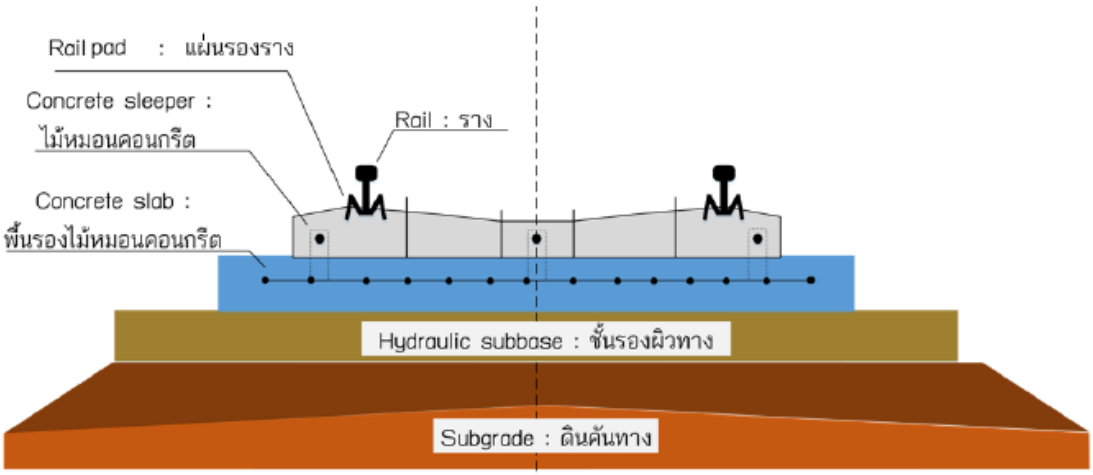


- เนื่องจากชั้นรองหินโรยทางต้องทำหน้าที่สำคัญหลายประการดังที่ได้กล่าวไปแล้ว วิศวกรพึงเลือกวัสดุชั้นรองหินโรยทางที่เหมาะสมและมีสมรรถนะที่ดี หลักเกณฑ์ทางวิศวกรรมอันหนึ่งที่ผ่านการใช้งานมาอย่างยาวนานและสามารถประยุกต์กับการออกแบบชั้นรองหินโรยทางได้เป็นอย่างดีคือ หลักวิศวกรรมการทาง ซึ่งพิจารณาเสถียรภาพของชั้นโครงสร้างทางหลวง วิศวกรสามารถพิจารณาให้ดำเนินการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมเพิ่มเติมนอกเหนือจากการทดสอบที่ระบุในมาตรฐานนี้ หากหินโรยทาง วัสดุชั้นรองพื้นทาง และ ดินพื้นทางเป็นวัสดุใหม่ที่ยังมิเคยใช้งานมาก่อนหรือมีลักษณะบางประการที่ไม่ปกติ

บทที่ 5 การออกแบบโครงสร้างทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทาง

5.1 ทั่วไป

ระบบโครงสร้างทางรถไฟชนิดไม่มีหินโรยทาง (Ballastless Track System) ทางรถไฟชนิดพื้นคอนกรีต (Concrete Slab Track) จะแตกต่างจากทางรถไฟชนิดหินโรยทาง ตรงที่จะเปลี่ยนชั้นดินเดิม (Sub-Grade) ไปเป็นพื้นคอนกรีต (Concrete Road – Bed) โดยในส่วนของชั้นรองหินโรยทาง (Sub – Ballast) จะเปลี่ยนเป็นการเทคอนกรีตเพื่อเชื่อมกับตัวหมอนรถไฟ (Concrete Sleeper) ทางรถไฟชนิดพื้นคอนกรีตจะช่วยลดความสูงของโครงสร้างและลดปัญหาในการจัดหาหินโรยทาง ซึ่งโครงสร้างทางรถไฟชนิดนี้มีความเสถียรและมีการทรุดตัวที่น้อยกว่า ตัวอย่างของทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทางได้แสดงในรูปที่ 5-1

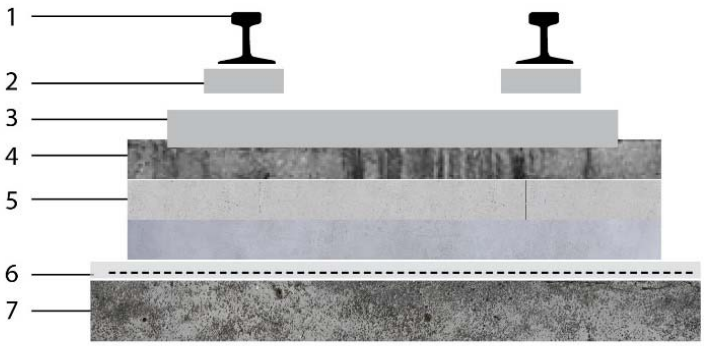


รูปที่ 5-1 โครงสร้างทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทาง

โครงสร้างทางรถไฟชนิดพื้นคอนกรีตนี้เพิ่งมีการพัฒนาขึ้นในไม่กี่ทศวรรษนี้เนื่องจากมีความแข็งแรง มีอายุการใช้งานยาวนาน มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม มีเสถียรภาพทางโครงสร้างที่สูงซึ่งเหมาะสมกับการใช้กับ รถไฟความเร็วสูง (High Speed Rail: HSR) และรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมือง (Urban Transit System) ระบบดังกล่าวยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากอีกด้วย ในปัจจุบันทางรถไฟประเภทนี้ได้ใช้กับอย่างแพร่หลายในระบบรถไฟฟ้าใต้ดินรถไฟลอยฟ้าและระบบรถไฟชาญเมืองซึ่งเป็นทางรถไฟที่มีความถี่ของขบวนต่อวันสูง มีเวลาในการบำรุงรักษาต่ำ หรือ หากว่าต้องหยุดเพื่อบำรุงรักษาอาจเกิดการสูญเสียทางระบบเศรษฐกิจสังคมสูง

5.2 องค์ประกอบและชนิดของทางรถไฟแบบไม่ใช้หินโรยทาง

ระบบโครงสร้างทางรถไฟชนิดไม่มีหินโรยทาง ประกอบไปด้วย (หรือไม่จำเป็นต้องมี) องค์ประกอบหลัก องค์ประกอบรองและส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5-2



รูปที่ 5-2 องค์ประกอบโครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทาง องค์ประกอบหลัก รองและส่วนต่าง ๆ

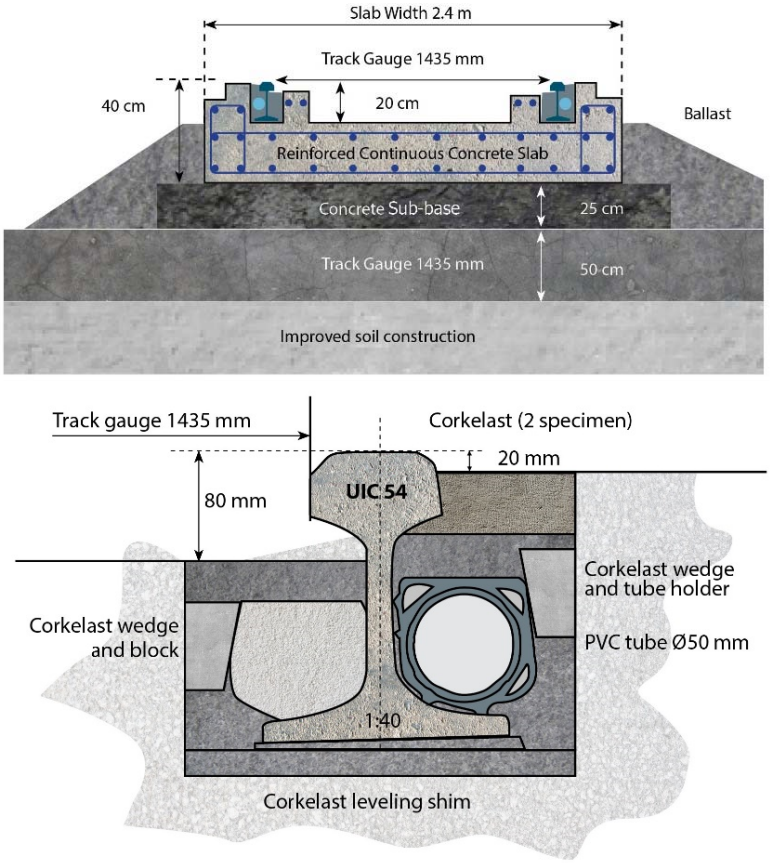
1. ราง ประแจสับราง
2. ระบบยึดเหนี่ยวราง หรือ ในบางระบบจะเป็นระบบฝังรางเข้ากับส่วนที่ 3
3. ส่วนประกอบที่นำมารองราง เช่น หมอนคอนกรีตรองราง
4. ชั้นคั่นกลางระหว่างหมอนรองรางกับพื้น หรือ คอนกรีตรองราง
5. พื้นคอนกรีตรองรางแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้น
6. ชั้นรองพื้นคอนกรีตรองราง
7. โครงสร้างรองรับทางรถไฟ อาจจะเป็นพื้นคอนกรีต พื้นสะพาน ชั้นรองผิวทาง หรือคันทางแล้วแต่ลักษณะการออกแบบที่รองรับ

<u>รูปแบบของโครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทาง</u>

รูปแบบของโครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางมีมากมายหลายรูปแบบ ซึ่งขึ้นกับเทคนิคการออกแบบการถ่ายแรงจากรถไฟไปยังโครงสร้างทางรถไฟ รูปแบบโครงสร้างทางสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการยึดรางได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ 1) โครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางแบบมีจุดรองรับต่อเนื่องหรือรางแบบฝัง (Embedded Rail System) และ 2) โครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางแบบมีระบบยึดเหนี่ยวราง (Fastening System) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- โครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางแบบมีจุดรองรับต่อเนื่องหรือรางแบบฝัง (Embedded Rail System)

เป็นโครงสร้างทางที่รางฝังอยู่ใน Elastomeric Concrete หรือ วัสดุประสานซีเมนต์(Cement) ซึ่งอยู่ในพื้นคอนกรีต ระบบนี้มีชื่อย่อว่า Embedded Rail System (ERS) โดยใช้ระบบรองรับแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 5-3 โดยโครงสร้างทางประกอบด้วยรางที่ฝังอยู่ในพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่องวางอยู่บน ฐานที่ทำให้แน่นด้วยซีเมนต์และรองด้วยทราย



รูปที่ 5-3 โครงสร้างทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทางแบบระบบรางฝัง (Embedded Rail System)

- โครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางแบบมีระบบยึดเหนี่ยวราง (Fastening System)

ระบบโครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางมักจะใช้ระบบที่มีระบบยึดเหนี่ยวราง ซึ่งระบบโครงสร้างทางนี้จะมีหลายระบบ และมีชื่อเรียกหลากหลายตามแต่ละรูปแบบการออกแบบ ดังนี้

ทางรถไฟแบบแท่นคอนกรีต (Track Plinth)

ทางรถไฟแบบแท่นคอนกรีต (Track Plinth) ประกอบด้วย โครงสร้างรับรางรถไฟแบบแท่นคอนกรีตพร้อมกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผนังตั้งขึ้นสำหรับเป็นโครงสร้างกันรถไฟตกรางโครงสร้าง Track Plinth

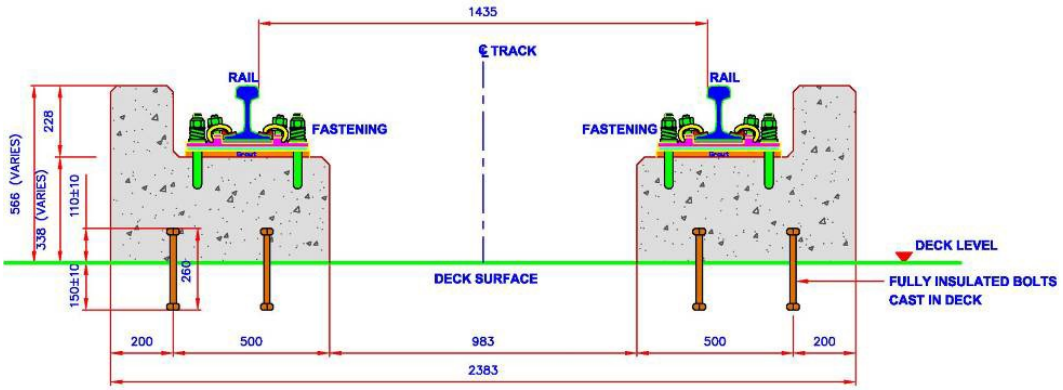
จะถูกยึดแน่นกับโครงสร้างทางยกระดับ ด้วยเหล็กเสริมยึดเหนี่ยว ความยาวของTrack Plinth แต่ละช่วงจะยาวประมาณ 5 เมตร มีช่องว่างห่างประมาณ 100 มิลลิเมตร เพื่อให้เป็นทางระบายน้ำและสำหรับการวางสายไฟผ่านตามแนวขวางของทางรถไฟ และเพื่อประโยชน์กรณี Construction Joint และ Expansion Joint ของโครงสร้างรองรับรางรถไฟ และ Viaduct ความยาวของช่วง Track Plinth อาจเพิ่มความยาวได้แต่ไม่เกิน 7 เมตร รูปแบบทางรถไฟแบบ Track Plinth มีหลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 5-4 และ รูปที่ 5-5



รูปที่ 5-4 ทางรถไฟแบบแท่นคอนกรีตตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 5-5 ทางรถไฟแบบแท่นคอนกรีตตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 5-6 รูปตัดด้านข้างของทางรถไฟแบบแท่นคอนกรีต

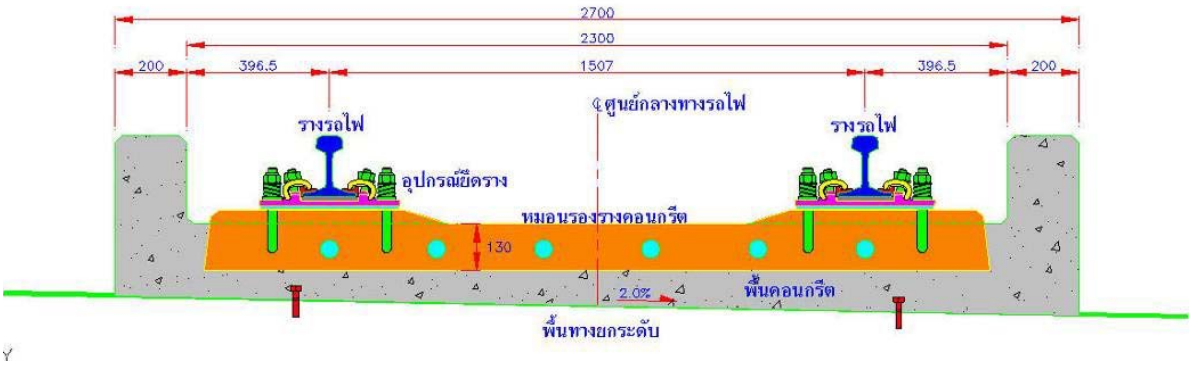
ที่มา : เล่มสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) โครงการระบบรถไฟฟ้าสายสีเขียวอ่อนช่วงสมุทรปราการ (บางปิ้ง)-บางปู

ทางรถไฟแบบพื้นคอนกรีตพร้อมหมอนรองรางรถไฟ (Mono-Block Sleeper)

ทางรถไฟแบบพื้นคอนกรีตพร้อมหมอนรองรางรถไฟ (Track Slab Mono-Block Sleeper) ซึ่งจะประกอบด้วยหมอนคอนกรีตอัดแรง หรือคอนกรีตเสริมเหล็กฝังในพื้นคอนกรีต พร้อมกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผนังตั้งขึ้นสำหรับเป็นโครงสร้างกันรถไฟตกราง และถูกยึดแน่นกับโครงสร้างทางยกระดับด้วยเหล็กเสริมยึดเหนี่ยว ความยาวของ Track Slab แต่ละช่วงจะยาวประมาณ 7.5 เมตร ซึ่งจะมีช่องว่างห่างประมาณ 100 มิลลิเมตร เพื่อให้เป็นทางระบายน้ำและสำหรับการวางสายไฟผ่านตามแนวขวางของทางรถไฟ และเพื่อประโยชน์กรณี Construction Joint และ Expansion Joint ของ Track Slab และ Viaduct รูปแบบทางรถไฟแบบ Track Slab ดังแสดงในรูปที่ 5-7



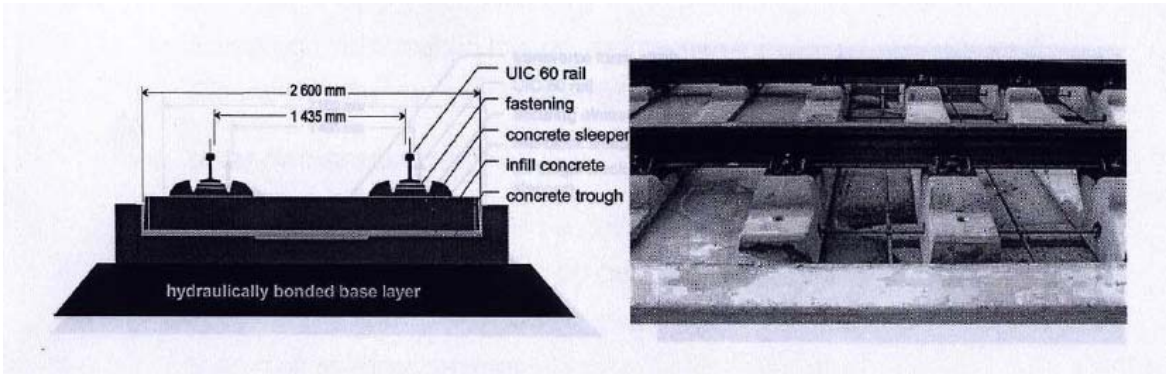
รูปที่ 5-7 ทางรถไฟแบบพื้นคอนกรีตพร้อมหมอนรองรางรถไฟ



รูปที่ 5-8 รูปตัดด้านข้างของทางรถไฟแบบพื้นคอนกรีตพร้อมหมอนรองรางรถไฟ

ทางรถไฟแบบพื้นคอนกรีตแบบ Rheda

เป็นระบบโครงสร้างทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทางที่เริ่มใช้ในประเทศเยอรมันในปี ค.ศ. 1970 ในระบบโครงสร้างทางแบบ Rheda ไม้หมอนคอนกรีตถูกหล่อบนแผ่นพื้นคอนกรีต ในการก่อสร้าง ราง ไม้หมอน และระบบยึดเหนี่ยวได้ถูกติดตั้งบนพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5-9 ในการออกแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก พื้นจะต้องสามารถรับแรงกระทำจากน้ำหนักรถไฟ และพื้นจะต้องตั้งอยู่บนชั้นรองทางที่กำลังรับน้ำหนักที่เพียงพอและอยู่เหนือกว่าระดับน้ำใต้ดินอย่างน้อย 1.5 เมตร



รูปที่ 5-9 ทางรถไฟแบบพื้นคอนกรีตแบบ Rheda

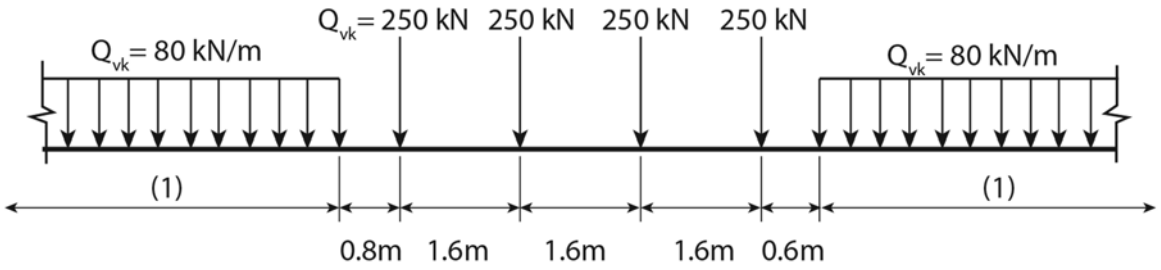
5.3 แรงกระทำที่พิจารณา (Load Condition)

5.3.1 องค์ประกอบของน้ำหนักบรรทุกที่ต้องพิจารณา

ทางรถไฟต้องรับน้ำหนักบรรทุกในสามทิศทางที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ และ พร้อม ๆ กันตลอดเวลาที่ใช้งาน โดยแรงที่กระทำกับทางรถไฟประกอบด้วย

5.3.2 แรงกระทำในแนวดิ่ง (Vertical Load)

เกิดจากน้ำหนักบรรทุกกดลงเพลา น้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งจากสภาพการจราจรปกติ ซึ่งสามารถใช้การกระจายน้ำหนักลงรางตามชนิดและน้ำหนักลงเพลาจริงของรถไฟ หากไม่ระบุชนิดและน้ำหนักลงเพลาของรถไฟ สามารถใช้การกระจายน้ำหนักลงรางตามรูปที่ 5-10



รูปที่ 5-10 น้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งสำหรับรถไฟในสภาพการจราจรปกติ

โดยที่ Q_{vk} = แรงกระทำหรือน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

โดยน้ำหนักดังกล่าวสามารถใช้ตัวคูณประกอบ เพื่อปรับแก้ค่าให้มากขึ้นสำหรับการจราจรที่มากกว่าปกติ หรือลดลงสำหรับการจราจรที่เบากว่าปกติ นอกจากนั้นการกระจายน้ำหนักดังกล่าวยังสามารถนำไปคูณกับตัวคูณประกอบ เพื่อคำนวณแรงเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลาง และแรงจากการเบรกได้

5.3.3 แรงกระทำในแนวราบ (Horizontal Forces)

<u>แรงหนีศูนย์</u>

เป็นแรงที่เกิดขึ้นในกรณีที่รถไฟต้องเข้าโค้ง เมื่อเข้าโค้ง แรงหนีศูนย์ (q_{tk}) จะต้องนำมาพิจารณา แรงหนีศูนย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5-1



$$q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r}(f \times q_{vk})$$ สมการที่ 5-1

โดยที่ q_{tk} คือแรงหนีศูนย์ หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

v คือ ความเร็วสูงสุดขณะเข้าโค้ง หน่วยเป็น เมตร/วินาที

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก เท่ากับ 9.8 เมตร/วินาที^{2}

r คือ รัศมีความโค้ง หน่วยเป็น เมตร

f คือ ตัวคูณประกอบปรับลด

โดยที่

$$f = \left[1 - \frac{V-120}{1000}\left(\frac{814}{V} + 1.75\right)\left(1 - \sqrt{\frac{2.88}{L_f}}\right)\right]$$ สมการที่ 5-2

และ L_f คือ ความยาวประสิทธิผลของแรงที่กระทำต่อช่วงโค้งบนสะพาน หน่วยเป็นเมตร

V คือ ความเร็วสูงสุด หน่วยเป็น กิโลเมตรต่อชั่วโมง

กำหนดให้ F เท่ากับ 1 เมื่อ V $\leq$ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ $L_f \leq 2.88$

<u>แรงจากการเร่งและเบรก</u>

แรงจากการเร่งและเบรกจะกระทำที่ด้านบนของราง และกระทำตามแนวยาวของรางตามทิศทางของทางรถไฟ แรงนี้ให้พิจารณาเป็นแรงกระทำแบบกระจายและสม่ำเสมอตลอดแนวที่แรงกระทำ ($L_{a,b}$) การคำนวณแรงกระทำให้คำนวณตามสมการที่ 5-3 และ สมการที่ 5-4

แรงจากการเร่ง = 33 x $L_{a,b}$ กิโลนิวตัน $\leq$ 1,000 กิโลนิวตัน สมการที่ 5-3

แรงจากการเบรค = 20 x $L_{a,b}$ กิโลนิวตัน $\leq$ 1,000 กิโลนิวตัน สมการที่ 5-4

โดยที่ $L_{a,b}$ = ความยาวของแนวแรงที่กระทำ หน่วยเป็นเมตร ภายใต้น้ำหนักบรรทุก สภาวะต่าง ๆ รูปทรงทางเรขาคณิตของทางรถไฟ คือ ขนาดทาง ระดับทาง และแนวเส้นทางต้องอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด



5.3.4 ชนิดของแรงกระทำ

แรงที่มากระทำแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

แรงกระทำแบบสถิต (Static Load)

น้ำหนักลงเพลาที่กระทำกับรางและถ่ายจากรางมายังพื้น ซึ่งจะต้องใช้กรณีของน้ำหนักกระทำรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเกิดแรงหนีศูนย์ การกระจายน้ำหนักจากตัวรถลงรางที่ไม่สมมาตร การยกโค้ง ทั้งตามมาตรฐานที่กำหนดและน้ำหนักของตัวรถไฟจริงที่จะนำมาใช้

แรงกระทำแบบพลศาสตร์ (Dynamic Load)

เป็นน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วของรถไฟ โดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวประกอบ 1.5 ในการคูณกับน้ำหนักกระทำแบบสถิต (Static) เมื่อความเร่งในแนวดิ่งของตัวรถไฟไม่เกิน 5 เมตร/วินาที^{2}

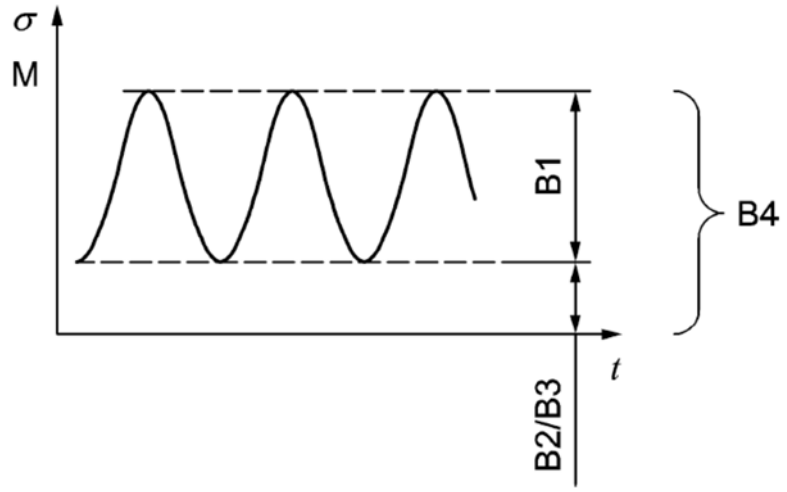
5.4 การออกแบบโครงสร้างทางรถไฟชนิดไม่มีหินโรยทาง

การออกแบบทางรถไฟชนิดพื้นคอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบใดจะใช้หลักการของการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสามารถรับแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกประเภทต่าง ๆ ได้อย่างปลอดภัย และสามารถถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงไปยังโครงสร้างส่วนล่างได้อย่างมีเสถียรภาพ เช่น ชั้นพื้นทาง พื้นทางคอนกรีต พื้นทางแอสฟัลติกคอนกรีต หรือ พื้นสะพาน เป็นต้น น้ำหนักบรรทุกที่พื้นคอนกรีตจะต้องรับ เช่น น้ำหนักที่ถ่ายจากรางแบบสถิตย์ศาสตร์ แบบพลศาสตร์ หน่วยแรงจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตโดยการคำนวณจะสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Analytical Approach) หรือวิธีแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Approach) ก็ได้ ในคู่มือการออกแบบนี้จะกล่าวถึงในส่วนของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบเท่านั้น หลักการออกแบบโดยวิธีนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนคือ คำนวณแรงภายนอกที่กระทำ เป็นแรงที่กระทำที่ถ่ายมาจากล้อรถไฟ หากไม่ได้ระบุขนาดและน้ำหนักลงเพลา หรือไม่มีข้อมูลสำหรับการออกแบบ สามารถใช้การกระจายน้ำหนักดังแสดงในหัวข้อที่ 5.3.2 ได้

5.4.1 การคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับแผ่นพื้น

การประกอบกันของระบบโครงสร้างทางชนิดพื้นคอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นระบบใด แบบมีอุปกรณ์ยึดรั้งราง หรือเป็นแบบรางฝัง บนชิ้นส่วนคอนกรีตแบบหล่อสำเร็จ หรือหล่อในที่ ให้พิจารณาชิ้นส่วนนั้นเป็นคานต่อเนื่อง หรือคานแบบไม่ต่อเนื่องที่รองรับน้ำหนักบรรทุก โมเมนต์ของความเฉื่อยของราง ระยะระหว่างอุปกรณ์ยึดรั้ง และความยืดหยุ่นของระบบทั้งหมดบนจุดรองรับ มีผลต่อการกระจายแรงกระทำในแนวดิ่งและแนวราบจากราง โครงสร้างที่รองรับรางหรือแผ่นพื้น ซึ่งอาจประกอบด้วย ชิ้นส่วนหล่อสำเร็จ หรือชิ้นส่วนหล่อในที่ จะต้องออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักในรูปของโมเมนต์ดัดในแนวระนาบและนอกระนาบเพื่อส่งต่อไปยังโครงสร้างส่วนล่างได้อย่างปลอดภัย โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะต้องทำให้โครงสร้างรองรับรางมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นโดยไม่เกิดการเสียรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) หรืออาจเกิดการเสียรูปอย่างถาวรแต่จำกัด

ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบในแต่ละชิ้นส่วนย่อย การออกแบบสามารถใช้ได้โดยการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Analytical Calculation) การคำนวณนี้จะใช้เพื่อการคำนวณระดับความเค้นที่เกิดขึ้นในระบบย่อย (Subsystem) หรือส่วนประกอบ จะต้องไม่เกินระดับกำลังที่กำหนดไว้ ระดับโมเมนต์ดัดและความเค้นดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกในกรณีต่าง ๆ สามารถคำนวณแยกกันได้และนำมารวมกันในภายหลังดังแสดงในรูปที่ 5-11 ซึ่งน้ำหนักบรรทุกที่มากระทำจะคำนึงถึง น้ำหนักบรรทุกจากแรงกระทำภายนอก และ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 5-11 การรวมกันของน้ำหนักกระทำแบบต่าง ๆ บนพื้นคอนกรีตของโครงสร้างทางแบบพื้นคอนกรีต

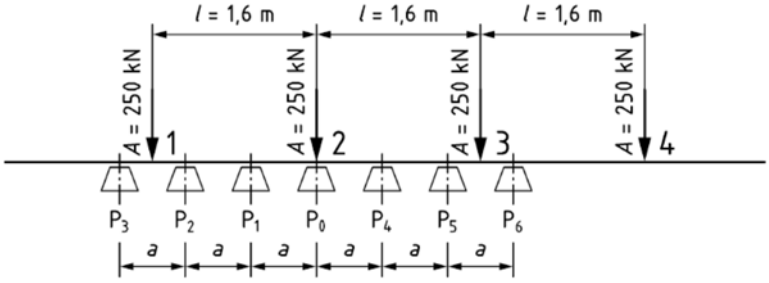
โดยที่

B1	คือ ระดับของโมเมนต์ดัด เนื่องจากน้ำหนักที่ถ่ายจากรางลงสู่พื้นทางคอนกรีต (Ballastless Track) ซึ่งจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเพลาที่ลงราง
B2 และ B3	คือ ระดับของโมเมนต์ดัดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของคอนกรีต
B4	คือ การรวมกัน (Superposition) ของโมเมนต์ดัดที่เกิดจาก B1, B2 และ B3
M	คือ โมเมนต์ดัด

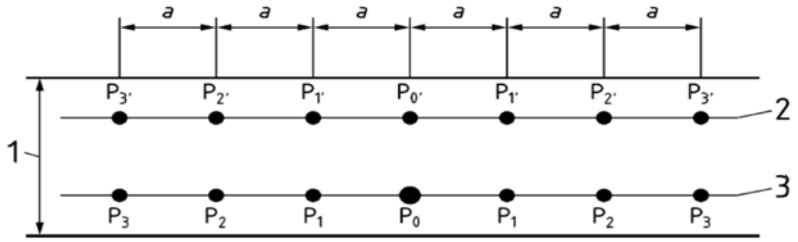
5.4.2 ขั้นตอนในการออกแบบ

STEP 1 คำนวณน้ำหนักที่กระทำบนฐานรองราง (Rail seat load) น้ำหนักกระทำบนฐานรองราง (Rail seat load, P_j) สามารถคำนวณโดยใช้หลักการของการโก่งตัวของราง ณ จุดที่ฐานรองรางสัมผัสพื้นคอนกรีต i โดยรูปของการกระจายน้ำหนักลงรางจะต้องจัดเรียงให้เกิดแรงกระทำสูงสุด P_0 ซึ่ง คือตำแหน่งที่

เพลาอยู่ที่ตำแหน่งฐานรองรางพอดี ดังแสดงในรูปที่ 5-12 การจัดเรียงตำแหน่งของฐานรองรางดังแสดงในรูปที่ 5-13



รูปที่ 5-12 น้ำหนักลงเพลา และตัวอย่างการจัดเรียงฐานรองราง (Rail Seat) ตามมาตรฐาน UIC 71



รูปที่ 5-13 การจัดเรียงฐานรองราง (แบบสมมาตร)

น้ำหนักลงฐานรองราง (Rail seat load) P_0 เนื่องจากน้ำหนักลงล้อรถไฟ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5-5

$$P_0 = c_{tot} \cdot \sum (\eta_i \cdot y_i)$$ สมการที่ 5-5

และน้ำหนักลงฐานรองราง (Rail seat load) P_j เนื่องจากน้ำหนักลงล้อรถไฟ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5-6

$$P_j = c_{tot} \cdot \sum_i (\eta_i \cdot y_i)$$ สมการที่ 5-6

โดยที่

$$\eta_i = \frac{\sin \zeta_i + \cos \zeta_i}{e^{\zeta_i}}$$

$$\zeta_i = \frac{x_i}{L_{ei}} \quad \text{และ} \quad c_{tot} = \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}\right)^{-1}$$

X_i = ระยะทาง (มิลลิเมตร) ระหว่างฐานรองราง (Rail seat) และตำแหน่งของน้ำหนักลงล้อ i

L_{el} = ช่วงความยาวยืดหยุ่น หน่วย มิลลิเมตร ซึ่งหาได้จาก

$$L_{el} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_R \cdot I_R \cdot a}{c_{tot}}}$$

C_{tot} = ความแข็งเกร็งของฐานรองรับราง หน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร

C_1 = ความแข็งเกร็งของแผ่นรองราง (pad stiffness) หน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร

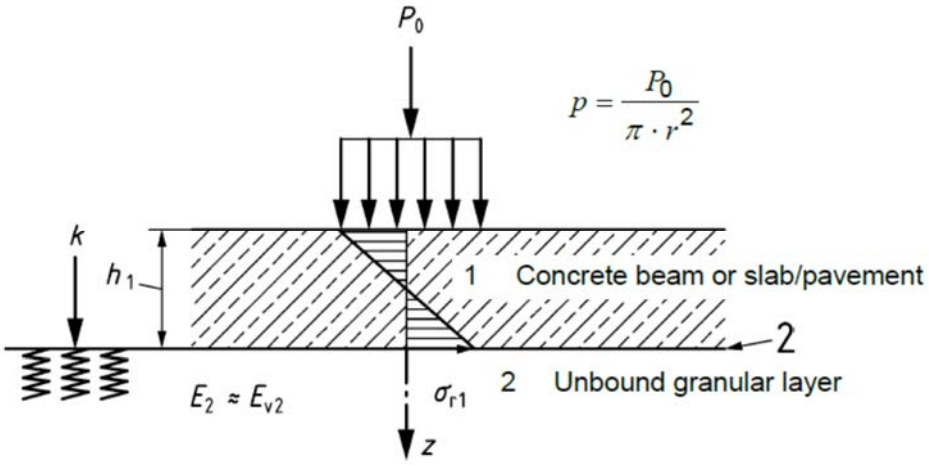
C_2 = ความแข็งเกร็งของวัสดุรองรับแบบยืดหยุ่นอื่น ๆ ที่รองรับราง (ถ้ามี) หน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร

E_R = ค่ายังส์มอดุลัสของราง หน่วย นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (โดยมากมีค่าเท่ากับ 210,000 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

I_R = ค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยในแนวดิ่งของราง มม.^{4}

a = ระยะห่างระหว่างฐานรองราง หรือระยะของรางที่ฝังในแผ่นพื้น หน่วยเป็นมิลลิเมตร

STEP 2 คำนวณโมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจากราง (Bending Moment Due To Rail Seat Load) สามารถใช้หลักการของพื้นบน Winkler Foundation ในการคำนวณโมเมนต์ดัดตามแนวแกนและแนวนอกระนาบ การใช้หลักการดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการคำนวณออกแบบ พื้นคอนกรีต หรือคานคอนกรีตที่รองรับราง ความเค้นดึงที่คำนวณออกมาได้จากแรงกระทำชนิดต่าง ๆ (เช่น การจราจร หรืออุณหภูมิ) สามารถคำนวณแยกกันและนำมารวมกันในภายหลัง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะใช้หลักการของ Infinite Beam (Zimmermann) หรือ Infinite Slab/Pavement (Westergaard) บน Resilient Support (Winkler) ในการคำนวณโมเมนต์ดัดสูงสุดและใช้ในการออกแบบต่อไป หลักการของแบบจำลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 5-14

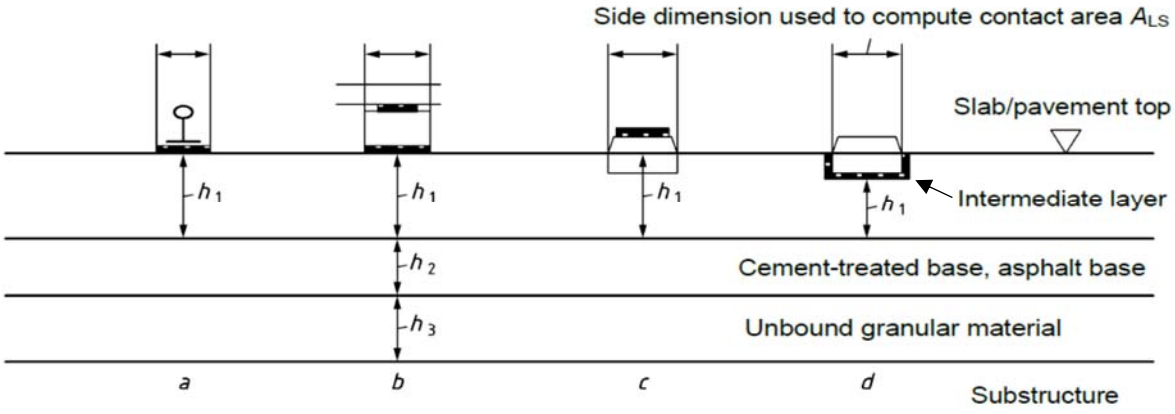


รูปที่ 5-14 Infinite Beam Or Slab On Elastic Support ตามหลักการของพื้นบน Winkler Foundation

การวัดความหนาพื้นคอนกรีต H1

ความหนาของพื้นคอนกรีต (Westergaard Approach) หรือความหนาของคาน (Zimmerman Approach) ในการนำมาใช้ในการออกแบบจะใช้ค่าที่น้อยสุดของค่าดังต่อไปนี้

ระยะทางที่วัดจากท้องคานหรือพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กถึงเครื่องยึดเหนี่ยวราง หรือถึงผิวบนของคอนกรีตพื้น หรือ คาน ตามรูปแบบของพื้นคอนกรีตรองรับรางดังแสดงในรูปที่ 5-15



รูปที่ 5-15 ความหนาประสิทธิผล (h1) ของพื้นหรือคานคอนกรีตสำหรับการออกแบบ

การออกแบบคานหรือพื้นคอนกรีต ความหนา h_1 สำหรับการออกแบบของโครงสร้างทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทางรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5-15

โดยที่

a คือ แผ่นรองรางแบบแยกส่วนบนพื้นหรือคานคอนกรีตที่ถูกออกแบบให้เป็นพื้นหรือคานคอนกรีต

b คือ แผ่นรองรางแบบแยกบนชิ้นส่วนประกอบที่รองรับด้วยพื้นหรือคาน คอนกรีต

c คือ แผ่นรองรางแบบแยกส่วนบนชิ้นส่วนสำเร็จรูป ที่ฝังอยู่ในพื้นคอนกรีต

d คือ รางแบบฝังเข้าไปในพื้นคอนกรีต

พื้นที่สัมผัสเพื่อรับแรงสำหรับการออกแบบ A_{LS} เป็นพื้นที่ที่รับแรงกดจากรางสู่พื้นคอนกรีตที่ระดับ h_1

การคำนวณหา Bedding modulus, K (หน่วยเป็น นิวตันต่อมิลิเมตร3)

Bedding modulus (k) เป็น ค่ามอดุลัสที่คำนวณที่ผิวหน้าระหว่างวัสดุรองรางและพื้นหรือคานคอนกรีต ค่า k เป็นค่าที่สำคัญในการคำนวณหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสำหรับโครงสร้างพื้นทางชนิดไม่มีหินโรยทาง ค่า k สามารถหาได้จากสมการ

$$k = \frac{\Delta\sigma_{za}}{\Delta_{za}}$$

โดยที่

$\Delta\sigma_{za}$ = หน่วยแรงกดที่เกิดขึ้น หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

Δ_{za} = ระยะยุบตัวของพื้นหรือคานคอนกรีตที่รองรับ หน่วยเป็น มิลลิเมตร

การคำนวณหา Bedding Modulus สำหรับระบบโครงสร้างทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทางชนิดต่าง ๆ สามารถทำได้ดังนี้

- Bedding Modulus, k สำหรับคานหรือ พื้นบนโครงสร้างส่วนล่าง

แบบจำลองของระบบโครงสร้างเพื่อการคำนวณหา bedding modulus ค่า k จะหาได้จากสมการ

$$k = \frac{E_2}{h_1^*}$$

โดยที่ความสูงเทียบเท่าของคาน หรือพื้น สามารถหาได้จากสมการ

$$h_1^* = c \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}$$

โดยที่

h_1 = ความหนาประสิทธิผลของคานหรือพื้นคอนกรีต หน่วยเป็น มิลลิเมตร

E_1 = ค่ายังก์มอดุลัสของคานหรือพื้นคอนกรีต หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

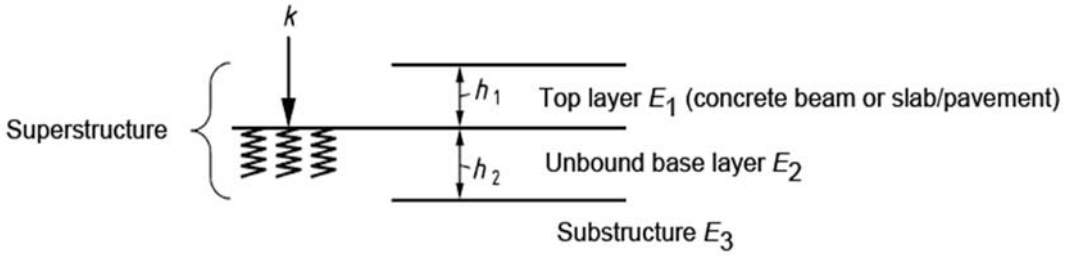
E_2 = ค่ายังก์มอดุลัสของโครงสร้างส่วนล่าง หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

C = 0.83 สำหรับชั้นคอนกรีต หรือชั้นกันน้ำ (hydraulically bonded layers)

N = 0.9 สำหรับชั้นแอสฟัลต์ หรือชั้นที่ไม่ยึดเหนี่ยว (non-bonded layers)

- Bedding Modulus, k สำหรับคานหรือพื้น บนชั้นรองพื้นแบบไม่ยึดเหนี่ยวอยู่บนโครงสร้างส่วนล่าง (beam or slab/pavement on unbound base layer and substructure)

การหาค่า k ของคานหรือพื้น สามารถหาได้จากแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 5-16



รูปที่ 5-16 Bedding modulus ของชั้นรองพื้นที่ไม่ยึดเหนี่ยว

ค่า k สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$k = \frac{E_3 \cdot h^*}{h_1^* \cdot \left(h_1^* + h_2\right)}$$

และ

$$h_1^* = c_1 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}}$$

$$h_2^* = c_2 \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}}$$

$$h^* = h_1^* + h_2^*$$

โดยที่

h_1^* = ความสูงเทียบเท่า (มิลลิเมตร) ของคานหรือพื้นคอนกรีต

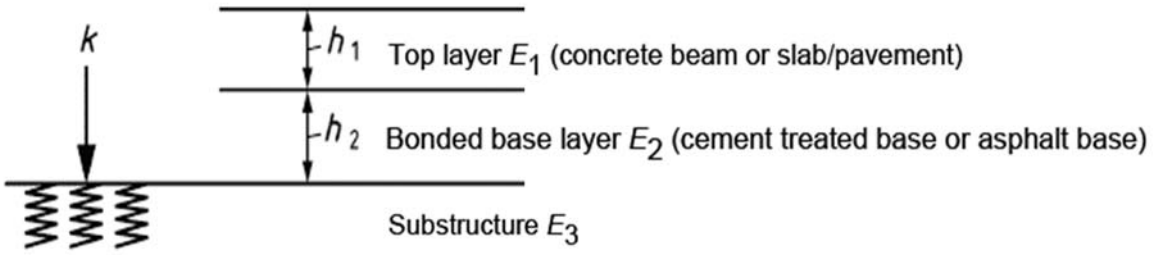
h_2^* = ความสูงเทียบเท่า (มิลลิเมตร) ของชั้นรองแบบไม่ยึดเหนี่ยว (unbound base layer)

h_1 = ความสูงประสิทธิผล (มิลลิเมตร) ของคานหรือพื้นคอนกรีต

h_2= ความสูงประสิทธิผล (มิลลิเมตร) ของชั้นรองพื้นแบบไม่ยึดเหนี่ยว (unbound base layer)

- Bedding Modulus, k สำหรับคานหรือพื้น บนชั้นรองรับแบบยึดเหนี่ยวอยู่บนโครงสร้างส่วนล่าง

การหาค่า k ของคานหรือพื้น สามารถหาได้จากแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 5-17



รูปที่ 5-17 Bedding modulus บนชั้นรองรับแบบยึดเหนี่ยว

$$k = \frac{E_3}{h^*}$$

และ

$$h^* = c_1 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}} + c_2 \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}}$$

โดยที่

h_1 = ความสูงประสิทธิผล (มิลลิเมตร) ของคานหรือพื้นคอนกรีต

h_2 = ความสูงประสิทธิผล (มิลลิเมตร) ของชั้นรองพื้นแบบไม่ยึดเหนี่ยว (unbound base layer)

E_1, E_2, E_3 = ค่ายังก์มอดุลัส (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) ของคอนกรีต ชั้นยึดเหนี่ยว และชั้นโครงสร้างส่วนล่าง

การคำนวณหากำลังรับน้ำหนักของคานหรือพื้น ที่รองรับด้วยชั้นซีเมนต์หรือบิทูมินัส

กำลังรับน้ำหนักของพื้นหรือคานหลายชั้น (Multi-layered structures) สามารถจำลองได้ด้วยความหนาเทียบเท่า h โดยความหนาเทียบเท่าดังกล่าวสามารถแบ่งได้เป็นสามกรณี

- Variant I ; เป็นแผ่นพื้นหรือคานชั้นเดียวอยู่บนโครงสร้างส่วนล่างมีความหนา (หรือความหนาเทียบเท่า) เท่ากับ h_I อยู่บนโครงสร้างส่วนล่าง
- Variant II; เป็นแผ่นพื้นหลายชั้น ซึ่งแต่ละชั้นไม่ยึดเหนี่ยวกัน อยู่บนโครงสร้างส่วนล่าง มีความหนาเทียบเท่ากับ h_{II} อยู่บนโครงสร้างส่วนล่าง
- Variant III ; เป็นแผ่นพื้นหลายชั้น ซึ่งแต่ละชั้นมีการยึดเหนี่ยวกัน อยู่บนโครงสร้างส่วนล่าง มีความหนาเทียบเท่ากับ h_{III} อยู่บนโครงสร้างส่วนล่าง



รูปที่ 5-18 การกระจายของหน่วยแรงบนแผ่นพื้นหลายชั้นแบบไม่ยึดเหนี่ยว
(Bedding Stresses On Unbounded Layer)

Variant II (แผ่นพื้นหลายชั้นแบบไม่ยึดเหนี่ยว)

ความหนาเทียบเท่า (Equivalent Thickness) H_{ii} สามารถหาได้จากสมการ

$$h_{II} = \sqrt[3]{\frac{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}{E_1}}$$

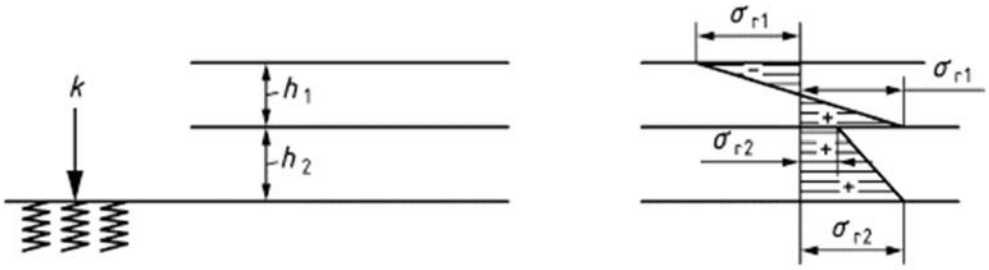
โดยที่

h_1 = ความหนาประสิทธิผล (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) ของคานหรือพื้นคอนกรีต

h_2 = ความหนาประสิทธิผล (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) ของชั้นรองพื้นคอนกรีต

E_1, E_2 = ค่ายังก์มอดุลัส (หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) ของชั้นคอนกรีตและชั้นรองพื้นคอนกรีต ตามลำดับ

μ = อัตราส่วน ปัวซองต์ (Poisson's ratio) ของชั้น



รูปที่ 5-19 การกระจายของหน่วยแรงบนแผ่นพื้นหลายชั้นแบบยึดเหนี่ยว

(Bedding Stresses On Bounded Layer)

Variant III (แผ่นพื้นหลายชั้นแบบยึดเหนี่ยว)

ความหนาเทียบเท่า (equivalent thickness) h_{III} สามารถหาได้จากสมการ

$$h_{III} = h_1 + 0.9 \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}}$$

โดยที่

h_1 = ความหนาประสิทธิผล (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) ของคานหรือพื้นคอนกรีต

h_2 = ความหนาประสิทธิผล (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) ของชั้นรองพื้นคอนกรีต

E_1, E_2 = ค่ายังก์มอดุลัส (หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) ของชั้นคอนกรีตและชั้นรองพื้นคอนกรีต ตามลำดับ



μ = อัตราส่วน ปัวซองต์ (Poisson's ratio) ของชั้น

<u>พื้นบนฐานรองรับแบบ Winkler (Westergaard) :</u>

โมเมนต์ดัดตามแนวยาวและแนวขวาง (longitudinal and lateral bending moments) และหน่วยแรงดึงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนฐานรองราง (rail seat loads)

การจัดเรียงน้ำหนักบนราง (rail seat load configuration) สามารถนำมาใช้การคำนวณหาโมเมนต์ดัดตามแนวแกนต่าง ๆ ดังนี้

โมเมนต์ดัดตามแนวแกนยาว (longitudinal bending moment, $M_{long\ I,\ II,\ III}$ (หน่วยเป็น นิวตันเมตร) เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายลงสู่ฐานรองราง ณ ตำแหน่ง 0 ซึ่งสามารถคำนวณ จากโมเมนต์ดัด $M_{0\ I,\ II,\ III}$ (หน่วยเป็นนิวตันเมตร) เนื่องจากน้ำหนักลงฐานรองราง (Rail seat load) P_0 และโมเมนต์ดัดตามแนวแกนยาว $M_{long\ neigh}$ (หน่วยเป็น นิวตันเมตร) เนื่องจากน้ำหนักลงฐานรองรางที่จุดที่ห่างจาก P_0 (neighboring rail seat load, P_j) หน่วยเป็นนิวตัน

$$M_{long\,I,II,III} = M_{0\,I,II,III} + M_{long\,neigh}$$

และในลักษณะเดียวกัน โมเมนต์ดัดตามแนวขวาง (lateral bending moment, $M_{lat\ I,\ II,\ III}$ (หน่วยเป็นนิวตันเมตร) เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายลงสู่ฐานรองราง ณ ตำแหน่ง 0 ซึ่งสามารถคำนวณ จากโมเมนต์ดัด $M_{0\ I,\ II,\ III}$ (หน่วยเป็นนิวตันเมตร) เนื่องจากน้ำหนักลงฐานรองราง (Rail seat load) P_0 และโมเมนต์ดัดตามแนวแกนยาว $M_{lat\ neigh}$ (หน่วยเป็น นิวตันเมตร) เนื่องจากน้ำหนักลงฐานรองรางที่จุดที่ห่างจาก P_0 (neighboring rail seat load, P_j) หน่วยเป็นนิวตัน

$$M_{lat\,I,II,III} = M_{0\,I,II,III} + M_{lat\,neigh}$$

โมเมนต์ดัด $M_{0\ I,\ II,\ III}$ เนื่องจากน้ำหนักกระทำบนฐานรองราง (Rail seat load, P_0)

จากการคำนวนโดยหลักการของ Westergaard โมเมนต์ดัดที่ด้านในของพื้นเนื่องจากแรงกระทำวงกลมเทียบเท่า P_0 โดย P_0 ได้แปลงเป็นหน่วยแรงกระทำบนพื้นที่สัมผัส A_{LS} โดยมีรัศมี r

พื้นที่ด้านในของพื้นควรมีระยะขั้นต่ำของระยะระหว่าง rail seat และ ขอบพื้นเท่ากับ $0.5L_{el}$ ถ้าระยะดังกล่าวต่ำกว่าค่าที่กำหนด ให้ออกแบบพื้นเป็นคานตามหลักของ Zimmermann เท่านั้น การหาโมเมนต์ M_0 สามารถใช้สมการ

$$M_{0I,II,III} = \frac{0.275 \cdot P_0}{6} \cdot (1+\mu_1) \cdot \left[\log\left(\frac{E_1 \cdot h^3}{k \cdot b^4} \right) - 0.436 \right]$$

เมื่อ

$$r = \sqrt{\frac{A_{LS}}{\pi}}$$

$$r < 1.724 \cdot h \rightarrow b = \sqrt{1.6 \cdot r^2 + h^2} - 0.675 \cdot h$$

$$r > 1.724 \cdot h \rightarrow b = r$$

โดยที่

h = ความหนาพื้นเทียบเท่า h_I, h_{II}, h_{III} ของ Winkler slab หน่วยเป็น มิลลิเมตร

E_1 = ยังก์มอดุลัสของพื้นในชั้นที่ 1 หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

μ_1 = อัตราส่วนปัวซองต์ (Poisson's ratio) ของพื้นในชั้นที่ 1

P_0 = น้ำหนักกระทำบนฐานรองราง คำนวณมาจาก STEP 1

A_{LS} = พื้นที่สัมผัสของฐานรองราง หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร

r = รัศมีของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากับ A_{LS}

k = bedding modulus หน่วยเป็น นิวตันต่อ มิลลิเมตร^3

โมเมนต์ดัดตามแนวยาว $M_{long\ neigh}$ เนื่องจากน้ำหนักกระทำบนฐานรองราง (Rail seat load, P_j) และโมเมนต์ดัดตามขวาง $M_{lat\ neigh}$ เนื่องจากน้ำหนักกระทำบนฐานรองรางข้างเคียง (Rail seat load, P_j)

แรงกระทำบนฐานรองรางข้างเคียง P_j อาจทำให้โมเมนต์ดัดที่จุดรองรางที่จุด P_0 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มโมเมนต์ดัดนี้ขึ้นอยู่กับ ความยาวแบบยืดหยุ่น (Elastic radius) L_{el} การคำนวณหา elastic radius สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$L_{el} = \sqrt[4]{\frac{E_1 \cdot h^3}{12(1-\mu^2) \cdot k}}$$

โดยที่

E_1 = ยังก์มอดุลัสของพื้นในชั้นที่ 1 หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

μ = อัตราส่วนปัวซองต์ (Poisson's ratio) ของพื้นในชั้นที่ 1

h = ความหนาพื้นเทียบเท่า h_I, h_{II}, h_{III} ของ Winkler slab หน่วยเป็น มิลลิเมตร

k = bedding modulus หน่วยเป็น นิวตันต่อ มิลลิเมตร^3

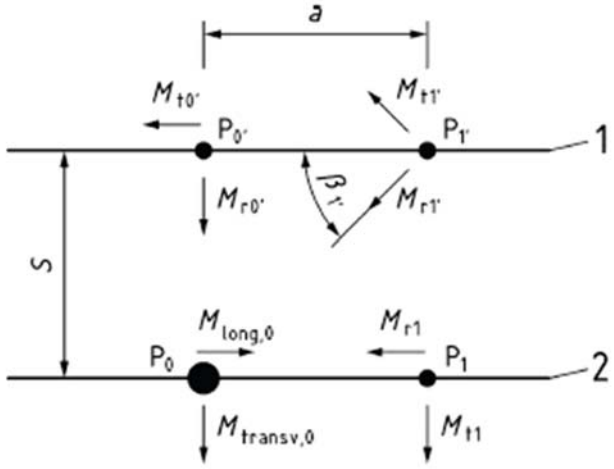
โมเมนต์ดัดตามยาว (longitudinal bending moment) M_{long} และ โมเมนต์ดัดตามขวาง (lateral bending moment) M_{lat} เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักลงรางข้างเคียง (neighboring rail seat load) P_j ที่ระยะ x_j จากจุดอ้างอิง P_0 สามารถคำนวณจากโมเมนต์ตั้งฉาก (radial moment) M_r และโมเมนต์สัมผัส (tangential moment) M_t การคำนวณค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$M_{j\_r,t} = \lambda_{r,t} \cdot P_j$$

น้ำหนักลงรางข้างเคียง (neighboring rail seat load) P_j คำนวณได้ตาม STEP 1 สำหรับการออกแบบ และการคำนวณค่า λ_r และ λ_t สามารถคำนวณได้สำหรับกรณีที่ $0.2 < (x_j / L_{el}) < 2.5$ หากไม่อยู่ในช่วง ให้ใช้ค่า λ_r และ λ_t เท่ากับศูนย์ การคำนวณค่า λ_r และ λ_t สามารถทำได้ตามสมการด้านล่าง

$$\lambda_{r,j} = 0.160 - 0.284 \cdot \left(\frac{x_j}{L_{el}}\right) + 0.157 \cdot \left(\frac{x_j}{L_{el}}\right)^2 - 0.036 \cdot \left(\frac{x_j}{L_{el}}\right)^3 + 0.003 \cdot \left(\frac{x_j}{L_{el}}\right)^4$$

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับผลของแรงกระทำข้างเคียง P_1, P_1' และ P_0 ดังรูปที่ 5-20ได้แสดงในส่วนถัดไป สำหรับแต่ละตำแหน่งของน้ำหนักลงรางที่สนใจ โมเมนต์ตั้งฉากและสัมผัส (radial and tangential bending moments) จะคำนวณออกมาดังตัวอย่างที่แสดง



รูปที่ 5-20 รูปแบบของโมเมนต์ตั้งฉากและโมเมนต์สัมผัส (radial and tangential bending moment)

รางทางขวา
$$P_1 : M_{long,1} = \lambda_{r,1} \cdot P_1$$
$$M_{lat,1} = \lambda_{r,1} \cdot P_1$$



รางทางซ้าย $P_0 : M_{long,0} = \lambda_{r,0} \cdot P_0$

$M_{lat,0} = \lambda_{r,0} \cdot P_0$

คำนวณ P_1 $M_{long1} = \lambda_{r,1} \cdot P_1 + 0.5 \cdot (\lambda_{t,1} \cdot P_1 - \lambda_{r,1} \cdot P_1) \cdot [1 - \cos(2 \cdot \beta_1)]$

$M_{lat1} = \lambda_{r,1} \cdot P_1 + 0.5 \cdot (\lambda_{t,1} \cdot P_1 - \lambda_{r,1} \cdot P_1) \cdot [1 + \cos(2 \cdot \beta_1)]$

คำนวณ P_0 $M_{long\,neigh} = \sum M_{long,j}$

$M_{lat\,neigh} = \sum M_{lat,j}$

จากสมการด้านบน

$\lambda_{r,1}$ and $\lambda_{t,1}$ are defined using $x_1 = a$

$\lambda_{r,0}$ and $\lambda_{t,0}$ are defined using $x_0 = s$

$\lambda_{r,1'}$ and $\lambda_{t,1'}$ are defined using $x_{1'} = \frac{a}{\cos \beta_{1'}}$ and $\beta_{1'} = \tan^{-1} \frac{s}{a}$

หน่วยแรงดึงตามแนวยาว σ_{long} และ หน่วยแรงดึงตามแนวขวาง σ_{lat} ของโมเมนต์ดัด เนื่องจากน้ำหนักกระทำบนฐานรองราง (Rail seat load) หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

- Variant I แผ่นพื้นชั้นเดียวความหนา h_1 บนโครงสร้างส่วนล่าง ระบบพื้นแบบ Variant I หน่วยแรงดึงตามแนวยาวและแนวขวางเนื่องจากโมเมนต์ดัดที่ด้านล่างสุดของพื้นคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_{long\,I} = \frac{6 \cdot M_{long\,I}}{h_I^2} \text{ and } \sigma_{lat\,I} = \frac{6 \cdot M_{lat\,I}}{h_I^2}$$

- Variant II แผ่นพื้นหลายชั้นแบบไม่ยึดเหนี่ยวที่มีความหนาเทียบเท่า hII บนโครงสร้างส่วนล่าง ระบบพื้นแบบ Variant II หน่วยแรงดึงตามแนวยาวและแนวขวางเนื่องจากโมเมนต์ดัดที่ด้านล่างสุดของพื้นชั้นที่ 1 และ 2 คำนวณได้จากสมการ

$$M_{long1} = M_{long\,II} \cdot \frac{E_1 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}$$

$$M_{lat1} = M_{lat\,II} \cdot \frac{E_1 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}$$

$$M_{long1} = M_{long\,II} \cdot \frac{E_1 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}$$

$$M_{lat2} = M_{lat\,II} \cdot \frac{E_1 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}$$

$$\sigma_{long1} = 6 \cdot \frac{M_{long1}}{h_1^2} \quad \sigma_{long2} = 6 \cdot \frac{M_{long2}}{h_2^2} \quad \sigma_{lat1} = 6 \cdot \frac{M_{lat1}}{h_1^2} \quad \text{,and} \quad \sigma_{lat2} = 6 \cdot \frac{M_{lat2}}{h_1^2}$$

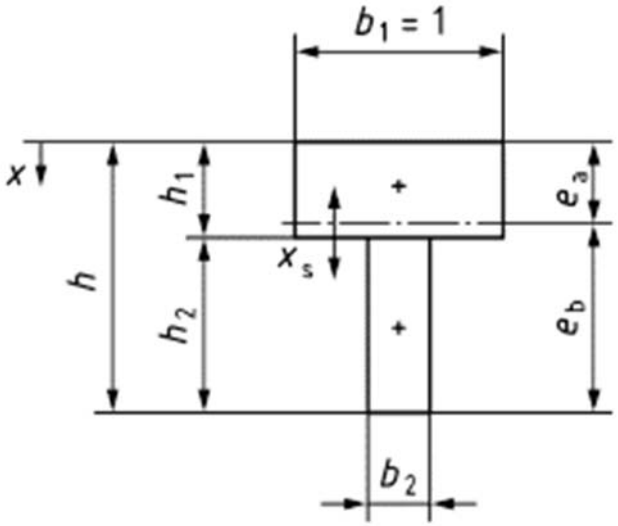
โดยที่

$M_{long\ II}$ และ M_{lat} = โมเมนต์ดัดจากการคำนวณโดยใช้หลักการของ Westergaard

h_1 และ h_2 = ความหนาของพื้นชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

E_1 และ E_2 = ค่ายังก์มอดุลัสของพื้นชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

- Variant III แผ่นพื้นหลายชั้นแบบยึดเหนี่ยวที่มีความหนาเทียบเท่า hIII บนโครงสร้างส่วนล่าง ระบบพื้นแบบ Variant III ในการคำนวณหน่วยแรงจะใช้แบบจำลอง T-beam โดยใช้หลักการความแข็งเกร็งเทียบเท่า (Equivalent Stiffness) ดังแสดงในรูปที่ 5-21



รูปที่ 5-21 แบบจำลอง T-Beam

การคำนวณค่าต่าง ๆ ในรูปที่ 5-21 สามารถทำได้โดยใช้สมการ

$$b_2 = \frac{E_2}{E_1}$$

เมื่อ

$$e_a = \frac{\sum (A_1 \cdot x_1)}{\sum A_i} \text{ ขณะที่ } A_1 = 1 \cdot h_1 \text{ และ } A_2 = b_2 \cdot h_2$$

$$e_b = h - e_a \text{ ขณะที่ } h = h_1 + h_2$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของ T-Beam มม^4 ต่อ มม คำนวณได้จาก

$$I_i = \frac{b_i \cdot h_i^3}{12}$$

หน่วยแรงดึงตามแนวยาวและแนวขวางเนื่องจากโมเมนต์ดัดด้านบนและด้านล่างของพื้นชั้นที่ 1 และ 2 คำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_{long\,1,top} = \frac{M_{long\ III}}{I} \cdot e_a$$

$$\sigma_{long\,1,bottom} = \frac{M_{long\ III}}{I} \cdot \left(h_1 - e_a\right)$$

$$\sigma_{long\,2,top} = b_2 \cdot \frac{M_{long\ III}}{I} \cdot \left(h_1 - e_a\right)$$

$$\sigma_{long\,2,bottom} = b_2 \cdot \frac{M_{long\ III}}{I} \cdot \left(h_1 - e_a\right)$$

$$\sigma_{lat\,1,top} = \frac{M_{lat\ III}}{I} \cdot e_a$$

$$\sigma_{lat\,1,bottom} = \frac{M_{lat\ III}}{I} \cdot \left(h_1 - e_a\right)$$

$$\sigma_{lat\,2,top} = b_2 \cdot \frac{M_{lat\ III}}{I} \cdot \left(h_1 - e_a\right)$$

$$\sigma_{lat\,2,bottom} = b_2 \cdot \frac{M_{lat\ III}}{I} \cdot \left(h_1 - e_a\right)$$

โดยที่

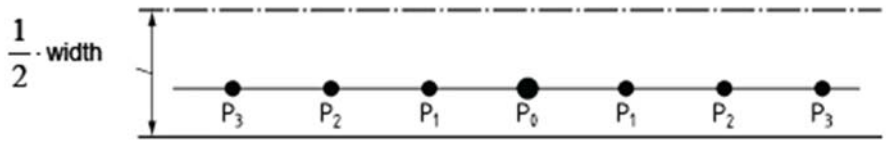
Mlong III และ Mlat III = โมเมนต์ดัดจากการคำนวณโดยใช้หลักการของ Westergaard

h1 และ h2 = ความหนาของพื้นชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

E1 และ E2 = ค่ายังก์มอดุลัสของพื้นชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

<u>คานบนฐานรองรับแบบ Winkler (Zimmermann) โมเมนต์ดัดตามแนวยาวและหน่วยแรงดึงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนฐานรองราง (Rail seat loads)</u>

แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณโมเมนต์ดัดของคานที่มีฐานรองรับแบบ Winkler ได้แสดงในรูปที่ 5-22



รูปที่ 5-22 แบบจำลองคานบน ฐานรองราง



โมเมนต์ดัดตามแนวยาว (longitudinal bending moment) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกบนฐานรองราง (rail seat load)

โมเมนต์ดัดตามแนวยาว $M_{long\ I,\ II,\ III}$ ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจากการจราจรที่ถ่ายน้ำหนักลงบนฐานรองรางที่ตำแหน่ง 0 สามารถคำนวณจากโมเมนต์ดัด $M_{0\ I,\ II,\ III}$ เนื่องจากน้ำหนักลงฐานรองราง P_0 และโมเมนต์ดัดตามแนวยาวข้างเคียง $M_{long\ neigh}$ เนื่องจากน้ำหนักลงฐานรองรางข้างเคียง (Neighboring Rail Seat Load) P_j. ดังสมการ

$$M_{long\,I,II,III} = M_{0\,I,II,III} + M_{long\,neigh}$$

การหาโมเมนต์ดัด M_0 จากน้ำหนักลงฐานรองราง P_0

โมเมนต์ดัด $M_{0\ I,\ II,\ III}$ เนื่องจากน้ำหนักลงฐานรองราง P_0 สามารถหาได้โดยใช้หลักการคำนวณของ Zimmermann โมเมนต์ดัดในคานคอนกรีตที่ยาวแบบไม่จำกัดเนื่องจากน้ำหนัก P_0 สามารถหาได้จากสมการด้านล่าง เนื่องจากระบบสมมาตรในทิศทางตั้งฉาก (Transverse direction) การคำนวณสามารถใช้ความกว้างพื้นเท่ากับครึ่งหนึ่งของความกว้างทั้งหมด

$$M_{0_{I,II,III}} = \frac{P_0 \cdot L_{el}}{4}$$

โดยแรง P_0 สามารถคำนวณได้จาก STEP 1

ความยาวยืดหยุ่น (Elastic length) L_{el} ของคานสามารถคำนวณได้จาก

$$L_{el} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_1 I_B}{b_B \cdot k}}$$

โดยที่

E_1 = ค่ายังก์มอดุลัสของคานคอนกรีต หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

k = bedding modulus หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร^3

โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน I_B สามารถหาได้จาก

$$I_B = \frac{b_B \cdot h^3}{12}$$

โดยที่

b_B = ครึ่งหนึ่งของความกว้างพื้น หน่วยเป็นมิลลิเมตร

h = ความหนา หรือความหนาเสมือนของพื้น h_I หรือ h_{II} หรือ h_{III}



การหาโมเมนต์ดัดตามแนวยาว (longitudinal bending moment) Mlong neigh จากน้ำหนักลงฐานรองรางข้างเคียง Pj

โมเมนต์ดัดตามแนวยาวเป็นโมเมนต์ดัดที่กระทำเพิ่มเติมในคานคอนกรีต สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการของ Zimmerman น้ำหนักบรรทุกลงฐานรองรางข้างเคียงทำให้โมเมนต์ที่ตำแหน่ง 0 เพิ่มขึ้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความยาวยืดหยุ่น (Elastic radius) Lel โดยใช้หลักการความกว้างของคานเท่ากับครึ่งหนึ่งของความกว้างพื้น โดยมีความหนาคานเท่ากับ h1 ดังที่กล่าวมาแล้ว โมเมนต์ดัดที่ตำแหน่ง 0 เนื่องจาก น้ำหนักลงรางข้างเคียง Pj ที่ระยะ xj โดยใช้น้ำหนักอ้างอิงเท่ากับ P0 สามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$M_{long\,neigh} = \frac{L_{el}}{4} \cdot \sum \left(P_j \cdot \mu_j \right)$$

$$\mu_j = \frac{-\sin \xi_j + \cos \xi_j}{e^{\xi_j}} \quad \text{และ} \quad \xi_j = {x_j}/{L_{el}}$$

โดยที่

L_{el} = ความยาวยืดหยุ่น (elastic length) ของระบบคาน

x_j = ระยะระหว่างฐานรองรางตำแหน่ง 0 ถึงฐานรองรางตำแหน่งที่ j

P_j = น้ำหนักลงรางคำนวณตามขั้นตอน STEP 1

โดยค่า μ_j ที่เป็นบวกเท่านั้นที่จะนำมาใช้

การหาหน่วยแรงดึงตามแนวยาวเนื่องจากโมเมนต์ดัด (Longitudinal Tensile Stress) σLong

เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก σLong เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก สามารถหาได้ในสามกรณีดังต่อไปนี้

- Variant I แผ่นพื้นชั้นเดียวความหนา h_1 บนโครงสร้างส่วนล่าง หน่วยแรงดึงตามแนวยาวเนื่องจากโมเมนต์ดัดที่ด้านล่างของพื้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_{long\,I} = \frac{6 \cdot M_{long\,I}}{\frac{B}{2} \cdot h_I^2}$$

โดยที่

B = ความกว้างของพื้นแบบแผ่นพื้นชั้นเดียว หน่วยเป็นมิลลิเมตร

- Variant II แผ่นพื้นหลายชั้นแบบไม่ยึดเหนี่ยวที่มีความหนาเทียบเท่า hII บนโครงสร้างส่วนล่าง หน่วยแรงดึงตามแนวยาวเนื่องจากโมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$M_{long\,1} = M_{long\,II} \cdot \frac{E_1 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}$$

$$M_{long\,2} = M_{long\,II} \cdot \frac{E_2 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}$$

$$\sigma_{long\,1} = 6 \cdot \frac{M_{long\,1}}{\frac{B_1}{2} \cdot h_1^2} \quad \text{และ} \quad \sigma_{long\,2} = 6 \cdot \frac{M_{long\,2}}{\frac{B_2}{2} \cdot h_2^2}$$

โดยที่

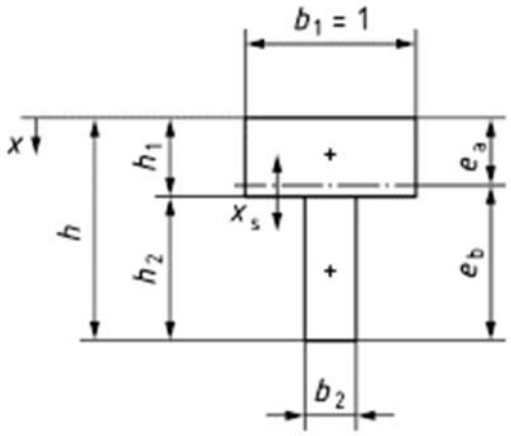
$M_{long\,II}$ = โมเมนต์ดัดตามแนวยาวคำนวณโดยใช้หลักการของ Zimmerman

h_1 และ h_2 = ความหนาของพื้นชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ตามลำดับ

E_1 และ E_2 = ค่ายังก์มอดุลัส (Young's Modulus) ของพื้นชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ตามลำดับ

B_1 และ B_2 = ความกว้างของพื้นชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ตามลำดับ

- Variant III แผ่นพื้นหลายชั้นแบบยึดเหนี่ยวที่มีความหนาเทียบเท่า hIII บนโครงสร้างส่วนล่าง หน่วยแรงดึงตามแนวยาวและแนวขวางในชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 สามารถหาได้โดยใช้แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 5-23



รูปที่ 5-23 แบบจำลอง T-Beam โดยใช้หลักการความแข็งเกร็งเทียบเท่า E = E1



โดยหลักการคำนวณจะต้องหาในรูปที่ 5-23 ดังนี้

$$b_2 = \frac{E_2}{E_1}$$

$$e_a = \frac{\sum (A_1 \cdot x_1)}{\sum A_i} \quad \text{where} \quad A_1 = 1 \cdot h_1 \quad \text{and} \quad A_2 = b_2 \cdot h_2$$

$$e_b = h - e_a \quad \text{where} \quad h = h_1 + h_2$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของ T-Beam อยู่ในหน่วย mm^4 ต่อ mm

$$I = \sum \left(I_i + A_i + x_{s,i}{}^2 \right)$$

$$I_i = \frac{b_i \cdot h_i^3}{12}$$

หน่วยแรงดึงตามแนวยาวและแนวขวางเนื่องจากโมเมนต์ดัดในชั้นที่ 1 และ 2 ทั้งด้านบนและด้านล่าง สามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_{long\,1,top} = \frac{M_{long\,III}}{\frac{B_1}{2} \cdot I} \cdot e_a$$

$$\sigma_{long\,1,bottom} = \frac{M_{long\,III}}{\frac{B_1}{2} \cdot I} \cdot \left(h_1 - e_a \right)$$

$$\sigma_{long\,2,top} = b_2 \cdot \frac{M_{long\,III}}{\frac{B_2}{2} \cdot I} \cdot \left(h_1 - e_b \right)$$

$$\sigma_{long\,2,bottom} = b_2 \cdot \frac{M_{long\,III}}{\frac{B_2}{2} \cdot I} \cdot e_b$$



โดยที่

$M_{long\ III}$ = โมเมนต์ดัดตามแนวยาวคำนวณโดยใช้หลักการของ Zimmerman

h_1 และ h_2 = ความหนาของพื้นชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ตามลำดับ

E_1 และ E_2 = ค่ายังก์มอดุลัส (Young's Modulus) ของพื้นชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ตามลำดับ

B_1 และ B_2 = ความกว้างของพื้นชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ตามลำดับ

หน่วยแรงดึงวิกฤติที่เกิดจากโมเมนต์ดัดตามแนวยาว (Critical longitudinal bending tensile stress)

ในการหาหน่วยแรงดึงวิกฤติที่เกิดจากโมเมนต์ดัดตามยาว จะต้องคำนวณหาหน่วยแรงดึงตามแนวยาวเนื่องจากโมเมนต์ดัด ณ จุดที่น้ำหนักบรรทุก P_0 กระทำลงฐานรองรางตามรายการคำนวณข้างต้นทุกกรณี โดยค่าหน่วยแรงดึงวิกฤติจะเป็นค่ามากที่สุดของค่าดังต่อไปนี้

- หน่วยแรงดึงตามแนวยาวเนื่องจากโมเมนต์ดัด σ_{long} ที่คำนวณจาก โมเมนต์ดัดตามแนวยาว $M_{long\ I}$ หรือ $M_{long\ II}$ หรือ $M_{long\ III}$ ที่พื้นด้านใน โดยใช้หลักการของ Westergaard
- หน่วยแรงดึงตามแนวยาวเนื่องจากโมเมนต์ดัด σ_{long} ที่คำนวณจาก โมเมนต์ดัดตามแนวยาว $M_{long\ I}$ หรือ $M_{long\ II}$ หรือ $M_{long\ III}$ โดยการสมมติว่าพื้นมีลักษณะเป็นคาน โดยมีความกว้างคานเท่ากับครึ่งหนึ่งของพื้น โดยใช้หลักการของ Zimmermann

หน่วยแรงดึงวิกฤติที่เกิดจากโมเมนต์ดัดตามแนวขวาง (Critical lateral bending tensile stress)

หน่วยแรงดึงวิกฤติที่เกิดเนื่องจากโมเมนต์ดัดตามขวาง ณ จุดที่น้ำหนักบรรทุก P_0 กระทำลงฐานรองราง คือ หน่วยแรงดึงที่เกิดจากโมเมนต์ดัดตามแนวขวาง σ_{lat} ซึ่งคำนวณโดยใช้โมเมนต์ดัด $M_{lat\ I}$ และ $M_{lat\ II}$ และ $M_{lat\ III}$ ที่พื้นด้านในโดยใช้หลักการของ Westergaard



STEP 3 คำนวณโมเมนต์เนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ที่แตกต่างกันในระบบรองรับราง

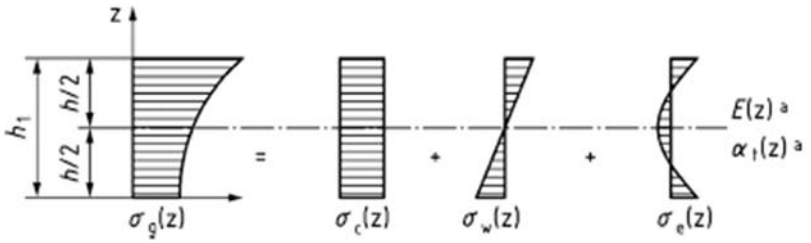
พื้นคอนกรีต พื้นทาง คานคอนกรีต เมื่อรับความร้อนจากแสงแดด หรือจากกระบวนการใด จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผิวบนและผิวล่างของคอนกรีตที่ไม่เท่ากัน ความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดหน่วยแรงขึ้นในหน้าตัดของคอนกรีตทำให้เกิดการเสียรูปขึ้น เมื่อเกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกระทำตลอดหน้าตัดที่มีความสูง h หน่วยแรงที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งเป็นสามลักษณะ คือ หน่วยแรงคงที่ (Constant Stress) σ_C หน่วยแรงเชิงเส้น (Linear Stress) σ_W และ หน่วยแรงคงค้าง (Residual Stress) σ_e

หน่วยแรงคงที่ (Constant Stress) σ_C โดยมากมักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวของพื้นทั้งทางด้านยาวและทางด้านกว้าง (ทางด้านยาวจะเกิดมากกว่า) และ/หรือ เกิดเนื่องจากแรงเสียดทานที่พื้นผิวด้านล่าง และ/หรือ การยึดรั้งในแนวยาวโดยการใช้เหล็กเสริมตามแนวยาว (CRCP) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการออกแบบ ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

หน่วยแรงเชิงเส้น (Linear Stress) σ_W เป็นหน่วยแรงที่เกิดจากความร้อนที่มากระทำด้านเดียว ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดและหน่วยแรงที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Warping Stress) ซึ่งหน่วยแรงนี้ขึ้นอยู่กับขนาด และลักษณะของจุดรองรับแผ่นพื้น ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบจะกล่าวถึงในส่วนถัดไป

หน่วยแรงคงค้าง (Residual Stress) σ_E หน่วยแรงคงค้างไม่ทำให้เกิดการเสียรูปของแผ่นพื้น หน่วยแรงนี้มักเกิดที่ด้านล่างของแผ่นพื้น และมักจะเป็นแรงอัด ซึ่งหน่วยแรงนี้มักไม่ได้นำมาใช้ในการออกแบบ

ลักษณะของหน่วยแรงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้งสามแบบที่กระทำกับแผ่นพื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 5-24



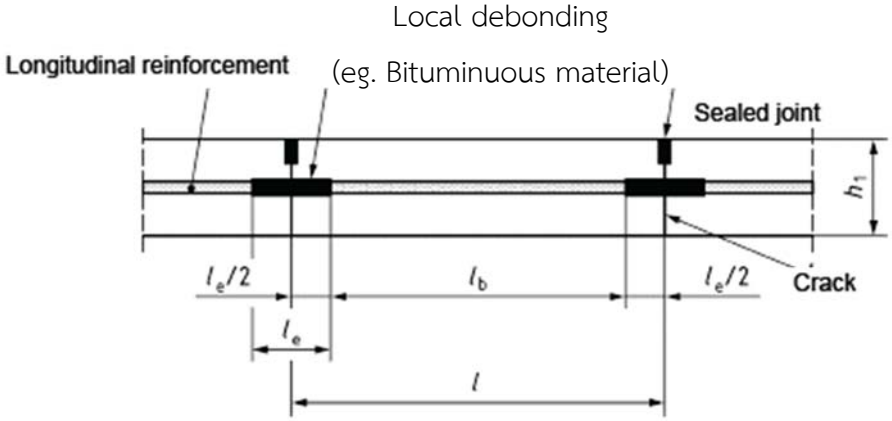
รูปที่ 5-24 หน่วยแรงในแผ่นพื้นคอนกรีตเนื่องจากผลกระทบจากอุณหภูมิ

หน่วยแรงคงที่ (Constant Stress) σ_C เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแผ่นพื้น แผ่นพื้นแบบคอนกรีตล้วน (Jointed Plain Concrete Pavement, JPCP)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้เกิด หน่วยแรงคงที่ (Constant Stress) σ_C ซึ่งไม่เกิดผลกับแผ่นพื้นเมื่อใช้แผ่นพื้นที่มีความยาวไม่เกิน 5 เมตร หรือมีจุดต่อของแผ่นพื้นที่ระยะไม่เกิน 5 เมตร

แผ่นพื้นเสริมเหล็กต่อเนื่อง (Continuously Reinforced Concrete Pavements, CRCP) หรือ แผ่นพื้นเสริมเหล็กที่จุดต่อ (Jointed Reinforced Concrete Pavement, JRCP)

เพื่อลดความกว้างของรอยร้าว ผู้ออกแบบสามารถใช้แผ่นพื้นคอนกรีตชนิดแผ่นพื้นเสริมเหล็กต่อเนื่องเพื่อควบคุมรอยร้าว ในกรณีแผ่นพื้นเสริมเหล็กต่อเนื่อง (CRCP) ปริมาณเหล็กเสริมตามแนวยาวให้ใช้เท่ากับ 0.8% ถึง 0.9% และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมควรใช้ขนาด 18 – 20 มิลลิเมตร เพื่อให้รอยร้าวมีขนาดเล็กคือ ต่ำกว่า 0.5 มิลลิเมตร และระยะห่างของรอยร้าวต้องน้อยกว่า 5 เมตร นอกจากนั้นการใช้ปริมาณเหล็กดังกล่าวยังช่วยลดการแตกบริเวณจุดต่อด้วย สำหรับกรณีแผ่นพื้นเสริมเหล็กที่จุดต่อ (JRCP) ปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้มักจะน้อยกว่า โดยปริมาณเหล็กเสริมจะอยู่ที่ประมาณ 0.4% ถึง 0.5% ตัวอย่างแผ่นพื้นแสดงดังรูปที่ 5-25 หลักการออกแบบแผ่นพื้น JRCP



รูปที่ 5-25 หลักการออกแบบแผ่นพื้น JRCP

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมสามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_e = \frac{\alpha_t \cdot \Delta T \cdot h_1 \cdot E_{conc} \cdot E_s}{\alpha_s \cdot E_s \cdot (1-k) + h_1 \cdot E_{conc} \cdot k}$$

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตสามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_c = \frac{\alpha_t \cdot \Delta T \cdot \alpha_s \cdot E_{conc} \cdot E_s}{\alpha_s \cdot E_s \cdot (1-k) + h_1 \cdot E_{conc} \cdot k}$$

โดย σ_c เนื่องจาก ΔT ต้องไม่เกิน 3 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร



การเปลี่ยนแปลงของความกว้างของรอยแตก

$$d = \alpha_t \cdot \Delta T \cdot l - \frac{\sigma_c}{E_{conc}} \cdot l_b$$

โดยที่

α_t = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีต

Δ_t = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิวบนและผิวล่าง หน่วยเป็นองศาเคลวิน

h_1 = ความหนาของพื้นคอนกรีต หน่วยเป็น มิลลิเมตร

E_{conc} = ค่ายังก์มอดุลัส (Young's Modulus) ของคอนกรีต

E_S = ค่ายังก์มอดุลัส (Young's Modulus) ของเหล็ก

α_s = หน้าตัดของเหล็กเสริม หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร ต่อความกว้าง หน่วยเป็นมิลลิเมตรของพื้น

κ = ความยาวของเหล็กที่ต้องรับความเครียด l_e หน่วยเป็นมิลลิเมตร ต่อระยะห่างของจุดต่อหรือระยะห่างของรอยแตก l หน่วยเป็นมิลลิเมตร $\kappa = l_e/l$

หน่วยแรงเชิงเส้น (Linear Stress) σ_W เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวหน้าของแผ่นพื้น

การร้อนที่ผิวหน้าของคอนกรีตโดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ΔT ตามความหนา H ของพื้นคอนกรีต ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมินี้ทำให้เกิดโมเมนต์ดัด M_w โมเมนต์ดัด M_w นี้ เป็นโมเมนต์ดัดที่มีค่าคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับแรงกระทำแบบวัฏจักรที่ถ่ายมาจากฐานรองราง (Cyclic Rail Seat Load) เนื่องจากแรงกระทำจากการจราจร หน่วยแรงดึงจากแรงดัด σ_W ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ΔT สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_w = \frac{1}{1-\mu_1} \cdot \frac{h_1 \cdot \Delta t}{2} \cdot \alpha \cdot E_1$$

โดยที่

h_1 = ความหนาของพื้นคอนกรีต

Δt = การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Gradient) หน่วยเป็น เคลวินต่อมิลลิเมตร ซึ่งสามารถหาค่าได้จากตารางที่ 5-1 ซึ่งแนะนำค่าทั่วไปของ Temperature Gradient

α = สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal Coefficient) ของพื้นคอนกรีต

E_1 = ค่ายังก์มอดุลัส ของพื้นคอนกรีต หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

μ = อัตราส่วนปัวซองต์ (Poisson's ratio) ของพื้นคอนกรีต



ตารางที่ 5-1 ความหนาและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (temperature gradient)

Thickness mm	< 220	220 to 240	240 to 270	270 to 310	310 to 440	>440
Δt K/mm	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04

การยึดรั้งและความเค้นจะลดลงบางส่วนเมื่อมีการลดขนาดพื้นคอนกรีต

เมื่อความยาว ระยะห่างของรอยแตก หรือ ระยะห่างระหว่างจุดต่อ L ในแนวยาวมีค่าเกินกว่าความกว้างของแผ่นพื้น B แนะนำให้ใช้ความกว้าง B ในการคำนวณดังต่อไปนี้

เมื่อพื้นคอนกรีตมีความกว้าง B < 0.9 B_{crit} , หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงและจะต้องนำมาพิจารณา ในกรณีนี้ หน่วยแรงดึงเนื่องจากแรงดัด σ_{w}/ คือ

$$\sigma_{w'} = \sigma_{w}\left[\frac{B-400}{0.9\cdot B_{crit}}\right]^{2}$$

เมื่อ

σ_{w} = หน่วยแรงดึงเนื่องจากแรงดัด (Flexural Tensile Stress) หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

B = ความกว้างของคอนกรีต หน่วยเป็นมิลลิเมตร

$$B_{crit} = 228\cdot h_1\cdot\sqrt{\sigma\cdot\Delta t\cdot E_1}$$

โดยที่

h_1 = ความหนาของพื้นคอนกรีต

Δt = การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Gradient) หน่วยเป็น เคลวินต่อมิลลิเมตร ซึ่งสามารถหาค่าได้จากตารางที่ 5-1 ซึ่งแนะนำค่าทั่วไปของ Temperature Gradient

α = สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal Coefficient) ของพื้นคอนกรีต

E_1 = ค่ายังก์มอดุลัส ของพื้นคอนกรีต หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

ถ้า B > B_{crit} หน่วยแรงดึงเนื่องจากแรงดัด σ_{w} จะเพิ่มขึ้นโดยใช้ตัวคูณประกอบเท่ากับ 1.2



STEP 4 การคำนวณหน่วยแรงดึงที่ยอมให้เนื่องจากความล้าจากแรงดัดจากการจราจร

ค่าสูงสุดของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้จากแรงดัดตามแนวยาว (Longitudinal Stress)

สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\max \sigma_{Qlong} = \beta_{fs}\left[\left(\log n - 2\right)\cdot\left(\frac{0.0875\cdot\sigma_c}{\beta_{fs}} - 0.07\right) + 0.8\right] - \sigma_w$$

โดยที่

B_{fs} = กำลังรับแรงดึงเนื่องจากแรงดัดของคอนกรีต หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

n = จำนวนรอบของน้ำหนัก โดยนับตามจำนวนเพลา

σ_c = หน่วยแรงดึงตามแนวยาวเนื่องจากโมเมนต์ดัด โดยใช้ค่าที่คำนวณได้ในฤดูหนาว

ค่าหน่วยแรงดึงวิกฤติจากโมเมนต์ดัดตามแนวยาว (Critical Longitudinal Bending Tensile Stress) ที่ด้านล่างของพื้นคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักจากการจราจร (คำนวณมาจาก Step 2) จะต้องไม่เกิน ค่าสูงสุดของหน่วยแรงดึงที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น

ค่าสูงสุดของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้จากแรงดัดตามแนวขวาง (Lateral Stresses)

สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\max \sigma_{Qlat} = \beta_{fs}\left[\left(\log n - 2\right)\cdot\left(\frac{0.0875\cdot\sigma_w}{\beta_{fs}} - 0.07\right) + 0.8\right] - \sigma_w$$

B_{fs} = กำลังรับแรงดึงเนื่องจากแรงดัดของคอนกรีต หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

n = จำนวนรอบของน้ำหนัก โดยนับตามจำนวนเพลา

σ_w = หน่วยแรงดึงตามแนวยาวเนื่องจากโมเมนต์ดัด โดยใช้ค่าสูงสุดที่คำนวณได้ในรอบปี หรือปรับลดค่าหน่วยแรงดึง σ_w เมื่อพื้นมีความกว้าง $B < 0.9\ B_{cirt}$

ค่าหน่วยแรงดึงวิกฤติจากโมเมนต์ดัดตามแนวยาว (Critical Lateral Bending Tensile Stress) ที่ด้านล่างของพื้นคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักจากการจราจร (คำนวณมาจาก Step 2) จะต้องไม่เกิน ค่าสูงสุดของหน่วยแรงดึงที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น

บทที่ 6 รางเชื่อมยาว (Continuous Welded Rail)

6.1 ทั่วไป

โดยปกติรางเชื่อมยาวจะถูกยึดติดกับหมอนโดยอุปกรณ์ยึดเหนี่ยว ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวจากอุปกรณ์จะบังคับให้รางและไม้หมอนเคลื่อนที่ติดไปด้วยกันในสามทิศทาง ทั้งแนวยาว แนวดิ่งและด้านข้างเมื่อมีแรงมากระทำต่อระบบ โดยที่หินโรยทางจะพยายามต้านทานการเคลื่อนที่ดังกล่าวไว้ ซึ่งแรงต้านดังกล่าว จะทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นบนหน้าตัดราง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลื่อนที่ในแนวยาวซึ่งเกิดจากการหดและขยายตัวของรางเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปรวมไปถึงแรงในแนวยาว ซึ่งเกิดจากการเร่งและเบรคของรถไฟ ปัจจัยดังกล่าวล้วนส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในหน้าตัดราง และอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อทางรถไฟได้หากหน่วยแรงดังกล่าวมีค่าสูงเกินพิกัดเสถียรภาพ

ในการแยกประเภทของรางสั้นกับรางเชื่อมยาวนั้น จะพิจารณาถึงการยืดหดตัวตลอดความยาวของราง หากรางมีการยืดหดตัวได้อย่างอิสระไปตลอดความยาวโดยไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้น จะสามารถพิจารณารางดังกล่าวให้เป็นรางสั้นได้ และในอีกด้านหนึ่งสำหรับรางเชื่อมยาวนั้นการยืดหดตัวของรางจะทำให้เกิดหน่วยแรงบนหน้าตัดราง ซึ่งต้องมีการควบคุมขนาดของหน่วยแรงดังกล่าว เพื่อป้องกับความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น โดยมาตรฐาน มขร S-T-006 “มาตรฐานรางเชื่อมยาว” กำหนดว่า รางเชื่อมยาว คือ รางที่ยาวต่อเนื่องกันตั้งแต่ 90 เมตร ขึ้นไป

จากพฤติกรรมของรางเชื่อมยาวข้างต้น ทำให้การก่อสร้างรางเชื่อมยาวยังมีข้อจำกัดที่ต้องคำนึงถึง เช่น บริเวณที่รัศมีโค้งแคบ บริเวณสะพานสะพาน นอกจากนี้สภาพโครงสร้างทางรถไฟในบางกรณีไม่สามารถที่จะเชื่อมรางให้ยาวได้โดยตลอด จำเป็นต้องเว้นช่วงของรางเชื่อมยาวไว้เพื่อความปลอดภัย และป้องกันรางเดิน (Rail Creep) รางดุ้ง (Rail Buckling) โดยวางรางต่อเป็น Buffer Track ในช่วงต่อของรางเชื่อมยาวที่อุณหภูมิอาจมีการเปลี่ยนแปลงมาก หรือมีโอกาสเกิดรางเดินสูงจะออกแบบให้มีการติดตั้งจุดต่อเผื่อขยาย (Expansion Joint)

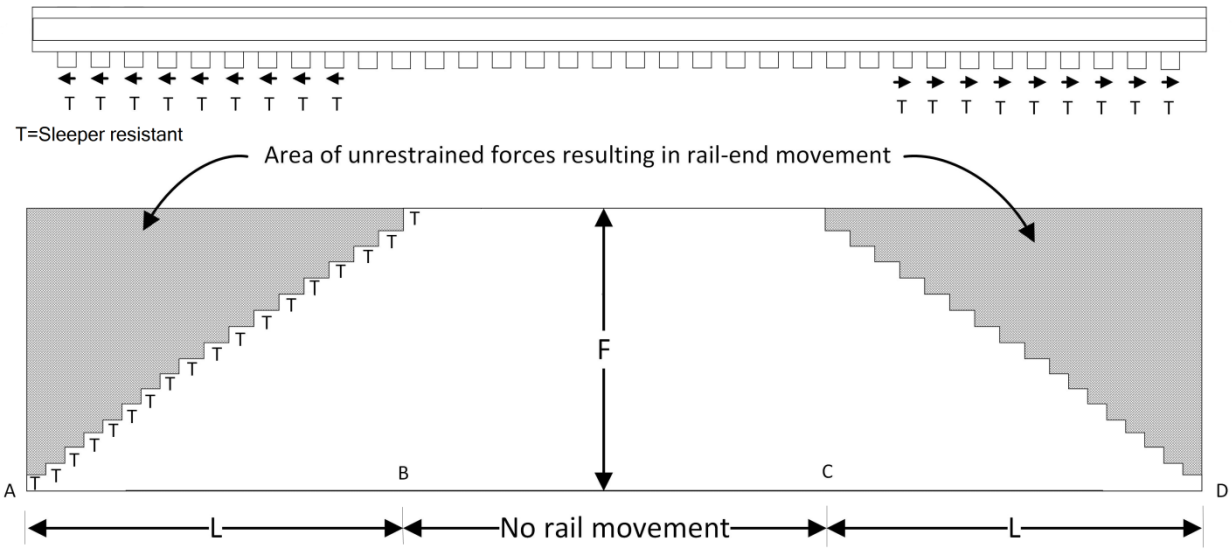
ในการออกแบบรางเชื่อมยาวจะต้องคำนึงตั้งแต่ขั้นตอนการวางราง โดยจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิขณะวางราง (Laying Temperature) ให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาง (10-15% ของค่าเฉลี่ย) เพื่อให้เกิดสภาวะปราศจากความเค้น (Stress Free) เมื่อติดตั้งรางเรียบร้อย ทั้งนี้เพื่อให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นขณะที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดมีค่าไม่เกินพิกัดปลอดภัยที่ได้ออกแบบไว้ โดยอุณหภูมิของการวางรางในแต่ละภาคของการรถไฟแห่งประเทศไทย ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 6-1

ตารางที่ 6-1 อุณหภูมิรางที่มีการบันทึกไว้ในประเทศไทย

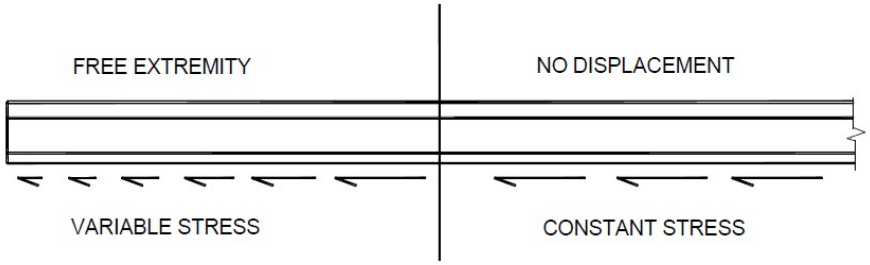
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ภูมิในประเทศไทย		
	เหนือ	กลาง	ใต้
สูงสุด	55	56	-
ต่ำสุด	-3	8	-
อุณหภูมิกลางสำหรับวางราง	30	35	30
สำหรับปฏิบัติการโดยอนุโลม	20-40	25-45	25-45

6.2 หน่วยแรงบนรางเชื่อมยาว

สำหรับทางรถไฟแบบมีหินโรยทางที่วางบนพื้นดินนั้น เมื่อรางมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็จะเกิดการยืดหดตัวขึ้น โดยส่วนปลายสุดของรางเชื่อมยาวจะมีการเคลื่อนที่สูงที่สุด จากนั้นหมอนแต่ละท่อนในบริเวณถัดมาด้านในจะต้านทานการเคลื่อนที่ (Tie Restraint) จนกระทั่งสามารถต้านทานแรงทั้งหมดได้ โดยหน่วยแรงในรางจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนคงที่ซึ่งจะกินพื้นที่เป็นระยะที่เรียกว่า Breathing Length ดังรูปที่ 6-1 และรูปที่ 6-2 ทั้งนี้ในการออกแบบจะต้องมีการตรวจสอบว่าหน่วยแรงบนหน้าตัดรางนั้นยังอยู่ภายใต้พิกัดความปลอดภัยจากการคืบการดุ้งและการขาดของราง



รูปที่ 6-1 พฤติกรรมการยืดหดของรางเชื่อมยาวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 6-2 การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในรางเชื่อมยาวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การยืดหดของรางเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 6-1

$$\Delta\varepsilon = \alpha \cdot \Delta t \qquad \text{สมการที่ 6-1}$$

โดยที่ $\Delta\varepsilon$ คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความยาวหนึ่งหน่วยของราง

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของรางเนื่องจากอุณหภูมิ

Δt คือ ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

ดังนั้น สามารถคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของรางได้โดยสมการที่ 6-2

$$\Delta\sigma = \Delta\varepsilon \cdot E = \alpha \cdot \Delta t \cdot E \qquad \text{สมการที่ 6-2}$$

เมื่อแทนค่า $\alpha = 0.0000105 \,/\, C^{o}$ และค่า $E = 2.1\times10^{5} MPa$ จะได้ค่าหน่วยแรงดังสมการที่ 6-3 ดังนี้

$$\Delta\sigma = 2.205 \cdot \Delta t \;\; MPa \qquad \text{สมการที่ 6-3}$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อหากอุณหภูมิเปลี่ยนไป 1 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงขึ้นในหน้าตัดรางเท่ากับ 2.205 เมกะปาสคาล โดยจะต้องมีการตรวจสอบภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปสูงสุดว่าค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นอยู่ต่ำกว่าพิกัดที่ยอมให้ตามที่กำหนดในมาตรฐาน มขร S-T-006 “มาตรฐานรางเชื่อมยาว”



ตัวอย่าง หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในหน้าตัดรางเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 30 องศาเซลเซียส

$$\Delta\sigma = 2.205 \cdot 30 = 66.15\,MPa$$ สมการที่ 6-4

พบว่า หน่วยแรงอัดในหน้าตัดเพิ่มขึ้น 66.15 เมกะปาสคาล เมื่อเปรียบเทียบกับพิกัดความปลอดภัยตามมาตรฐาน มขร S-T-006 “มาตรฐานรางเชื่อมยาว” ซึ่งมีค่าพิกัดในด้านแรงอัดเท่ากับ 72 เมกะปาสคาล จะเห็นได้ว่ารางเชื่อมยาวที่อุณหภูมิเปลี่ยนไป 30 องศาเซลเซียส ยังอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัย

อย่างไรก็ตาม เสถียรภาพและความปลอดภัยของรางเชื่อมยาวนั้น ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างทางรถไฟ ดังนั้นการตรวจสอบและซ่อมบำรุงทางวิ่งให้สมบูรณ์อยู่ตลอดจึงเป็นวิธีการป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับรางเชื่อมยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

เมื่อรางเชื่อมยาวมีการยืดหดตัว หมอนแต่ละท่อนจะช่วยกันต้านทานการเคลื่อนตัวดังกล่าว โดยเมื่อทราบถึงแรงต้านทานของหมอนแต่ละตัว จะสามารถหาจำนวนของหมอนได้โดยสมการที่ 6-5

$$N = \frac{\Delta\sigma \cdot A_{rail}}{T}$$ สมการที่ 6-5

โดยที่

N คือ จำนวนหมอนที่ต้องการในการต้านทานการยืดหดตัวของรางเชื่อมยาว

A_{rail} คือ หน้าตัดของราง 1 เส้น

T คือ แรงต้านทานการเคลื่อนตัวของหมอนต่อราง 1 เส้น

ตัวอย่าง รางเชื่อมยาวหน้าตัด UIC-60 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 30 องศาเซลเซียส (หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ $66.15\,MPa$)

เมื่อหน้าตัดรางขนาด UIC-60 เท่ากับ $A_{rail} = 76.86\,cm^2 = 7.686\times10^{-3}\,m^2$

จะได้แรงในหน้าตัดราง 1 เส้น เท่ากับ $P = 66.15\times7.686\times10^3 = 5.084\times10^5\,N$ หรือ ประมาณ 52 ตัน

สมมุติให้แรงต้านทานของหมอนต่อราง 1 เส้น เท่ากับ 500 กิโลกรัม หรือ 4905 นิวตัน จะได้เท่ากับ

$$N = \frac{5.084\times10^5}{4905} \approx 104$$

ดังนั้น จำนวนของหมอนที่ช่วยต้านทานการเคลื่อนที่ของราง คือ **104 ท่อน**

เมื่อทราบถึงจำนวนของหมอนที่ที่ช่วยกันต้านทานการเคลื่อนตัวแล้วจะสามารถทำให้คำนวณค่า Breathing Length ได้โดยสมการที่ 6-6



$$L = (N-1)S$$ สมการที่ 6-6

โดยที่ S คือ ระยะห่างของหมอน

ตัวอย่าง รางเชื่อมยาวหน้าตัด UIC-60 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 30 องศาเซลเซียส ระยะห่าง หมอน 60 เซนติเมตร (จำนวนหมอนที่ต้านทานแรงในแนวยาว 104 ท่อน) ดังนั้น ช่วงความยาวของรางที่ยืดหดตัว (Breathing Length) จะได้เท่ากับ

$$L = (104-1)\cdot 0.6 \approx 62\,m$$

เมื่อได้ช่วงความยาวของรางที่ยืดหดตัว (Breathing Length) และประกอบกับเมื่อพิจารณาถึงการกระจายตัวของหน่วยแรงจากปลายของรางซึ่งค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงแล้ว จะสามารถคำนวณค่าการยืดหดตัวของปลายรางได้โดยสมการที่ 6-7

$$\Delta L = \frac{\alpha \cdot \Delta t \cdot L}{2}$$ สมการที่ 6-7

อย่างไรก็ตาม รางรถไฟจะถูกผลิตออกมาเป็นท่อน ๆ ซึ่งมีความยาวไม่เท่ากันตามแต่ขนาดหน้าตัดราง ซึ่งทำให้ต้องมีการคำนวณจำนวนท่อนของรางที่มีการยืดหดตัวได้ ดังสมการที่ 6-8

$$n_{rail} = \frac{L}{L_{rail}}$$ สมการที่ 6-8

โดยที่ n_{rail} คือ จำนวนท่อนของรางบริเวณที่มีการยืดหดตัว

L_{rail} คือ ความยาวของราง 1 เส้น



ตัวอย่าง รางเชื่อมยาวหน้าตัด UIC-60 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 30 องศาเซลเซียส (ช่วงความยาวของรางที่ยืดหดตัว 64 เมตร)

กำหนดให้รางมาตรฐาน UIC-60 ความยาวจากการผลิต 25 เมตร จะได้

$$n_{rail} = \frac{64}{25} = 2.56 \text{ หรือเท่ากับ 3 ท่อน}$$

ดังนั้น การคำนวณค่าการยืดหดตัวของปลายรางใน สมการที่ 6-9 จะถูกปรับเป็น

$$\Delta L = \frac{\alpha \cdot \Delta t \cdot n_{rail} \cdot L_{rail}}{2} \qquad \text{สมการที่ 6-9}$$

ตัวอย่าง การยืดหดตัวของรางเชื่อมยาวหน้าตัด UIC-60 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 30 องศาเซลเซียส

$$\Delta L = \frac{0.0000105 \cdot 30 \cdot 3 \cdot 25}{2} = 0.024\,m = 2.4\,cm$$

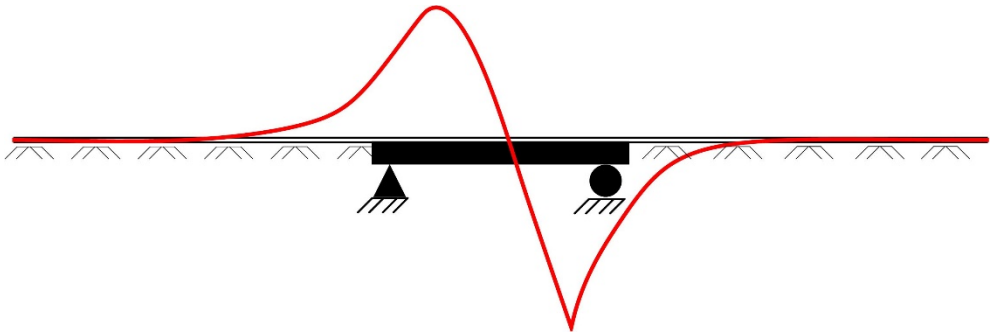
ทั้งนี้ เมื่อทราบถึงค่าการยืดหดตัวของรางแล้วจะสามารถวางแผนการก่อสร้างบริเวณปลายรางได้ต่อไป เช่น วางรางต่อเป็น Buffer Track หรืออาจติดตั้งรอยต่อรางแบบเผื่อขยาย(Rail Expansion Joint) เพื่อรองรับการยืดหดตัว เป็นต้น

6.3 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างทางรถไฟที่วางรางเชื่อมยาวและสะพาน

ทางรถไฟแบบรางเชื่อมยาวบนสะพานจะได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของสะพานซึ่งส่งผลให้แรงกระทำบนหน้าตัดรางเปลี่ยนแปลงไปในอีกด้านหนึ่ง แรงที่เกิดขึ้นบนรางก็จะถ่ายลงสู่สะพานและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของสะพานเช่นกัน โดยพฤติกรรมดังกล่าวเรียกว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างทางรถไฟและสะพาน (Track-Bridge interaction) ซึ่งจะส่งผลสำคัญต่อพฤติกรรมของโครงสร้างทั้งสองดังนี้

- แรงที่กระทำบนรางเชื่อมยาวจะถ่ายลงสู่สะพาน ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของจุดรองรับของสะพานและโครงสร้างคานสะพาน
- การเคลื่อนตัวของสะพานซึ่งมีทั้งการเคลื่อนที่ของจุดรองรับและการเสียรูปของโครงสร้างคานสะพาน จะทำให้เกิดแรงบนรางเชื่อมยาว รวมไปถึงสะท้อนกลับให้เกิดแรงที่เพิ่มขึ้นบนจุดรองรับของสะพาน

เองด้วยเช่นกันแสดงดังรูปที่ 6-3 แสดงถึงรูปร่างของหน่วยแรงที่กระจายไปตามความยาวของสะพานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งจะสังเกตุได้ว่ากระจายตัวของแรงบนความยาวของรางจะแตกต่างไปจากทางรถไฟที่วางบนพื้นดิน โดยในการออกแบบจะต้องวิเคราะห์และตรวจสอบให้แรงบนหน้าตัดราง รวมไปถึงแรงบนชิ้นส่วนและการเคลื่อนที่ของสะพานนั้น อยู่ภายใต้พิกัดความปลอดภัย



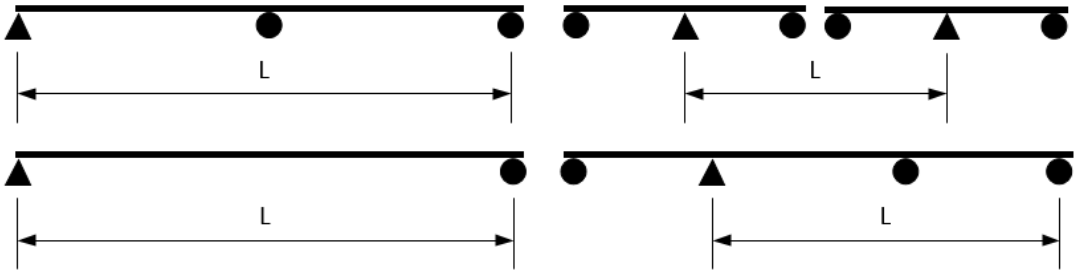
รูปที่ 6-3 การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในรางเชื่อมยาวบนสะพานจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

6.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ของทางรถไฟและสะพาน

ปัจจัยจากสะพาน

- ความยาวช่วงของสะพานที่สามารถขยับได้ทางแนวยาว (expansion length)

โดยสะพานแต่ละชนิดจะมีการเคลื่อนที่ได้แตกต่างกัน สำหรับการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ของทางรถไฟและสะพาน จะเน้นไปที่การเคลื่อนที่ในแนวยาวของสะพาน โดยจุดที่มีการเคลื่อนตัวในแนวยาวที่สูงจะทำให้เกิดหน่วยแรงบนรางที่สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ในการวิเคราะห์จะเน้นไปที่บริเวณมีโอกาสเคลื่อนตัวในแนวยาวได้มาก ๆ ของสะพาน เช่น ช่วงที่มีความยาวมาก ๆ หรือช่วงที่มีจุดรองรับแบบ roller ต่อเนื่องกัน เป็นต้น ดังรูปที่ 6-4



รูปที่ 6-4 รูปแบบโครงสร้างของสะพานที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ในแนวยาวของรางเชื่อมยาว



- ความแข็งเกร็งของจุดรองรับ (support stiffness)

จะมีผลต่อขนาดการเคลื่อนตัวของสะพานบริเวณจุดรองรับ หมายความว่าถ้าจุดรองรับของสะพานมีความแข็งเกร็งต่ำ รางด้านบนก็จะสามารถยืดหดตัวได้อย่างสะดวก แต่หากจุดรองรับของสะพานมีความแข็งเกร็งที่สูง การยืดหดตัวของรางบริเวณจุดรองรับของสะพานก็จะถูกจำกัดให้น้อยลง ทั้งนี้ ค่าความความแข็งเกร็งของจุดรองรับจะเกี่ยวข้องกับ 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 แป้นรองรับของสะพาน (bridge bearing) ซึ่งแป้นแต่ละชนิดจะมีค่าความแข็งเกร็งที่ต่างกัน โดยในการวิเคราะห์จะต้องใช้ค่าที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริง นอกจากนี้แป้นบางชนิดอาจต้องจำลองความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปแบบของความเสียดทาน ซึ่งในการวิเคราะห์อาจใช้ค่าสัมประสิทธ์ความเสียดทานระหว่าง 0 ถึง 5 เปอร์เซ็น

ส่วนที่ 2 ตอม่อสะพาน (bridge pier) ลักษณะโครงสร้างของตอม่อสะพาน จะมีผลให้ค่าความแข็งเกร็งมีความแตกต่างกันไป เช่น ตอม่อบริเวณคันดิน และตอม่อที่มีลักษณะเป็นเสา เป็นต้น โดยในการวิเคราะห์จะต้องจำลองปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งเกร็งให้สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างเช่น ความแข็งเกร็งที่ลดลงเมื่อเพิ่มความยาวของเสาตอม่อ ลักษณะการยึดแน่นของจุดรองรับ เป็นต้น ทั้งนี้ ในการประมาณหาค่าความแข็งเกร็งในการต้านทาการเคลื่อนที่ในแนวยาวของสะพานนั้น สามารถประมาณค่าได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำในแนวนอน H และการเคลื่อนที่ในแนวนอนที่ปลายตอม่อ δ รูปที่ 6-5 แสดงการประมาณค่าความแข็งเกร็งสำหรับตอม่อสะพาน โดยใช้การรวมผลลัพธ์ของการเคลื่อนที่แบบต่าง ๆ ในตอม่อเข้าด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ได้สมการที่ 6-10 ในการคำนวณค่าความแข็งเกร็งดังนี้

$$K_P = \frac{H}{\delta}$$ สมการที่ 6-10

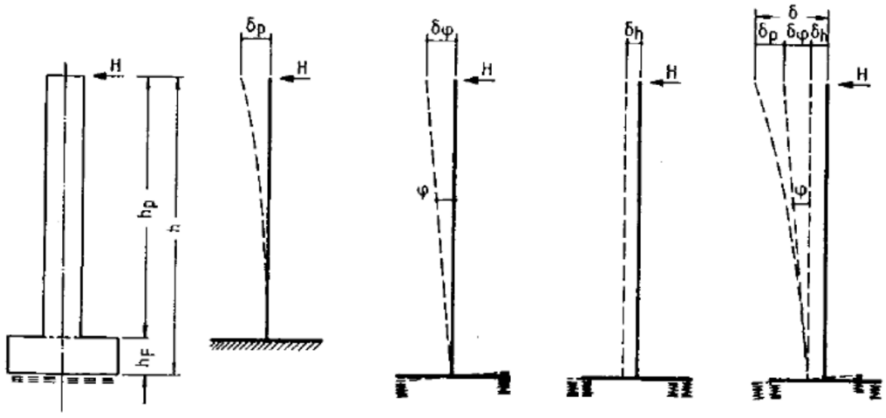
โดยที่

δ คือ $\delta_p + \delta_\varphi + \delta_h$

δ_p คือ ค่าการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการแอ่นตัวของเสาตอม่อ

δ_φ คือ ค่าการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเอียงตัวของฐานรากของเสาตอม่อ

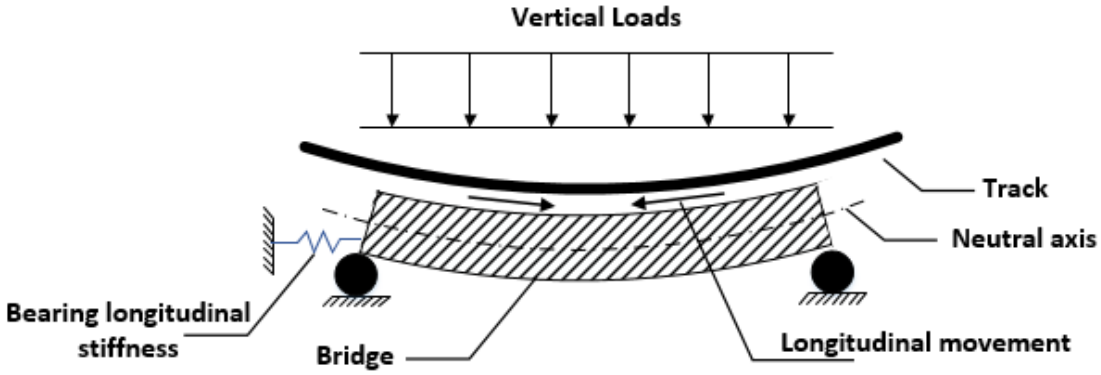
δ_h คือ ค่าการเคลื่อนที่ ที่เกิดจากการขยับตัวในแนวนอนของฐานรากของเสาตอม่อ



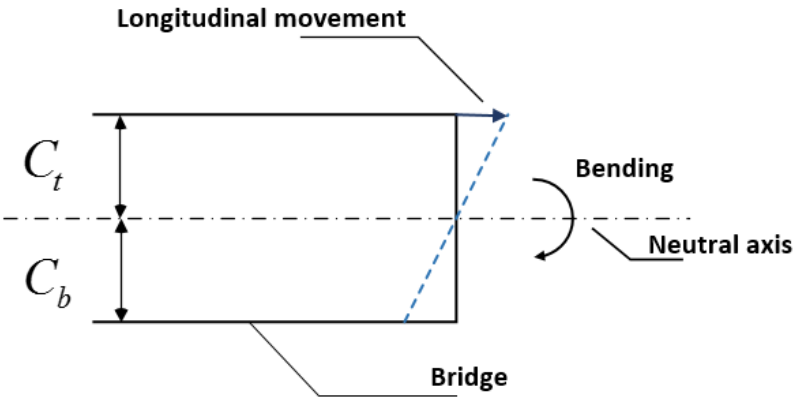
รูปที่ 6-5 การประมาณค่าความแข็งเกร็งในแนวนอนสำหรับตอม่อสะพาน

- ความแข็งเกร็งต่อการแอ่นตัวของคานสะพาน (bridge girder bending stiffness

เมื่อสะพานเกิดการแอ่นตัวในแนวดิ่ง จะเกิดการขยับตัวในแนวราบของพื้นสะพานที่รองรับทางรถไฟ ยกตัวอย่างเช่น หากคานสะพานแอ่นตัวลง ทางรถไฟที่วางอยู่ด้านบนก็จะเกิดการเคลื่อนที่เข้าหากันในแนวยาว และจะทำให้เกิดแรงอัดขึ้น แสดงดังรูปที่ 6-6 ซึ่งปัจจัยหลักมาจากความแข็งเกร็งต่อการแอ่นตัวของคานสะพาน รวมไปถึงระยะจากแกนสะเทินถึงผิวทางวิ่งของสะพาน (depth of neutral axis) แสดงดังรูปที่ 6-7 โดยในการวิเคราะห์จะต้องจำลองพฤติกรรมการดัดของสะพานและขนาดของการเคลื่อนตัวในแนวยาวบนพื้นสะพานได้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง



รูปที่ 6-6 การเคลื่อนที่ในแนวยาวของทางวิ่งเนื่องจากการแอ่นตัวของสะพาน

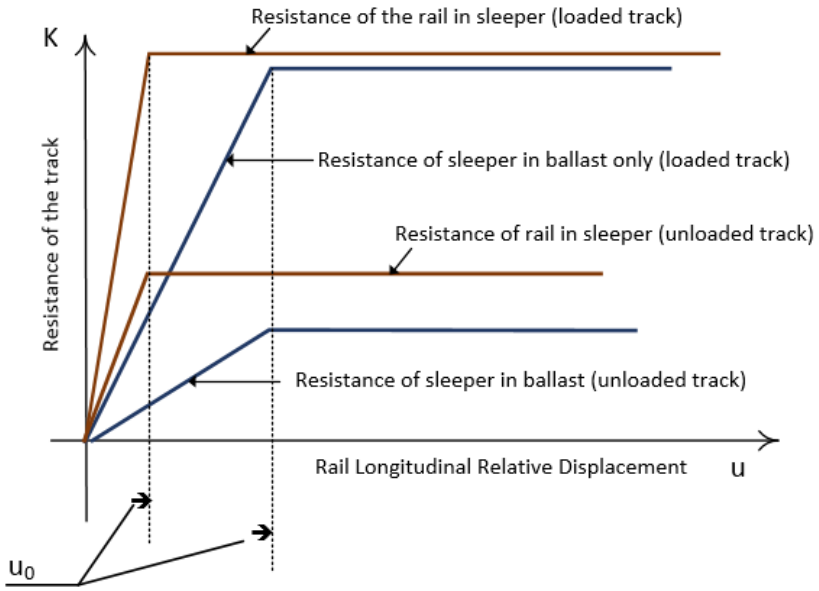


รูปที่ 6-7 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งแกนสะเทินและการเคลื่อนที่ในแนวยาวบนผิวสะพาน

ปัจจัยจากทางรถไฟ

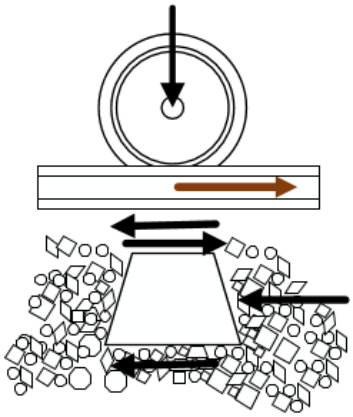
- ความต้านทานต่อแรงกระทำในแนวยาวของทางรถไฟ

แรงต้านในแนวยาวของทางรถไฟนั้นมาจาก 2 ส่วนหลักคือ 1) แรงเสียดทานจากอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง และ 2) แรงต้านจากหมอน ซึ่งจากการทดสอบพบว่าแรงต้านดังกล่าวจะมีพฤติกรรม 2 แบบคือ **แบบที่ 1** เมื่อการการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแนวยาวของรางมีค่าต่ำ แรงต้านทานจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับขนาดของการเคลื่อนที่ (Linear Behavior) **แบบที่ 2** เมื่อการเคลื่อนที่มีขนาดสูงขึ้นจนเกินพิกัดแล้ว แรงต้านจะไม่เพิ่มขึ้นตามขนาดของการเคลื่อนที่อีกต่อไป (Plastic Behavior) ดังรูปที่ 6-8 แสดงถึงความสัมพันธ์ของแรงต้านของทางรถไฟกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแนวยาวของราง โดยจะสังเกตุได้ว่ากำลังของทางรถไฟเมื่อมีน้ำหนักแนวดิ่งกดทับนั้นจะมีค่าสูงกว่าทางรถไฟเมื่อไม่มีน้ำหนักกดทับ กล่าวคือ เมื่อมีแรงกดบนรางน้อย การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ส่วนใหญ่จะเกิดในบริเวณหน้าสัมผัสของหมอนและหินโรยทาง แต่หากมีแรงกดบนรางมากขึ้นถึงจุดหนึ่ง จะทำให้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์เริ่มเกิดมากขึ้นบริเวณอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง ตามลำดับ



รูปที่ 6-8 พฤติกรรมความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ในแนวยาวของทางรถไฟ

เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมความต้านทานของทางรถไฟในรูปที่ 6-8 จะพบว่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแนวยาวของรางมีผลโดยตรงต่อขนาดของแรงต้าน โดยในสภาวะจริงนั้น การเคลื่อนที่สัมพัทธ์จะเกิดขึ้นบน 2 บริเวณคือ 1) บริเวณอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางโดยผ่านทางหน้าสัมผัสของรางและหมอน และ 2) บริเวณหน้าสัมผัสของหมอนและหินโรยทาง แสดงดังรูปที่ 6-9



รูปที่ 6-9 ปัจจัยของความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ในแนวยาวของทางรถไฟ



โดยปกติสำหรับทางรถไฟชนิดที่วางบนหินโรยทางจะใช้ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ณ จุดที่มีพฤติกรรมแบบพลาสติก ดังนี้

$u_0 = 0.5mm$ สำหรับการจำลองความต้านทานบริเวณอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

$u_0 = 2.0mm$ สำหรับการจำลองความต้านทานบริเวณหน้าสัมผัสของหมอนและหินโรยทาง

สำหรับทางรถไฟบนหินโรยทาง ความต้านทานต่อการเคลื่อนตัวในแนวยาวขณะที่ไม่มีน้ำหนักกดทับจะขึ้นอยู่กับแรงต้านจากหมอน ดังนี้

$k = 12\,KN/m$ สำหรับทางวิ่งบนหินโรยทางสภาพปานกลาง ขณะมีน้ำหนักกดทับ

$k = 20\,KN/m$ สำหรับทางวิ่งบนหินโรยทางสภาพดี ขณะมีน้ำหนักกดทับ

และหากมีน้ำหนักกดทับบนรางจะทำให้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์เปลี่ยนตำแหน่งไปอยู่บริเวณอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง ซึ่งจะทำให้แรงต้านทานมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเท่ากับ

$k = 40\,KN/m$ สำหรับทางวิ่งบนหินโรยทางขณะไม่มีน้ำหนักกดทับ

สำหรับทางรถไฟที่ไม่มีหินโรยทางที่ใช้อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางเข้ากับทางวิ่งโดยตรง (direct fixation) ความต้านทานต่อการเคลื่อนตัวในแนวยาวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางเป็นหลัก โดยจะมีค่าความต้านทานดังนี้

$k = 40\,KN/m$ สำหรับทางวิ่งช่วงที่ไม่มีน้ำหนักกดทับ

$k = 60\,KN/m$ สำหรับทางวิ่งช่วงมีน้ำหนักกดทับ

โดยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์จะเกิดในบริเวณอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางเช่นเดียวกัน และจุดที่เริ่มมีพฤติกรรมแบบพลาสติกคือ $u_0 = 0.5mm$

- ความต้านทานต่อแรงกระทำในแนวด้านข้างของทางรถไฟ

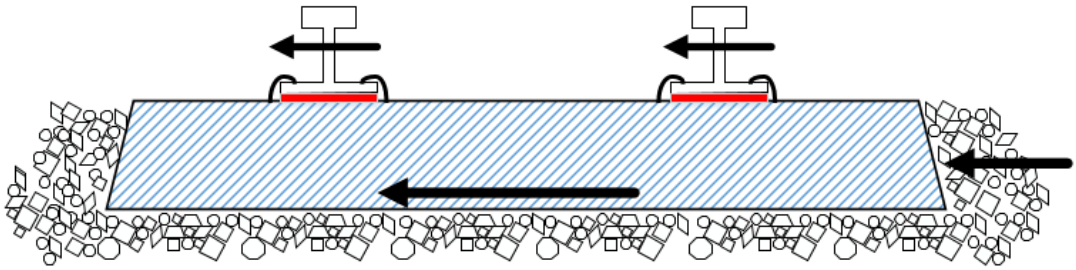
ความต้านทานต่อแรงกระทำในแนวด้านข้างของทางรถไฟมีผลสำคัญต่อเสถียรภาพของรางเชื่อมยาว เนื่องจากขณะที่แรงอัดในรางมีค่าสูงถึงจุดวิกฤตินั้นรางจะเริ่มโก่งออกด้านข้าง โดยสิ่งที่จะช่วยต้านทานการโก่งดังกล่าว คือแรงต้านทานจากด้านข้างที่มีอยู่ของทางรถไฟ แสดงดังรูปที่ 6-10 ซึ่งสำหรับทางรถไฟบนหินโรยทางนั้น ความต้านทานทางด้านข้างจะมาจาก 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ความต้านทานจากตัวราง ซึ่งแปรผันกับขนาดหน้าตัดของราง (โมเมนต์ความเฉื่อยในแกนรอง) โดยความต้านทานในส่วนนี้นับเป็นส่วนน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานจากส่วนอื่น

ส่วนที่ 2 ความต้านทานจากความเสียดทานใต้หมอน ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานซึ่งแปรผันกับน้ำหนักของหมอน โดยเฉพาะหมอนคอนกรีตที่มีน้ำหนักมาก ทำให้มีแรงต้านทานต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงกว่า

หมอนชนิดอื่น โดยจะพบว่าในประเทศไทยนั้น ปัญหารางดุ้งมีแนวโน้มลดลงอย่างมากหลังจากที่ปรับปรุงทางวิ่งโดยใช้หมอนคอนกรีต

ส่วนที่ 3 ความต้านทานจากหินโรยทางบริเวณหัวหมอน ซึ่งหินโรยทางจะทำหน้าที่เหมือนผนังต้านทานบริเวณหัวหมอนไม่ให้ขยับออกด้านข้าง ดังนั้นในการก่อสร้างจึงจำเป็นต้องมีการใส่หินโรยทางไว้บริเวณหัวหมอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณทางโค้งซึ่งจะมีแรงกระทำจากแรงเข้าสู่ศูนย์กลางของรถไฟเข้ามาร่วมด้วย



รูปที่ 6-10 แสดงถึงความต้านทานต่อแรงกระทำในแนวด้านข้างของทางรถไฟบนหินโรยทาง

สำหรับทางรถไฟที่ไม่มีหินโรยทางนั้น ปกติแล้วพื้นโครงสร้างทางรถไฟจะมีความต้านทานต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างที่สูงกว่าทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของรางและคุณสมบัติในการต้านทานแรงด้านข้างของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางเป็นหลัก

<u>ปัจจัยจากแรงกระทำ</u>

ตลอดอายุการใช้งาน รางเชื่อมยาวจะถูกแรงกระทำอยู่ตลอดเวลา ทั้งแรงกระทำจากล้อรถไฟ แรงจากการขยับตัวของโครงสร้างด้านใต้ราง รวมไปถึงการยืดหดของรางเอง แรงเหล่านี้ ล้วนทำให้เกิดหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นบนหน้าตัดราง อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพของรางเชื่อมยาวจากการขาด (Rail Fracture) และการโก่งเดาะออกด้านข้าง (Rail Buckling) จะคำนึงถึงแรงที่ส่งผลให้เกิดหน่วยแรงตามยาวบนหน้าตัดรางเป็นหลัก (Longitudinal Stress) ซึ่งแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

การยืดหดตัวของรางและโครงสร้างสะพานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจะทำให้เกิดการขยายและหดตัวของวัสดุ ซึ่งปกติแล้วอุณหภูมิของรางที่เปลี่ยนไปจะมีค่าแตกต่างไปจากสะพานและจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ๆ แตกต่างกันขึ้น โดย**มาตรฐาน มขร S-T-006** “มาตรฐานรางเชื่อมยาว” ได้กำหนดค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์หน่วยแรงในรางเชื่อมยาว ดังนี้

- สำหรับการวิเคราะห์ทางรถไฟที่วางบนพื้นดิน ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของราง ± 30 องศาเซลเซียสในบริเวณเปิดและ ± 20 องศาเซลเซียส ในบริเวณอุโมงค์



- สำหรับการวิเคราะห์ทางรถไฟที่วางบนสะพาน ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของรางบนสะพาน ± 50 และค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของสะพาน ± 35 องศาเซลเซียส
- ค่าอุณหภูมิที่ต่างกันของสะพานและรางไม่เกิน ± 20 องศาเซลเซียส (ในกรณีที่ติดตั้ง Rail Expansion Device)

แรงแรงจากการเร่งและเบรคของรถไฟ จะเป็นแรงที่กระทำโดยตรงต่อรางซึ่งแปรผันไปกับน้ำหนักของขบวนรถไฟ สัมประสิทธ์ความเสียดทานระหว่างล้อและราง ประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนและระบบเบรค โดยมาตรฐาน มขร S-T-006 “มาตรฐานรางเชื่อมยาว” ได้กำหนดค่าแรงจากการเร่งและเบรคของรถไฟไว้ดังนี้

- ค่าแรงในแนวยาวจากการเร่งของรถไฟ 33 KN/m ต่อหนึ่งช่องทางวิ่ง โดยค่าแรงสูงสุดไม่เกิน 1,000 KN
- ค่าแรงในแนวยาวจากการเบรกของรถไฟ 20 KN/m ต่อหนึ่งช่องทางวิ่ง โดยค่าแรงสูงสุดไม่เกิน 6,000 KN

โดยค่าข้างต้นนั้น อ้างอิงจากทางวิ่งขนาดมาตรฐาน (1.435 เมตร) หากทางวิ่งมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากนี้จะต้องมีการกำหนดค่าแรงดังกล่าวให้สอดคล้องกับสภาวะใช้งานจริง

การขยับตัวในแนวยาวใต้ทาง เนื่องจากการแอ่นตัวของสะพาน โดยการแอ่นตัวของสะพานจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวยาวของทางรถไฟดังได้กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้ ในการวิเคราะห์การแอ่นตัวของสะพานสามารถใช้น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบสะพานในการคำนวณได้ อย่างไรก็ตามตำแหน่งและรูปแบบการจัดวางแรงกระทำจะต้องทำให้เกิดหน่วยแรงในแนวยาวสูงสุดขึ้นบนหน้าตัดราง

ในการออกแบบและตรวจสอบความปลอดภัยของรางเชื่อมยาวนั้น ผู้วิเคราะห์จะต้องกำหนดรูปแบบและตำแหน่งของแรงกระทำ ทั้ง 3 กรณีและวิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวสูงสุด (Maximum Values) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพฤติกรรมการต้านทานแรงของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวและหมอน มีลักษณะแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งจะทำให้การนำค่าผลการวิเคราะห์ มารวมกันโดยตรง (Direct Combination) มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง โดยผู้รับผิดชอบจะต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์เพื่อให้แน่ใจว่าวิธีการรวมกันของผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับสภาวะจริง หรือในกรณีที่โครงสร้างมีความซับซ้อนสูง อาจจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์และรวมผลลัพธ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis)



6.4 การตรวจสอบและประเมินความปลอดภัย

ความปลอดภัยของรางเชื่อมยาวจะขึ้นอยู่กับขนาดของหน่วยแรงบนหน้าตัดราง ความต้านทานของทางวิ่ง รวมไปถึงขนาดการเคลื่อนที่ของสะพาน ซึ่งค่าพิกัดความปลอดภัยได้ถูกกำหนดไว้ตามมาตรฐาน มขร S-T-006 “มาตรฐานการออกแบบรางเชื่อมยาว” ดังนี้

6.4.1 หน่วยแรงในแนวยาวที่ยอมให้บนหน้าตัดราง

ค่าที่ยอมให้มากสุดของส่วนเพิ่มเติมในหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในรางเชื่อมยาวบนทางวิ่งแบบมีหินโรยทาง สามารถแบ่งได้ตามความกว้างของรัศมีโค้ง ดังนี้

$$R \geq 1500\,m \quad \sigma_c = 72\,N/mm^2$$
$$R \geq 700\,m \quad \sigma_c = 58\,N/mm^2$$
$$R \geq 600\,m \quad \sigma_c = 54\,N/mm^2$$
$$R \geq 300\,m \quad \sigma_c = 27\,N/mm^2$$

ค่าที่ยอมให้มากสุดของส่วนเพิ่มเติมในหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในรางเชื่อมยาวบนทางวิ่งแบบมีหินโรยทาง เท่ากับ $\sigma_t = 92\,N/mm^2$

ค่าที่ยอมให้มากสุดของส่วนเพิ่มเติมในหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในรางเชื่อมยาวบนทางวิ่งแบบไม่มีหินโรยทาง เท่ากับ $\sigma_c = 92\,N/mm^2$

ค่าที่ยอมให้มากสุดของส่วนเพิ่มเติมในหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในรางเชื่อมยาวบนทางวิ่งแบบไม่มีหินโรยทาง เท่ากับ $\sigma_t = 92\,N/mm^2$

<u>ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ยอมให้</u>

- ค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในแนวยาวสูงสุดที่ยอมให้ระหว่างรางกับตัวสะพานหรือคันทาง (Embankment) ภายใต้แรงเนื่องจากการเบรกหรือความเร่ง เท่ากับ $\Delta_{rel} \pm 4mm$
- ค่าการเคลื่อนตัวตามแนวยาวของตัวสะพานที่ยอมให้มากสุด ภายใต้แรงเนื่องจากการเบรกหรือความเร่ง คือ $\Delta_{\max} \pm 5mm$ เมื่อรางเชื่อมยาววางพาดอยู่ระหว่างปลายทั้งสองด้านหรือข้างใดข้างหนึ่งของบริเวณเชื่อมต่อ (Transition) ระหว่างสะพานและคันทาง
- หากรางเชื่อมยาววางตัวอยู่บนโครงสร้างทางแบบมีหินโรยทางร่วมกับ Rail Expansion Devices ค่าการเคลื่อนตัวตามแนวยาวของตัวสะพานที่ยอมให้มากสุดภายใต้แรงเนื่องจากการเบรกหรือความเร่งจะมีค่าเท่ากับ $\Delta_{\max} \pm 30mm$

นอกจากนี้ต้องมีการตรวจสอบการหมุนและการเคลื่อนที่ ๆ ปลายสะพาน ไม่ให้มากจนทำให้ระดับของผิวทางวิ่งเปลี่ยนไปจนกระทั่งกระทบต่อความปลอดภัยของรถไฟ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ตามมาตรฐาน มขร S-T-008 ได้กล่าวถึงรายละเอียดสำหรับบริเวณรอยต่อระหว่างทางรถไฟและสะพาน (Transition zone)

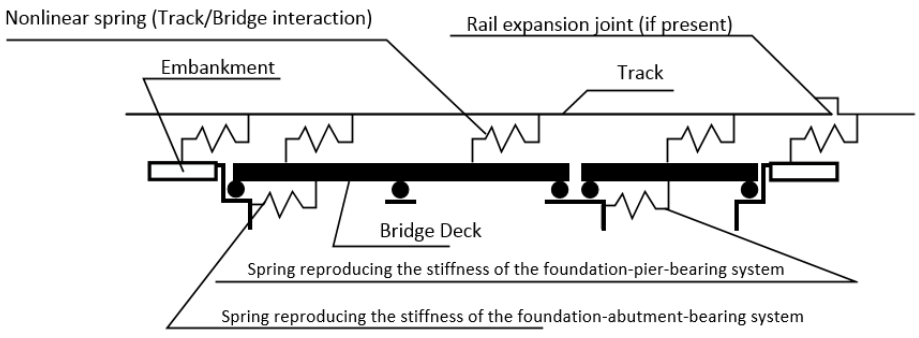
อย่างไรก็ตาม ค่าพิกัดปลอดภัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ตั้งอยู่บนข้อมูลของทางรถไฟขนาดมาตรฐาน 1.435 เมตร และใช้รางหน้าตัดขนาด UIC-60 เท่านั้น ดังนั้นการประยุกต์ใช้กับทางรถไฟที่มีลักษณะแตกต่างจากนี้ ผู้รับผิดชอบจะต้องมีการศึกษาและตรวจสอบถึงความถูกต้องของค่าพิกัดปลอดภัยก่อนที่จะนำมาใช้งาน รวมทั้งในการรับรองความปลอดภัยนั้น จะต้องมีการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีการตรวจวัดจากโครงสร้างจริง เพื่อให้แน่ใจว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองนั้นสอดคล้องมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับสภาวะจริง

6.5 การใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์โครงสร้างรางเชื่อมยาว

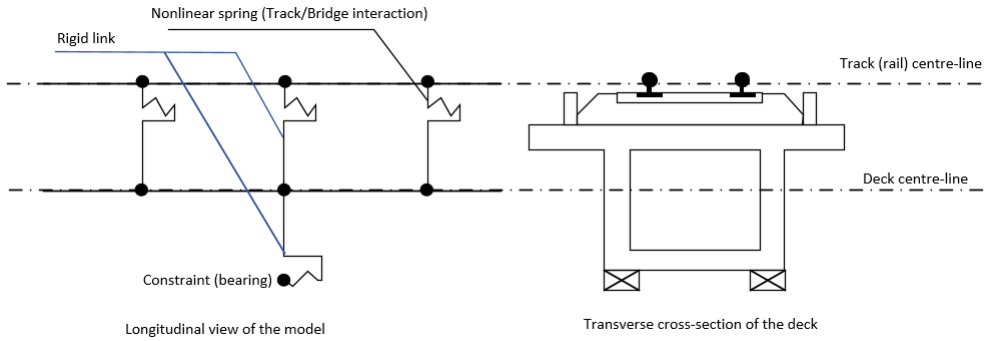
ในกรณีที่โครงสร้างมีความซับซ้อน อาจจำเป็นต้องใช้โปรแกรมช่วยในการคำนวณ ซึ่งความถูกต้องของผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง

สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ของทางรถไฟและสะพานนั้น จะเน้นในการวิเคราะห์หาแรงที่กระทำตลอดความยาวของรางรวมไปถึงแรงที่เพิ่มขึ้นบนจุดรองรับของสะพาน ซึ่งทำให้แบบจำลองโครงสร้างจะต้องสามารถแสดงถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่สัมพันธ์กันระหว่างทางรถไฟและผิวสะพานได้ นอกจากนี้ ยังต้องสามารถแสดงพฤติกรรมการขยับตัวของจุดรองรับได้อย่างใกล้เคียงกับความเป็นจริงด้วยเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 6-11 และรูปที่ 6-12

โดยโปรแกรมที่จะนำมาใช้ในการออกแบบจะต้องมีการทดสอบความถูกต้องโดยอ้างอิงกับขั้นตอนและผลการวิเคราะห์ตามที่ให้รายละเอียดไว้ในมาตรฐาน “UIC 774-3R Track-Bridge Interaction/Recommendation for calculations”



รูปที่ 6-11 แบบจำลองการวิเคราะห์รางเชื่อมยาวบนสะพาน



รูปที่ 6-12 รายละเอียดการจำลองความลึกของสะพานในการวิเคราะห์รางเชื่อมยาว

6.6 การก่อสร้างรางเชื่อมยาว

หลักการในการก่อสร้างทางรถไฟรางเชื่อมยาวมี มีขั้นตอนดังนี้

1) การเชื่อมรางสามารถทำได้โดยวิธีเชื่อมด้วยไฟฟ้า (Electric Flash Butt Welding) จากโรงงาน ซึ่งเป็นรางธรรมดามาเชื่อมต่อกัน ส่วนการเชื่อมหัวต่อรางในทางนั้น ใช้เชื่อมด้วยวิธีเธอร์มิต (Thermit Welding) เชื่อมไฟฟ้าในที่ (Mobile Flash Butt) หรือวิธีอื่น ๆ

2) การวางรางเชื่อมยาวนั้น ต้องวางในขณะที่อุณหภูมิของรางมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลางคือ 30 องศาเซลเซียส หากมีการวางรางที่อุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิกลางมากเกินกว่า 5 องศาเซลเซียส จะต้องมีการปรับอุณหภูมิของราง หรือมีการปรับการยืดหดของรางให้เหมาะสมก่อนวางราง และต้องมีการตรวจสอบรับรองจากผู้รับผิดชอบ ทั้งนี้ หากมีข้อมูลทางสถิติของอุณหภูมิในแต่ละพื้นที่ อนุญาตให้ใช้ค่าเฉลี่ยเป็นอุณหภูมิกลางได้ เมื่อจะตรึงรางให้ติดกับหมอน และใส่อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางนั้น ต้องจัดช่องว่างหัวต่อรางให้ได้ระยะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ

3) อุณหภูมิปกติของสภาพแวดล้อมในการวางรางเชื่อมยาวคือ 30 องศาเซลเซียส หากมีการวางรางที่อุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิกลางมากเกินกว่า 5 องศาเซลเซียส จะต้องมีการควบคุมหน่วยแรงของรางก่อนติดตั้ง และต้องมีการตรวจสอบรับรองจากผู้รับผิดชอบ ทั้งนี้ หากมีข้อมูลทางสถิติของอุณหภูมิในแต่ละพื้นที่อนุญาตให้ใช้ค่าเฉลี่ยเป็นอุณหภูมิกลางได้

4) รางเชื่อมยาวบนทางรถไฟบนหินโรยทาง จะต้องมีโค้งรัศมีไม่ต่ำกว่า 400 เมตร และทางวิ่งช่วงที่มีรัศมีน้อยกว่า 600 เมตร ต้องมีการตรวจสอบว่ามีความต้านทานด้านข้างที่เพียงพอ

5) ทางโค้งบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความลาดชันต้องมีรัศมีโค้ง 3,000 เมตรขึ้นไป

6) หลีกเลี่ยงการวางรางเชื่อมยาวบริเวณโค้งต่อเนื่องที่มีรัศมีต่ำกว่า 1,500 เมตร



7) ในกรณีที่วางรางเชื่อมยาวในอุโมงค์ จะต้องทำรางเชื่อมยาวบริเวณอุโมงค์ให้แยกต่างหาก แต่ในอุโมงค์สั้น ๆ ที่สภาพอากาศภายนอก และภายในอุโมงค์ไม่ต่างกันมาก อาจวางรางเชื่อมยาวต่อเนื่องกับทางวิ่งภายนอกได้

8) หลีกเลี่ยงการวางรางเชื่อมยาว ในบริเวณที่สภาพของทางวิ่งไม่สมบูรณ์

9) รางเชื่อมยาวที่วางบนสะพานควรหลีกเลี่ยงสะพานที่มีความยาวรวมกันเกิน 25 เมตรขึ้นไป ในกรณีที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ จะต้องมีการวิเคราะห์และตรวจสอบความต้านทานตามแนวยาว และตามขวางของทางรถไฟ รวมไปถึงหน่วยแรงตามยาวในรางและการเคลื่อนตัวของสะพานโดยละเอียด โดยบนสะพานที่มีความยาวช่วงสั้นนั้น รางเชื่อมยาวสามารถวางได้โดยปราศจากความเค้นโดยใช้จุดต่อเผื่อขยาย (Rail Expansion Joint) ในกรณีที่รางไม่สามารถวางปราศจากความเค้นได้ จะต้องทำการวิเคราะห์โครงสร้างให้สอดคล้องกับพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ระหว่างทางวิ่งและสะพาน ทั้งนี้ ทางบนสะพานไม้ไม่อนุญาติให้วางรางเชื่อมยาว

10) รอยเชื่อมจะต้องถูกเจียร์ให้เรียบและความตรง (Straightness) บริเวณปลายรางที่เชื่อมต่อกันจะต้องมีค่าเป็นไปตามตารางที่ 6-2 พื้นทางและหมอนจะต้องก่อสร้างให้มีความต้านทานต่อแรงกระทำตามแนวด้านข้างและด้านยาวของทางวิ่งมากกว่า 7 และ 10 กิโลนิวตันต่อหมอนหนึ่งท่อน ตามลำดับ และต้องมีค่าความแข็งเกร็งในการรับแรงแนวดิ่งไม่ต่ำกว่า 60 กิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร โดยจะต้องมีการตรวจสอบกับหมอนจำนวน 10 ท่อน ทุก ๆ 5 กิโลเมตร

ตารางที่ 6-2 ค่าความผิดพลาดที่ยอมให้สำหรับการเบี่ยงเบนจากความตรง (Straightness) ต่อความยาว 1 เมตรของราง

ลำดับ	ตำแหน่ง	ค่าความผิดพลาดที่ยอมให้ต่อความยาว 1 เมตร(มิลลิเมตร)	
		ความเร็วรถไฟมากกว่า 120 km/h	ความเร็วรถไฟน้อยกว่า 120 km/h
1	ผิวด้านบนหัวราง	+0.3 / 0.0	+0.3 / 0.0
2	พื้นผิวบริเวณหัวรางด้านในทาง	+0.3 / 0.0	+0.3 / -0.3
3	บริเวณฐานราง	+0.5 / 0.0	+0.5 / 0.0

6.7 การบำรุงรักษารางเชื่อมยาว

หลักสำคัญในการบำรุงรักษารางเชื่อม คือโครงสร้างทางรถไฟต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานการขยับตัวของราง ซึ่งมีแนวทางปฏิบัติดังนี้

1) หินโรยทางต้องเต็มตามมาตรฐาน และต้องมีการตรวจสอบโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณจุดระบายน้ำ ท่อระบายน้ำต่าง ๆ บนสะพานที่เป็นหินโรยทาง (Ballasted-deck bridges) ที่ส่วนปลายของทุก ๆ สะพาน จุดตัดทางรถไฟ ไปจนถึงอุโมงค์ และทางเดินเท้าที่ตัดกับทางรถไฟ

2) เครื่องยึดเหนี่ยว สมอยึดราง ฯลฯ จะต้องมีครบ และหมั่นตรวจสอบให้อยู่ในลักษณะยึดราง ติดแน่นกับหมอนตลอดเวลา

3) ต้องตรวจสอบอาการเคลื่อนไหว หรือสภาพความเป็นไปของทางรางเชื่อมอยู่เสมอ ถ้าเห็นว่ามีลักษณะผิดปกติ เช่น “ขณะที่อากาศร้อนจัด หัวต่อรางห่างเกิน 6 มิลลิเมตร” “เมื่ออากาศเย็นจัด หัวต่อรางกลับชนกัน” หรือ “ตอนกลางวันซึ่งมีอากาศร้อนจัด แนวรางคด โก่ง” เป็นต้น ก็ให้พิจารณาถึงสาเหตุ และวิธีการแก้ไข

4) ต้องมีการวิเคราะห์และทำรายงานสรุปถึงสาเหตุในกรณีที่สลักเกลียวต่อรางขาด หรือ รอยเชื่อมหัก รวมไปถึงกรณีรางดุ้งออกทางข้าง

5) สังเกตุและตรวจสอบร่องรอยของทางวิ่งที่เคลื่อนต่ำลงหรือทางวิ่งมีแนวโน้มเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับการวิ่งของรถไฟด้วย ไม้หมอนมีแนวโน้มที่เกิดการเคลื่อนที่ไปตามราง ซึ่งอาจเป็นสัญญานถึงการกระจุกกันของหน่วยแรงในบริเวณดังกล่าว โดยอาจต้องมีการลดหน่วยแรงในรางลง (Destress) ซึ่งอาจทำได้ด้วยการตัดรางออกจากกันที่ส่วนปลายในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ และเพิ่มรางที่ปลายอีกด้าน

6) หากเกิดฝุ่นหิน (White Spots) ในแนวเส้นทางโค้งของทางวิ่ง ให้ทำการพิจารณาถ้าหากหมอนเกิดการลอยตัวหรือไม่ และทำการแก้ไข เพื่อให้หมอนถูกรองรับด้วยหินโรยทางตามที่ได้ออกแบบไว้

7) สังเกตุและตรวจสอบบริเวณฐานของรางจะต้องตั้งอยู่อย่างสม่ำเสมอบนแผ่นรองราง ถ้ารางเกิดการวางตัวเอียงไปบนข้างหนึ่งของฐาน อาจจำเป็นต้องมีการลดหน่วยแรงในรางลง เพื่อป้องกันรางดุ้งหรือรางขาดออกจากกัน



บทที่ 7 องค์ประกอบของโครงสร้างทางรถไฟ

7.1 ทั่วไป

องค์ประกอบของโครงสร้างประกอบไปด้วย ราง (Rail) จุดต่อราง (Rail joint) อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง (Fastener) หมอนรองราง (Sleeper & bearer) และประแจ (Turnout) ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวมีส่วนสำคัญต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของทางฯรวมไปถึงความปลอดภัยต่อการเดินรถ โดยในการออกแบบทางรถไฟทั้งสองชนิดคือ โครงสร้างทางฯแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted track) และโครงสร้างทางฯแบบไม่ใช้หินโรยทาง (Ballastless track) จะมีการพิจารณาถึงคุณสมบัติขององค์ประกอบต่าง ๆ (Track component) รวมไปถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างโดยรวม (Overall behavior) เพื่อให้ทางรถไฟที่จะก่อสร้างนั้นมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพตามต้องการ โดยภาพรวมที่เกี่ยวกับการออกแบบในส่วนขององค์ประกอบของทางฯจะมีลำดับของการออกแบบดังนี้

- การออกแบบหน้าตัดราง ให้สามารถต้านทานหน่วยแรงขณะใช้งานได้อย่างปลอดภัย
- การออกแบบจุดต่อของราง โดยจุดต่อรางจะสามารถแบ่งเป็นสามชนิดคือ จุดต่อแบบเชื่อม (Welded joint) จุดต่อเชิงกล (Mechanical joint) และจุดต่อเผื่อขยาย (Rail expansion joint)
- การออกแบบอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง จะเน้นถึงกำลังต้านทานและอายุการใช้งานของรอยต่อที่จะต้องมีเพียงพอในการต้านทานต่อแรงกระทำต่าง ๆที่ถ่ายลงมาจากรางได้
- การออกแบบหมอนรองรางและหมอนรองประแจ จะเน้นถึงการคำนวณแรงสูงสุดที่กระทำต่อหน้าตัดหมอน จากนั้นจึงทำการออกแบบขนาดหน้าตัดของหมอนรวมไปถึงลวดอัดแรง นอกจากนี้ในการผลิตจะมีการตรวจสอบถึงความเที่ยงตรงของหน้าตัดหมอนตลอดความยาว ปริมาณและแรงดึงของลวดอัดแรง
- การออกแบบประแจ จะเน้นในส่วนการออกแบบทางกายภาพเพื่อรองรับความเร็วของรถไฟในการเข้าประแจได้อย่างปลอดภัย ซึ่งรายละเอียดจะประกอบไปด้วยการกำหนดมุมประแจ รูปร่างของลิ้นประแจและตะเฆ่ เป็นต้น

นอกจากนี้ในการออกแบบและก่อสร้างยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเฉพาะ รวมไปถึงการทดสอบสมรรถนะของแต่ละองค์ประกอบซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.2 ราง

7.2.1 หน้าตัดรางและวัสดุ

<u>ทั่วไป</u>

รางเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งของระบบทางรถไฟทำหน้าที่รับน้ำหนัก และช่วยบังคับทิศทางของรถไฟ รวมถึงช่วยให้การเคลื่อนที่ของรถไฟเป็นไปอย่างราบเรียบ โดยรางสามารถจะวางเป็นคู่ขนานกันไปบนหมอนรองรางหรือพื้นคอนกรีต



วัตถุประสงค์

- เพื่อใช้จำแนกและอธิบายรายละเอียดประเภทของรางรถไฟ
- เพื่อทราบถึงคุณสมบัติทางเคมีและทางกลของรางรถไฟ

ขอบเขต

มาตรฐานนี้ครอบคลุมประเภทของรางในประเทศไทย

ชนิดเหล็กกล้า

โดยปกติรางรถไฟผลิตมาจากเหล็กกล้าคาร์บอน-แมงกานีส ซึ่งมีโครงสร้างเพอร์ไลต์แสดงดังตารางที่ 7-1

ตารางที่ 7-1 ชนิดของเหล็กรางรถไฟ

ชนิดของเหล็ก	ค่าความแข็ง (HBW)	ส่วนประกอบ	เครื่องหมาย
R 200	200 ถึง 240	คาร์บอน-แมงกานีส (C-Mn) ไม่ผ่านการทำความร้อน	ไม่มีเครื่องหมาย
R 220	220 ถึง 260	คาร์บอน-แมงกานีส (C-Mn) ไม่ผ่านการทำความร้อน	
R 260	260 ถึง 300	คาร์บอน-แมงกานีส (C-Mn) ไม่ผ่านการทำความร้อน	
R 260 Mn	260 ถึง 300	คาร์บอน-แมงกานีส (C-Mn) ไม่ผ่านการทำความร้อน	
R 320 Cr	320 ถึง 360	โลหะผสม (1% Cr) ไม่ผ่านการทำความร้อน	
R 350 HT	350 ถึง 390	คาร์บอน-แมงกานีส (C-Mn) ผ่านการทำความร้อน	
R 350 LHT	350 ถึง 390	โลหะผสมน้อย ผ่านการความร้อน	



มาตรฐานหน้าตัดราง

มาตรฐานหน้าตัดราง เช่น 54E1 หรือ UIC 54 และ 60E1 หรือ UIC 60 ดูในภาคผนวก ก และ ข

การผลิตราง

คุณภาพการผลิต

ผู้ผลิตรางต้องมีระบบการผลิตตาม ISO 9001 เพื่อให้ได้คุณภาพสินค้าตามมาตรฐาน

การหล่อแท่งเหล็ก (Bloom)

ด้วยกรรมวิธีเตาออกซิเจน หรือเตาไฟฟ้า และผ่านขั้นตอนการกำจัดแก๊ส แล้วจึงผ่านขั้นตอนหล่อต่อเนื่อง

การทำเครื่องหมาย ประกอบไปด้วย

- รายละเอียด
  - ชื่อผู้ผลิต
  - เกรดของเหล็กกล้า (ตารางที่ 7-1)
  - ปีที่ผลิต
  - หน้าตัดของราง ตามภาคผนวก ก และ ข
- ตราประทับเหล็กขณะร้อน โดยทำการประทับตราอีกด้านหนึ่งของเอวราง มีรายละเอียด ดังนี้
  - หมายเลขของการหลอมของรางที่ได้รีดมา (Heat Number)
  - หมายเลขของสายเหล็กและตำแหน่งของเหล็กแท่ง (Bloom) ในสายเหล็ก
  - ตำแหน่งของรางในเหล็กแท่ง (Bloom) (A,B....Y)
- ตราประทับเหล็กขณะเย็น
  - ให้ประทับตราขณะรางเย็นที่ปลายแต่ละท่อน ที่บริเวณหัวราง
- การทดสอบราง ได้แก่
  - การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี
  - การทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ความต้านทานแรงดึงและการทดสอบความแข็งที่ผิวราง



7.2.2 การออกแบบเพื่อเลือกหน้าตัดราง

การคำนวณเพื่อเลือกขนาดหน้าตัดราง

การเลือกขนาดของหน้าตัดรางจะเลือกจากกำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักลงเพลา โดยการคำนวณค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดนั้นสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ด้วยสมการอย่างง่าย หรืออาจใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยวิเคราะห์ในกรณีที่โครงสร้างมีความซับซ้อน เช่น รางที่ถูกฝังอยู่ในทางวิ่ง (embedded rail) เป็นต้น โดยในขั้นแรกจะต้องกำหนดขนาดน้ำหนักลงเพลาแบบสถิต (P_S) และประมาณค่าแรงสูงสุดที่เกิดจากการกระแทก โดยอาจใช้ตัวคูณสัมประสิทธิ์การกระแทกดังนี้

สมการของ Talbot , AREMA	สมการของ German Railways	สมการของ รฟท.
$IF = 1 + \frac{33V}{100D}$	$IF = 1 + \frac{11.655V^2}{10^5} - \frac{6.252V^3}{10^7}$	$IF = 1 + \frac{V}{100}$
โดยที่ IF คือตัวคูณสัมประสิทธิ์การกระแทก **V คือความเร็วของรถไฟ (ไมล์ต่อชั่วโมง)** **D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อ (นิ้ว)**	โดยที่ IF คือตัวคูณสัมประสิทธิ์การกระแทก V คือความเร็วของรถไฟ (ไมล์ต่อชั่วโมง)	โดยที่ IF คือตัวคูณสัมประสิทธิ์การกระแทก V คือความเร็วของรถไฟ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การกระแทกแล้ว จะทำให้สามารถคำนวณค่าแรงกระทำต่อรางสูงสุดได้โดย

$$P_D = IF \cdot P_S$$

โดยที่ P_D คือน้ำหนักลงเพลาสูงสุดที่กระทำต่อราง

เมื่อได้ค่าแรงกระทำสูงสุดต่อรางแล้วจะต้องทำการคำนวณค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดโดยสามารถใช้สมมุติฐานของการวิเคราะห์โดยสมมุติว่ารางวางอยู่บนจุดรองรับยืดหยุ่นแบบต่อเนื่อง

$$M_T = P_D \left(\frac{EI}{64\mu} \right)^{0.25}$$

โดยที่

M_T คือค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนทางวิ่ง $(N \cdot m)$

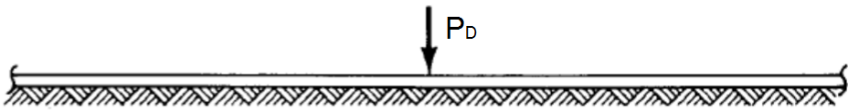
E คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กราง $\left(N / m^2\right)$

I คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดทาง หรือ หน้าตัดรางรวมกันทั้งสอง ข้าง $\left(m^4\right)$

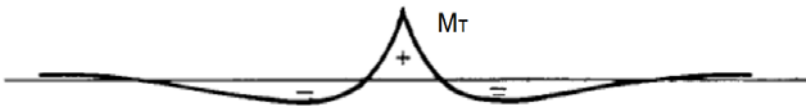
μ คือค่าโมดูลัสความแข็งเกร็งของทาง $\left(N / m / m\right)$

ดังนั้นโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนรางหนึ่งข้างคือ

$$M = \frac{1}{2}M_T = \frac{P_D}{2}\left(\frac{EI}{64\mu}\right)^{0.25}$$



รูปที่ 7-1 แบบจำลองทางวิ่งบนจุดรองรับยืดหยุ่นแบบต่อเนื่อง

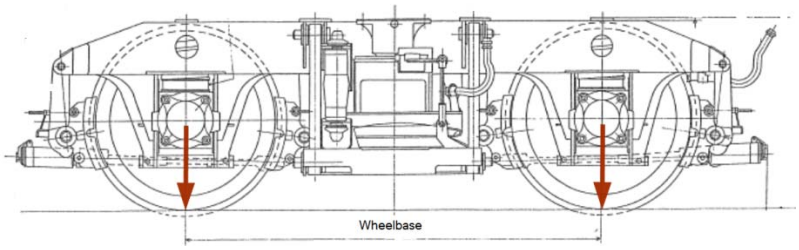


รูปที่ 7-2 การกระจายตัวของโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงกระทำแบบจุด

<u>วิเคราะห์โดยสมมุติว่ารางวางอยู่บนจุดรองรับแบบยืดหยุ่นเป็นจุด ๆ</u>

- วิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ทั้งนี้ตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อขนาดของโมเมนต์ดัดสูงสุดคือ ระยะห่างของหมอนหรือจุดรองรับราง ค่าความแข็งเกร็งแนวดิ่งของทาง โดยในการวิเคราะห์จะต้องจัดวางน้ำหนักไปตามความยาวของรางเพื่อให้เกิดสภาวะวิกฤติเพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าขนาดของโมเมนต์ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีระยะห่างออกมาจากจุดที่แรงกระทำ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงระยะระหว่างชุดล้อของโบกี้รถไฟ (Wheelbase) ที่ปกติในปัจจุบันมีระยะมากกว่า 2 เมตรแล้ว (รูปที่ 7-3) จะพบว่าค่าโมเมนต์ดัดที่มีการซ้อนทับกัน (Overlapping moment) เนื่องจากแรงกระทำหลายจุดนั้นมีค่าน้อยมาก ซึ่งทำให้สมมุติฐานของการวิเคราะห์แบบแรงกระทำเพียงจุดเดียวจึงมีความถูกต้องเพียงพอในการออกแบบ



รูปที่ 7-3 ระยะระหว่างชุดล้อของโบกี้รถไฟ (Wheelbase)



เมื่อคำนวณค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นต่อหน้าตัดรางได้แล้ว จะนำมาทำการเปรียบเทียบกับกำลังของหน้าตัดซึ่งสามารถคำนวณได้โดย

$$M_A = \sigma_A \cdot S$$

โดยที่

M_A คือกำลังรับโมเมนต์ดัดที่ยอมให้ของหน้าตัดราง $\left(N \cdot m\right)$

σ_A คือหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็กราง $\left(N / m^2\right)$

S คือค่าโมดูลัสของหน้าตัดรางรอบแกนหลัก $\left(m^3\right)$

โดยค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดของรางจะต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจากน้ำหนักลงเพลา $M \le M_A$

ตัวอย่าง น้ำหนักออกแบบ U20 มีน้ำหนักลงเพลา 20 ตันคำนวณหาโมเมนต์สูงสุด โดยกำหนดให้

- รางขนาด UIC-54
- ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของรางสองข้างรวมกัน $\left(I\right)$ เท่ากับ2x2337.9 cm^4
- โมดูลัสของหน้าตัด $\left(S\right)$ เท่ากับ278.7 cm^3
- โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก $\left(E\right)$ เท่ากับ2.1x10^{11} N / m^2
- ความเร็วของรถไฟ $\left(V\right)$ เท่ากับ 160 km / h
- โมดูลัสความแข็งเกร็งในแนวดิ่งของทาง $\left(\mu\right)$ เท่ากับ 1.2x10^8 N / m^2
- หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ $\left(\sigma_A\right)$ (ค่าอ้างอิงจาก รฟท.)
- สำหรับรางเชื่อม (welded rail) เท่ากับ $1.7 \times 10^8 N / m^2$
- สำหรับรางต่อ (jointed rail) เท่ากับ $2.2 \times 10^8 N / m^2$
- น้ำหนักกดล้อสถิต $P_S = 20000 \times 9.81 = 196200\, N$

คำนวณตัวคูณสัมประสิทธิ์การกระแทก

$$IF = 1 + \frac{V}{100} = 1 + \frac{120}{100} = 2.2$$

ดังนั้น น้ำหนักกดล้อสูงสุด $P_D = IF \times P_S = 2.2 \times 196200 = 431640\, N$

ใช้สมมุติฐานว่ารางวางอยู่บนจุดรองรับยืดหยุ่นแบบต่อเนื่อง จะได้โมเมนต์ดัดสูงสุดบนหน้าตัดรางหนึ่งข้างเท่ากับ

$$M = \frac{P_D}{2}\left(\frac{EI}{64\mu}\right)^{0.25} = \frac{431640}{2}\left(\frac{2.1\times10^{11}\times2\times2337.9\times10^{-8}}{64\times1.2\times10^{8}}\right)^{0.25} = 40810\,N\cdot m$$

ตรวจสอบกำลังของหน้าตัดราง

- สำหรับรางเชื่อม

$$M_A = \sigma_A \cdot S = 1.7\times10^{8}\times278.7\times10^{-6} = 47380\,N\cdot m$$

- สำหรับรางต่อ

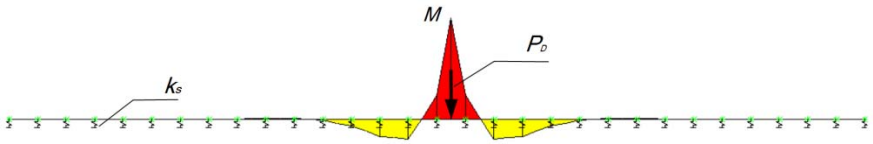
$$M_A = \sigma_A \cdot S = 2.2\times10^{8}\times278.7\times10^{-6} = 61314\,N\cdot m$$

ดังนั้นกำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดรางมากกว่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น $M \le M_A$ ***ok***

ตัวอย่าง การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กำหนดให้ระยะห่างหมอนเท่ากับ 60 cm ใช้สมมุติฐานว่ารางวางอยู่บนจุดรองรับแบบยืดหยุ่นไปตลอดความยาว จะได้ความแข็งเกร็งในแนวดิ่งของสปริงใต้รางแต่ละตัวเท่ากับ

$$k_S = \mu\times0.6\,m = 7.2\times10^{7}\ N/m$$

เมื่อสร้างแบบจำลองดังรูปที่ 7-4 และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะได้โมเมนต์ดัดสูงสุดในรางหนึ่งข้างเท่ากับ $M = 42800\,N\cdot m$ (โมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อวางล้อตรงกลางระหว่างหมอน)ซึ่งสูงกว่าค่าที่ได้จากสมมุติฐานในตัวอย่างก่อนหน้าเท่ากับ 4.9 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 7-4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรางบนจุดรองรับแบบยืดหยุ่นเป็นจุด ๆ



7.2.3 การทดสอบและตรวจสอบคุณภาพราง

วิธีการทดสอบและตรวจรับราง

[1] กระบวนการผลิตเหล็กกล้า (Steel Making) และการหล่อแท่งเหล็ก (Bloom)

เตาที่ใช้ในการผลิตเหล็กกล้าเพื่อผลิตแท่งเหล็ก (Bloom) ควรเป็นเตาออกซิเจนที่มีการหล่อต่อเนื่อง (Basic Oxygen Furnace with continuous casting)

[2] การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีในเหล็กกล้าก่อนการรีด (Liquid Steel)

[3] การตรวจสอบปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนตกค้าง (Hydrogen and Oxygen Content) ในเหล็กกล้าก่อนการรีด

[4] ตรวจสอบเครื่องหมาย(Marking) ขนาดและสภาพผิวของแท่งเหล็ก (Bloom)

- กระบวนการรีดราง (Rail Rolling)
- การทำเครื่องหมายการรีดเหล็ก (Branding)
- การทำตราประทับเหล็กขณะร้อน (Hot Stamp)

[5] การทดสอบและการตรวจรับราง (Rail Inspection)

- การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีในเหล็กกล้าหลังการรีด (Solid Steel)
- การตรวจสอบปริมาณไฮโดรเจนตกค้างในเหล็กกล้าหลังการรีด
- การทดสอบเชิงกล
- การทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักตกกระแทก
- การทดสอบความต้านทานแรงดึง
- การทดสอบความแข็งของผิวราง
- การทดสอบด้วยตาเปล่า
- การทดสอบน้ำหนัก
- การตรวจสอบมิติและลักษณะทั่วไป

รายละเอียดวิธีการทดสอบและตรวจสอบราง

กระบวนการผลิตเหล็กกล้า (Steel Making) และการหล่อแท่งเหล็ก (Bloom)

เตาที่ใช้ในการผลิตเหล็กกล้าเพื่อผลิตแท่งเหล็ก (Bloom) เตาที่ใช้ คือ เตา Basic Oxygen Furnace with continuous casting



การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีในเหล็กกล้าก่อนการรีด (Liquid Steel)

กระทำโดยนำเหล็กเหลวไปแช่เย็นให้เกิดการแข็งตัวและตัดออกมาเป็นแผ่น จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างเข้าไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องมือ Vacuum – Emission Spectrophotometric Analyzerเพื่อหาปริมาณธาตุผสมหลัก อันได้แก่ คาร์บอนแมงกานีสซิลิกอน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ ในเหล็กกล้า

การตรวจสอบปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนตกค้าง (Hydrogen and Oxygen Content)ในเหล็กกล้าก่อนการรีด

กระทำโดยใช้หลอดดูดเหล็กเหลวและนำไปแช่เย็นให้แข็งตัวและตัดออกมาเป็นก้อนชิ้นงานตัวอย่างประมาณ 2 กรัม จากนั้นนำเข้าเครื่อง Hydrogen Determinator โดยกำหนดให้ปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนตกค้างก่อนการรีดต้องไม่เกิน 2.5 และ 20 ppmตามลำดับ

ตรวจสอบเครื่องหมาย(Marking) เช่น Heat Number, Strand Number และ Bloom Number

ตรวจสอบขนาดและสภาพผิวของแท่งเหล็ก (Bloom)

กระบวนการรีดราง (Rail Rolling)

- การทำเครื่องหมายการรีดเหล็ก (Branding) ต้องทำเป็นตัวอักษรนูนขณะรางผ่านการรีดไว้ที่ด้านหนึ่งของเอวรางของรางแต่ละท่อน
- การทำตราประทับเหล็กขณะร้อน (Hot Stamp) ต้องประทับตราขณะเหล็กร้อนให้ชัดเจนบนอีกด้านหนึ่งของเอวราง

การทดสอบและตรวจรับรางด้านคุณสมบัติวัสดุ

- การทดสอบและตรวจรับราง (Rail Inspection)
- การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีในเหล็กกล้าหลังการรีด (Solid Steel)
- การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเพื่อหาปริมาณธาตุผสมหลัก อันได้แก่ คาร์บอนแมงกานีสซิลิกอน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์จะกระทำในเหล็กกล้าหลังการรีดด้วย โดยทำการตัดเป็นแผ่นจากชิ้นส่วนจากรางที่ผลิตเสร็จแล้วและขัดผิวด้านบนของชิ้นงานตัวอย่างให้เรียบจากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างเข้าเครื่อง Vacuum – Emission Spectrophotometric Analyzer เพื่อทำการตรวจวัดปริมาณธาตุและโลหะอื่น ๆ ที่ผสมอยู่ในเหล็กซึ่งผลที่ได้เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ โดยจะทางแสดงผลหน้าจอ พร้อมทั้งพิมพ์ผลออกมาทางเครื่องพิมพ์ด้วย
- การตรวจสอบปริมาณไฮโดรเจนตกค้างในเหล็กกล้าหลังการรีด
- สำหรับการตรวจสอบปริมาณไฮโดรเจนตกค้างจะกระทำในเหล็กกล้าหลังการรีดด้วยเช่นกัน โดยทำการตัดก้อนชิ้นงานตัวอย่างจากชิ้นส่วนรางที่ผลิตเสร็จแล้วประมาณ 2 กรัมจากนั้นนำก้อนชิ้นงานตัวอย่างเข้าเครื่อง Hydrogen Determinator พร้อมกับใส่ Electrode เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่าน ชิ้นงานตัวอย่างจะเกิดความร้อนสูงจนกระทั่งหลอมละลาย แก๊สไฮโดรเจนที่ตกค้างจะแยกตัวออกจากโลหะเหลวและ

ผ่านเข้าเครื่องตรวจนับปริมาณไฮโดรเจน และแสดงผลทางหน้าจอพร้อมทั้งพิมพ์ผลออกมาทางเครื่องพิมพ์ด้วย โดยปริมาณไฮโดรเจนตกค้างหลังการรีดต้องไม่เกิน 2.5 ppm

การทดสอบเชิงกล

- การทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักตกกระแทก (Falling Weight Test)

กระทำโดยการนำท่อนรางตัวอย่างที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 1.3เมตร วางบนที่รองรับ 2 จุด โดยแต่ละจุดห่างกัน 1 เมตร แล้วปล่อยแท่งน้ำหนักขนาด1,000 กิโลกรัมจากระดับความสูงประมาณ 7.6 เมตร ตกลงไปกระแทกตรงกลางของท่อนราง ซึ่งท่อนรางตัวอย่างต้องทนต่อแรงตกกระแทกดังกล่าวโดยไม่แตกหักหรือมีรอยร้าวเกิดขึ้น โดยเฉพาะบริเวณด้านล่างของฐานราง จากนั้นทำการวัดค่าแอ่นตัวของราง ค่าแอ่นตัวควรอยู่ระหว่าง 40 – 50 มิลลิเมตร สำหรับราง Grade 900 A

- การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength Test)

กระทำโดยนำแท่งตัวอย่างกลมที่ตัดมาจากรางเข้าเครื่องดึง โดยชิ้นงานตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และมีความยาวของ Gauge Length เท่ากับ50 มิลลิเมตร ทำการดึงจนกระทั่งชิ้นงานขาด และบันทึกค่าแรงดึงสูงสุดและความยาวของแท่งตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อนำไปคำนวณหาความต้านทานแรงดึงสูงสุดและการยืดตัว ณ จุดขาดซึ่งค่าที่คำนวณได้สำหรับราง Grade 900 A จะต้องไม่น้อยกว่า 90 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร และ 10% ตามลำดับ

- การทดสอบความแข็งของผิวราง (Hardness Test)

กระทำโดยนำแผ่นตัวอย่างบริเวณหน้าตัดรางไปขัดผิวด้านบนให้เรียบและสะอาด จากนั้นนำไปทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) โดยหัวกดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และน้ำหนักกด 3,000 กิโลกรัม โดยกดค้างไว้เป็นเวลา15 นาที แล้วหาค่า Brinell Hardness Number (BHN) จากการเปรียบเทียบขนาดของหลุมบนแผ่นตัวอย่างกับขนาดของหลุมบนแผ่นมาตรฐานที่ทราบค่า BHN แล้วค่า BHN ที่ได้ควรอยู่ระหว่าง 270 – 290 สำหรับราง Grade 900 A

การทดสอบด้วยตาเปล่า (Macroscopic Test)

กระทำโดยนำแผ่นตัวอย่างบริเวณหน้าตัดรางไปขัดผิวด้านบนให้เรียบและสะอาด ตรวจดูรอยแยกด้วยตาเปล่า ซึ่งแผ่นหน้าตัดรางต้องปราศจากรอยแยกจึงจะสามารถใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบได้ นำกระดาษถ่ายรูปที่มีขนาดใหญ่กว่าหน้าตัดรางเล็กน้อยแช่ในกรดกำมะถันเจือจางไว้ (5 % Sulphuric Acid Solution) ทำการเช็ดกรดออกและวางลงบนผิวหน้าตัดรางที่เตรียมไว้ ทำการขูดรีดไปมาให้ทั่วหน้าตัดรางเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นดึงกระดาษออกและนำไปแช่ในน้ำยา 15 – 40% Aqueous Solution เป็นเวลา 10 นาที นำกระดาษไปล้างน้ำก่อนนำเข้าเครื่องอบกระดาษให้แห้ง เมื่อกระดาษแห้งจะปรากฏรูปหน้าตัดราง (Baumann Sulfur Print) ขึ้นมา



การทดสอบด้วยตาเปล่ามีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบคุณภาพของเหล็กด้วยการดูเนื้อเหล็ก หากการกระจายของ ซัลเฟอร์บนเนื้อเหล็กตามที่ปรากฏในรูปเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าเป็นเหล็กที่มีคุณภาพ และหากต้องการจำแนกคุณภาพสามารถทำได้โดยการนำรูปที่ได้ไปเปรียบเทียบกับรูปมาตรฐาน

การทดสอบน้ำหนัก (Weight Test)

การหาน้ำหนักที่แท้จริงของรางกระทำได้โดยสุ่มตัวอย่างรางที่ผ่านการตรวจสอบและการทดสอบตามที่กำหนดแล้ว ทำการวัดความยาวรางแต่ละท่อนก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก โดยแยกเป็นแต่ละ Charge Number ไม่ปะปนกัน จากนั้นรวมความยาวและน้ำหนักของรางทั้งหมดและหาค่าเฉลี่ยเป็นกิโลกรัมต่อเมตร โดยน้ำหนักแท้จริงของรางต้องอยู่ภายในพิกัด -0.5 กับ +2.0%จากน้ำหนักมาตรฐานเช่น ราง BS 100 A มีน้ำหนักมาตรฐาน (Theoretical Weight) เท่ากับ 50.182 กิโลกรัม ต่อเมตร น้ำหนักแท้จริงควรมีค่าตั้งแต่ 49.9311 ถึง 51.1856 กิโลกรัมต่อเมตร

<u>การทดสอบและตรวจรับรางด้านมิติ (Dimension & Tolerance)</u>

การตรวจสอบมิติและลักษณะทั่วไป

การตรวจสอบมิติและลักษณะทั่วไปประกอบด้วยการตรวจสอบขนาด รูปร่างและสภาพผิวดังนี้

- การตรวจสอบความยาวของราง

กระทำโดยการวัดที่เอวรางด้วยเทปเหล็ก โดยความยาวรางที่วัดได้ต้องอยู่ภายในพิกัด ±6 มิลลิเมตร สำหรับรางความยาวมาตรฐาน 24 เมตร หรือต่ำกว่า และ ±10 มิลลิเมตร สำหรับรางความยาวมาตรฐาน 25–36 เมตร

- การตรวจสอบความชำรุดที่ผิวราง

ทำการเดินตรวจด้วยตาเปล่าตลอดความยาวราง และสังเกตที่สันราง ฐานราง และเอวรางทั้งสองด้านโดยตรวจที่สันรางก่อน แล้วพลิกรางเพื่อตรวจฐานรางและเอวรางด้านหนึ่งไปพร้อมกัน จากนั้นจึงพลิกรางเพื่อตรวจเอวรางอีกด้านหนึ่ง ซึ่งผิวรางต้องเรียบร้อย และไม่มีแผลหรือรอยชำรุดใด ๆ

- การตรวจสอบความตรงของรางทั้งท่อน

ทำการตรวจโดยเล็งดูด้วยตา ซึ่งแนวรางต้องตรงตลอดท่อน และไม่มีส่วนใดคดโค้ง

- การตรวจสอบความตรงที่ปลายราง

กระทำโดยใช้บรรทัดเหล็กยาว 1.5 เมตร ทาบที่ด้านข้างของหัวรางทั้งสองด้านเพื่อวัดความตรงในแนวนอน และทาบไปบนสันรางเพื่อวัดความตรงในแนวตั้ง หากรางมีความตรงจะไม่พบช่องว่างระหว่างรางกับบรรทัดเหล็กตลอดทั้งความยาวของบรรทัดเหล็ก แต่หากพบช่องว่าง ณ ส่วนใด ให้ใช้ Feeler Gauge หรือ Taper Gauge วัดขนาดของช่องว่างซึ่งค่าที่วัดได้ต้องไม่เกิน 0.7 มิลลิเมตร



- การตรวจสอบทวิสต์ที่ปลายฐานราง

เครื่องมือที่ใช้ตรวจเป็นแผ่นอะลูมิเนียมเจาะรูตรงกลางซึ่งหนา 12 มิลลิเมตร กว้าง 173 มิลลิเมตร ยาว 1.07 เมตรและมีปุ่มแหลมอยู่ที่บริเวณปลายแผ่นจำนวน 4 ขาห่างกันคู่ละ 1 เมตร โดย 1 ใน 4 ขานั้นสามารถขยับขึ้นลงได้ และเชื่อมต่อกับ Dial Gauge การวัดกระทำโดยหงายฐานรางขึ้น วางเครื่องมือลงบนฐานราง ขยับขาที่ติด Dial Gauge ให้แตะฐานราง แล้วอ่านค่าจาก Dial Gaugeซึ่งค่าที่อ่านได้ต้องไม่เกิน 0.4 มิลลิเมตรปัจจุบันมีเครื่องมือวัดแบบดิจิตอลที่สามารถอ่านค่าทวิสต์จากการวัดได้ทันที

- การตรวจสอบความสูงของราง

กระทำโดยใช้เครื่องมือแบบ GO/NO GO ซึ่งจัดทำภายใต้ค่าความคลาดเคลื่อน ±0.5 มิลลิเมตร

- การตรวจสอบความกว้างของฐานราง

กระทำโดยใช้เครื่องมือแบบ GO/NO GO ซึ่งจัดทำภายใต้ค่าความคลาดเคลื่อน ±1.0 มิลลิเมตร

- การตรวจสอบความกว้างของหัวราง

กระทำโดยใช้เครื่องมือแบบ GO/NO GO ซึ่งจัดทำภายใต้ค่าความคลาดเคลื่อน ±0.5 มิลลิเมตร

- การตรวจสอบความหนาของเอวราง

กระทำโดยใช้เครื่องมือแบบ GO/NO GO ซึ่งจัดทำภายใต้ค่าความคลาดเคลื่อน +1.0 กับ - 0.5 มิลลิเมตร

- การตรวจสอบระยะระหว่างผิวสัมผัสเหล็กประกับราง

กระทำโดยสอด Gauge A และ Gauge B เข้าที่เอวรางทั้งด้านซ้ายและด้านขวา โดยให้เครื่องมือตั้งฉากกับแนวราง ซึ่งจัดทำภายใต้ค่าความคลาดเคลื่อน ±0.5 มิลลิเมตร

- การตรวจสอบความลาดเอียงของผิวสัมผัสเหล็กประกับราง

กระทำโดยสอด Gauge A และ Gauge B เข้าที่เอวรางทั้งด้านซ้ายและด้านขวา โดยให้เครื่องมือตั้งฉากกับแนวราง หากมีช่องว่างบริเวณผิวสัมผัสเหล็กประกับรางทั้งที่คางรางและฐานราง ให้ใช้ Feeler Gauge หรือ Taper Gauge วัดขนาด ซึ่งค่าที่วัดได้ต้องไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร

- การตรวจสอบการได้ฉากของส่วนสูงของราง

กระทำโดยวางขาข้างหนึ่งของเหล็กฉากบนหน้าตัดราง ส่วนขาอีกข้างหนึ่งทาบบนสันรางหรือด้านล่างของฐานรางโดยให้ขนานกับแนวราง หากส่วนสูงของรางไม่ได้ฉากจะเกิดช่องว่างระหว่างเหล็กฉากกับหน้าตัดราง ให้ทำการวัดขนาดช่องว่างดังกล่าวด้วย Feeler Gauge หรือ Taper Gaugeซึ่งค่าที่วัดได้ต้องไม่เกิน 0.6 มิลลิเมตร



- การตรวจสอบการได้ฉากของฐานราง

กระทำโดยวางขาข้างหนึ่งของเหล็กฉากบนหน้าตัดของฐานราง ส่วนขาอีกข้างหนึ่งทาบตามแนวด้านข้างของฐานราง หากฐานรางไม่ได้ฉากจะเกิดช่องว่างระหว่างเหล็กฉากกับหน้าตัดของฐานราง ให้ทำการวัดขนาดช่องว่างดังกล่าวด้วย Feeler Gauge หรือ Taper Gaugeซึ่งค่าที่วัดได้ต้องไม่เกิน 0.6 มิลลิเมตร

- การตรวจสอบความไม่สมมาตรของหน้าตัดราง

กระทำโดยใช้เครื่องมือทั้ง PLUS GAUGE และ MINUS GAUGEวัดทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของเอวรางซึ่งจัดทำภายใต้ค่าความคลาดเคลื่อน ±1.2 มิลลิเมตร

กรณีการตรวจสอบด้วย PLUS GAUGE เมื่อจะงอยส่วนบนของเครื่องมือแตะด้านข้างของหัวรางต้องปรากฏช่องว่างในแนวนอนที่ฐานรางระหว่างเครื่องมือกับด้านข้างของฐานรางหรืออย่างน้อยเครื่องมือต้องสัมผัสราง 2 จุด คือ ทั้งที่หัวรางและฐานราง

กรณีการตรวจสอบด้วย MINUS GAUGE เมื่อเครื่องมือแตะด้านข้างของฐานรางต้องปรากฏช่องว่างในแนวนอนที่ หัวรางระหว่างจะงอยส่วนบนของเครื่องมือกับด้านข้างของหัวรางหรืออย่างน้อยเครื่องมือต้องสัมผัสราง 2 จุด คือทั้งที่ฐานรางและหัวราง

7.3 การเชื่อมราง

โดยทั่วไปในการเชื่อมรางจะใช้ 2 วิธีการเชื่อม คือ การเชื่อมไฟฟ้า (Flash Butt Welding) และการเชื่อมเทอร์มิต (Thermit Welding)

การเชื่อม Flash Butt Welding เป็นการเชื่อมแบบอัตโนมัติที่มีการตั้งค่าพารามิเตอร์มาแล้ว และเป็นการเชื่อมที่ไม่มีการเติมเนื้อโลหะระหว่างรอยต่อราง จึงเป็นการเชื่อมที่มีคุณภาพสูง โดยการเชื่อม Flash Butt Welding มีทั้งการเชื่อมในโรงงานและเชื่อมหน้างาน

ส่วนการเชื่อมเทอร์มิต โดยทั่วไปเป็นการเชื่อมหน้างาน เป็นการเชื่อมที่ต้องใช้ช่างปฏิบัติการ และเป็นการเชื่อมที่มีการเติมเนื้อโลหะระหว่างรอยต่อราง

ข้อดี-ข้อเสียของการเชื่อม Flash Butt Welding เทียบกับการเชื่อมเทอร์มิต

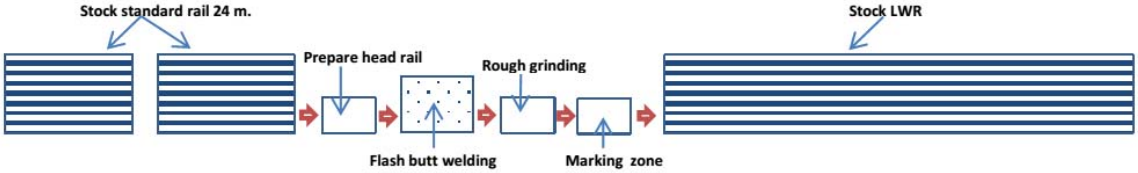
- การเชื่อม Flash Butt Welding สามารถเชื่อมได้รวดเร็วกว่าการเชื่อมเทอร์มิต
- การเชื่อม Flash Butt Welding ใช้ผู้ปฏิบัติการ (Operator) น้อยกว่า
- การเชื่อม Flash Butt Welding ให้คุณภาพการเชื่อมที่สม่ำเสมอและดีกว่าการเชื่อมเทอร์มิต
- การเชื่อม Flash Butt Welding เหมาะสำหรับการเชื่อมรางใหม่ ในขณะที่การเชื่อมเทอร์มิตเหมาะสำหรับการเชื่อมรางเก่ามากกว่า
- การเชื่อม Flash Butt Welding ให้ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงกว่าการเชื่อมเทอร์มิต

- แนวเชื่อมจากการเชื่อม Flash Butt Welding สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าการเชื่อมเทอร์มิต

7.3.1 การเชื่อมไฟฟ้า

- ขั้นตอนการเชื่อมรางแบบเชื่อมไฟฟ้า (Flash Butt Welding)

แผนผังโรงเชื่อมรางแบบเชื่อมไฟฟ้า (Flash Butt Welding)แบ่งออกได้เป็น 8 โซนหลักๆดังนี้



รูปที่ 7-5 แผนผังของโรงเชื่อมรางยาว

1) พื้นที่สำหรับเก็บรางสั้น 25 เมตร

2) สถานีสำหรับเจียรแต่งหัวรางก่อนการเชื่อม

3) สถานีเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมแฟลตบัส

4) สถานีการเจียรแต่งรอยเชื่อม

5) สถานีสำหรับตอกเบอร์หมายเลขของรอยเชื่อม

6) ตรวจสอบด้วยเครื่องตรวจสอบความถี่สูง

7) พื้นที่สำหรับเก็บรางเชื่อมยาว

8) การเจียรแต่ครั้งสุดท้ายพร้อมกับตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อม

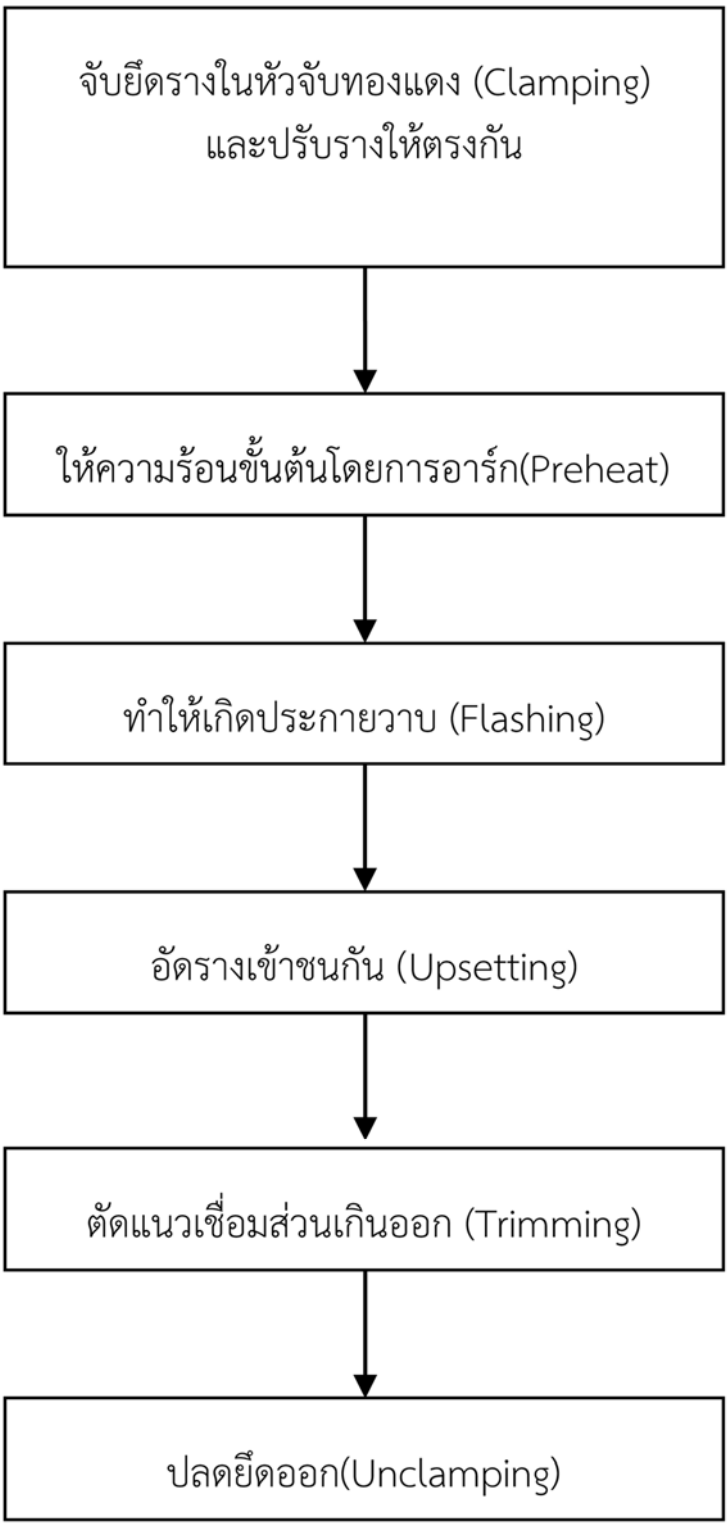
ขั้นตอนการเชื่อมไฟฟ้า (Flash Butt Welding)

1) ทำการจัดเรียงและแยกประเภทของราง

2) ทำความสะอาดหัวรางทั้งสองเส้นและเอวรางด้วยเครื่องเจียรเพื่อทำความสะอาดสนิมตรงตำแหน่งที่จะทำการเชื่อม เพราะสนิมที่หัวรางจะมีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม

3) ทำการจัดแนวรางให้ได้ระดับตามข้อกำหนดของเครื่องเชื่อม

4) เริ่มทำการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมแฟลตบัสหลังจากมีการปรับระดับเสร็จแล้ว โปรแกรมจะเริ่มทำงานอัตโนมัติตามที่ได้ตั้งค่าไว้ โดยที่โปรแกรมจะเป็นตัวควบคุมการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังหัวรางทั้งสองจนกระแสมีความเสถียรอยู่ ณ ค่าๆหนึ่งเพื่อให้รางมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น หลังจากนั้นโปรแกรมจะสั่งการให้ระบบไฮโดรลิคบีบอัดรางเข้าหากันด้วยความเร็วและแรงอัด เพื่อให้รางทั้งสองเส้นเชื่อมติดกัน โดยที่รางจะถูกบีบอัดเข้าหากันจนมีระยะการบีบตัวเท่ากับค่าที่ตั้งไว้โปรแกรมถึงจะหยุดและข้ามไปทำยังขั้นตอนต่อไปโดยมีขั้นตอนการเชื่อมแสดงตาม แผนผังรูปที่ 7-6 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7-6 แผนผังการเชื่อมไฟฟ้า(Flash Butt Welding)



5) เครื่องเชื่อมแฟลตบัสจะทำการเฉือนเศษเหล็กรอบ ๆเนื้อรางที่เชื่อมเสร็จออกโดยอัตโนมัติ โดยใช้ใบมีดที่ออกแบบมาเพื่อตัดให้เข้ากับรูปทรงรางเดิม

6) ในแต่ละรอยเชื่อมที่มีการเชื่อมเสร็จจะถูกลำเลียงด้วยโรเลอร์มอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อส่งต่อไปยังสถานีต่อไป และลำเลียงรางสั้นเส้นต่อไปเพื่อมาทำการเชื่อมต่อให้ได้รางเชื่อมยาวตามระยะที่กำหนด

7) หลังจากที่แต่ละรอยเชื่อมถูกลำเลียงไปยังพื้นที่จัดเก็บรางยาวด้วยโรเลอร์มอเตอร์ไฟฟ้าแล้ว ก่อนที่จะเก็บลงพื้นที่จะต้องทำการเจียรแต่ละรอยเชื่อมก่อน โดยที่จะเจียรแต่งให้รอยเชื่อมสูงไว้ก่อนในช่วงที่รอยเชื่อมยังมีอุณหภูมิสูง

8) ในส่วนของการทำเครื่องหมาย จะมีการเจียรแต่งทำความสะอาดบริเวณรอบ ๆ รอยเชื่อมก่อนด้วยเครื่องเจียรไฟฟ้าและทำการตอกหมายเลขรอยเชื่อม วัน/เดือน/ปี ที่เชื่อม และรหัสของแต่ละรอยเชื่อม ตามข้อกำหนด

9) หลังจากเชื่อมรางยาวเสร็จได้ตามความยาวที่ต้องการแล้ว ให้ใช้ Fixed Gantry 2 ตัน ทั้ง 16 ตัว ยกรางยาวเส้นดังกล่าวลงมาวางไว้ที่พื้นที่เก็บรางเชื่อมยาว โดยมีหมอนคอนกรีตเป็นตัวรองรับรางเชื่อมยาวที่ชั้นหนึ่งเพื่อไม่ให้รางเชื่อมยาวสัมผัสกับดินโดยตรง

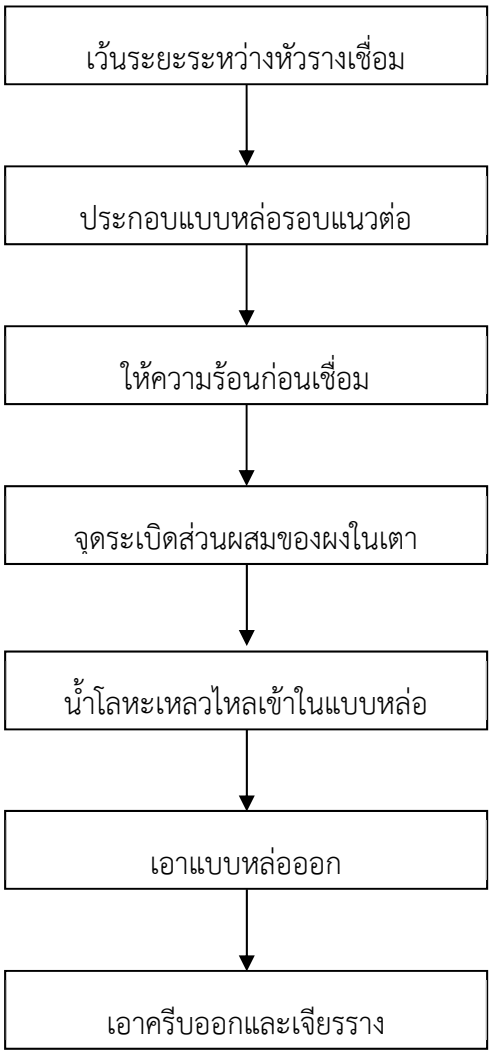
10) การเจียรครั้งสุดท้ายจะต้องดำเนินการหลังจากที่รางเชื่อมยาวถูกลำเลียงมาเก็บยังพื้นที่เก็บรางเชื่อมยาวเรียบร้อยแล้ว และอุณหภูมิของรอยเชื่อมลดต่ำลงเท่ากับอุณหภูมิรางปกติเสียก่อน

11) ใช้เหล็กทาบ 1 เมตร ในการวัดระดับของรอยเชื่อมในตำแหน่งหัวรางและข้างรางด้านในซึ่งเป็นจุดที่สัมผัสกับล้อรถไฟและบังใบของล้อรถไฟ โดยที่รอยเชื่อมจะต้องเป็นไปตามค่าที่กำหนด(ตามเอกสารแนบ)โดยใช้ฟิลเลอร์เกตเป็นตัววัด

12) ทำการตรวจสอบเนื้อเหล็กในรอยเชื่อมด้วยเครื่องทดสอบความถี่สูง เพื่อหาจุดบกพร่องในเนื้อราง

7.3.2 การเชื่อมเทอร์มิต

ขั้นตอนการการเชื่อมเทอร์มิท (Thermit Welding)



รูปที่ 7-7 แผนผัง of Thermit Welding

<u>ขั้นตอนการดำเนินการเชื่อมเทอร์มิต</u>

1) วัดอุณหภูมิรางในขณะนั้นให้อยู่ระหว่าง 25° - 45° พร้อมทำความสะอาดหัวต่อราง

2) ถอดประกับรางออกและทำการยกหัวรางให้สูงจากระดับปกติ 2 ม.ม. โดยใช้ไม้บรรทัดเหล็กพิเศษมีปุ่มที่ปลายทั้ง 2 ด้านด้านละ 2 ม.ม. ทาบบนเส้นรางเอาด้านมีปุ่มไว้บนเส้นทางและใช้ลิ่มตอกเข้าใต้ฐานรางกับหมอนจนได้ระดับวัดช่องว่างของหัวต่อรางให้ได้ขนาด 17-20 ม.ม. (หรือแล้วแต่การออกแบบ)

3) เมื่อได้ระดับด้านบนแล้วให้ใช้ไม้บรรทัดพิเศษด้านที่ไม่มีปุ่มทาบริมสันรางด้านในและด้านนอกเพื่อให้ได้แนวตรงโดยยึดด้านในเป็นหลัก

4) เมื่อทำการยกหัวรางเรียบร้อยแล้วจึงทำการประกอบแบบทรายเมื่อประกอบแบบทรายดีแล้วให้นำเข็มขัดเหล็กรัดแบบทรายให้ตึงพอดีเมื่อรัดแบบทรายตึงดีแล้วเอาดินยาแบบยาตามแนวให้ทั่วเพื่อไม่ให้น้ำเหล็กรั่วออกมาได้เสร็จแล้วถอดที่รัดแบบออกและทำการประกอบแบบเหล็กทับแบบทรายอีกครั้งหนึ่งแล้วนำเข็มขัดรัดแบบรัดให้ตึงพอดี

5) เมื่อประกอบแบบเรียบร้อยแล้วติดตั้งกรวยและกระบะรองรับขี้เหล็กเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเหล็กไหลลงราง

6) ติดตั้งเบ้าสำหรับใส่ผงเทอร์มิต

7) ใส่ดากเบ้าอัตโนมัติปิดลงไปที่ก้นเบ้าปิดดากเบ้าเหล็ก (เป็นช่องทางที่น้ำเหล็กไหล) จำกนั้นเทผงเชื่อมเทอร์มิตที่เตรียมไว้ลงไปในเบ้าเหล็กจนหมดถุงแล้วจึงปิดฝาครอบ

8) ใช้หัวเผาแก๊สทำการเผาบริเวณตั้งแต่ฐานรางขึ้นมาจนถึงสันรางเพื่อให้ผิวต่อรางทั้งสองได้รับความร้อนเพียงพอต่อการรองรับการหลอมละลายของผงเชื่อมเทอร์มิต (ใช้เวลาในการเผาหัวรางทั้งสองรวมทั้งสิ้นประมาณ 8 – 10 นาที)

9) จุดไฟที่ไม้ขีดเคมีแล้วทิ้งใส่ลงในเบ้าเหล็กที่มีผงเชื่อมเทอร์มิตพร้อมอยู่แล้วปิดฝาครอบให้มิดชิด (ป้องกันน้ำเหล็กร้อนไหลออกมา) เมื่อผงเชื่อมติดไฟแล้วประมาณ 10 – 12 วินาทีจะละลายเป็นน้ำเหล็กจากนั้นอีกประมาณ 10 วินาทีดากเบ้าอัตโนมัติที่ปิดอยู่ก้นเบ้าเหล็กจะละลายเปิดทางให้น้ำเหล็กไหลลงสู่กรวยทรายและแบบทรายจนเต็ม

10) เมื่อน้ำเหล็กไหลลงแบบเรียบร้อยแล้วรีบยกเบ้าเหล็กออกปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 3 นาทีพอน้ำเหล็กเริ่มแข็งตัวจึงเคาะปลอกแบบเหล็กออกเมื่อน้ำเหล็กแข็งตัวดีแล้วใช้คีมคีบแบบด้านบนและด้านข้างทั้งสองด้านออกให้หมดจนเหลือเนื้อเหล็กหุ้มอยู่รอบรอยต่อแล้วให้เครื่องเฉือนๆตะเข็บรอยเชื่อมเทอร์มิตออกให้หมดจากนั้นทำการเจียรนัยตบแต่ง

7.3.3 การเชื่อมประแจ

<u>การเชื่อมประแจ</u>

โดยทั่วไปงานเชื่อมประแจประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ การเชื่อมสร้างประแจ ซึ่งใช้วิธีการเชื่อมไฟฟ้า (Flash Butt Welding) ซึ่งเชื่อมจากภายในโรงงาน อีกส่วนหนึ่งคือการเชื่อมซ่อมชิ้นส่วนผลิตจากเหล็กหล่อแมงกานีส เช่น ตะเฆ่ (Crossing) ในการเชื่อมซ่อมจะใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์ก เช่น การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และการเชื่อมอาร์กฟลักซ์คอร์

<u>การเชื่อมสร้างประแจ</u>

การเชื่อมสร้างประแจโดยการการเชื่อมไฟฟ้า (Flash Butt Welding)

- เชื่อมแบบอัตโนมัติ มีโปรแกรมการเชื่อมและใช้กรรมวิธีการเชื่อมที่ผ่านการรับรองมาแล้ว
- ทำการเชื่อมโดยผู้ชำนาญการ ซึ่งผ่านการอบรมและมีใบประกาศนียบัตร
- หน่วยงานเชื่อมต้องมีระบบการตรวจสอบ และประกันคุณภาพ



- ประแจแต่ละชุดต้องมีเอกสารรับรองคุณภาพ
- ต้องมีรายละเอียดเครื่องเชื่อมและต้องมีการบันทึกตัวแปรการเชื่อม ได้แก่
  - กระแสเชื่อม
  - แรงอัด
  - ระยะเปลี่ยนแปลง
  - เวลาในการเชื่อม
  - โปรแกรมและรายละเอียด
  - รายละเอียดแนวเชื่อม
  - การให้ความร้อนหลังเชื่อม (ถ้ามี)
  - การทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับการรับรองกรรมวิธีการเชื่อม ได้แก่
  - ลักษณะทางกายภาพและมิติ (Weld Geometry)
  - การทดสอบด้วยสายตา (Visual Inspection)
  - ผิวเชื่อม (Surface Finish)
  - การทดสอบ PT และ MT
  - การทดสอบคุณภาพภายในแนวเชื่อม
  - การทดสอบการดัดงอ
  - การทดสอบการล้า
  - การทดสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค
  - การทดสอบความแข็ง
- การเชื่อมงานจริง
  - มีการบันทึกตัวแปรการเชื่อมทุกแนว
  - โปรแกรมการเชื่อมและตัวแปรการเชื่อมต้องเป็นไปตามการรับรองกรรมวิธีการเชื่อม
- การตรวจสอบการเชื่อมสร้างประแจ

มีการตรวจสอบการเชื่อมงานจริง ได้แก่ การตรวจสอบด้วยสายตา ลักษณะทางกายภาพและมิติ ผิวเชื่อม การทดสอบ PT และ MT การทดสอบคุณภาพภายในแนวเชื่อม การทดสอบการดัดงอ

ในกรณีการเชื่อมไฟฟ้า (Flash Butt Welding) กับชิ้นส่วนเหล็กออสเตนิติก (Austenitic)

- ทดสอบด้วยน้ำยาแทรกซึม (Liquid Penetrate Testing) ทุกแนวเชื่อม
- ทดสอบสิ่งบกพร่องภายในด้วยเทคนิค UT (Ultrasonic Testing) ทุกแนวเชื่อม

ในกรณีการเชื่อมไฟฟ้า (Flash Butt Welding) กับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่เหล็กออสเตนิติก (Austenitic)

- ทดสอบด้วยผงแม่เหล็ก (Magnetic Particle Testing) ทุกแนวเชื่อม
- ทดสอบสิ่งบกพร่องภายในด้วยเทคนิค (Ultrasonic Testing)

7.3.4 การทดสอบและตรวจสอบคุณภาพการเชื่อมราง

หลักการ

แนวเชื่อมรางจะต้องมีการตรวจสอบตำหนิ (Defect) แนวเชื่อมรางจะต้องไม่มีตำหนิที่เป็นอันตราย เช่น การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ (Incomplete weld penetration) มีรอยไหม้ (Overburning) การแตก (Crack) รูพรุน (Porosity) สแลก (Slag) รวมทั้งตำหนิอื่น ๆ

วิธีการทดสอบและตรวจรับรอยเชื่อม Flash Butt Welding

- วิธีการทดสอบและตรวจสอบก่อนการเชื่อมจริง

ใช้การทดสอบและการรับรองกรรมวิธีการเชื่อมที่กำหนดในมาตรฐาน เช่น ที่สำคัญได้แก่

1. เช็คความตรงของแนวเชื่อม (Alignment Check)
2. ทำการตรวจสอบด้วยสายตาและโดยใช้คลื่นเสียงอุลตราโซนิค (UT) เพื่อดูความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม
3. ทดสอบการดัดงอ (Slow Bend Test)
4. ทดสอบหาค่าความแข็ง โดยค่าความแข็งต้องอยู่ระหว่าง+/- 30 BHN ของค่าความแข็งของรางก่อนเชื่อม

- วิธีการทดสอบและตรวจสอบหลังการเชื่อมจริง

1. ทำการตรวจสอบด้วยสายตา และเช็คขนาดและความตรงของแนวเชื่อม (Visual and Alignment Check)
2. ทำการตรวจสอบแนวเชื่อมโดยใช้ผงแม่เหล็ก (MT) ทุกแนวเชื่อม (จะต้องไม่มีรอยแตกหรือสิ่งบกพร่องอื่น ๆ) ในกรณีการเชื่อมกับชิ้นส่วนเหล็กออสเตนิติก (Austenitic) ให้ทดสอบด้วยน้ำยาแทรกซึม (Liquid Penetrate Testing) ทุกแนวเชื่อม
3. ทำการตรวจสอบแนวเชื่อมโดยใช้คลื่นเสียงอุลตราโซนิค (UT) ทุกแนวเชื่อม (จะต้องไม่มีสิ่งบกพร่องที่เป็นอันตราย เช่น รอยแตกหรือรูพรุน)
4. ทดสอบการดัดงอ (Slow Bend Test) ทุกๆ 500 แนวเชื่อม
5. มีระบบบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลการเชื่อม (Data Analysis by Weld Management System)

รายละเอียดการบันทึกเอกสารการเชื่อม ซึ่งมีข้อมูลดังนี้ ได้แก่

- วันเวลาที่เชื่อม



- ชื่อของราง
- ลำดับที่ของแนวเชื่อม
- Welder ID
- ชนิดแนวเชื่อม
- ชนิดการเชื่อม (เช่น Flash Butt)
- อุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิราง
- ชนิดของราง (เช่น Standard to standard)
- ข้อมูลการผลิตราง/วันที่ผลิต
- Heat
- ชื่อผู้รับเหมา
  ตัวแทนนายจ้าง

การแก้ไข (การซ่อม) แนวเชื่อมไม่ดี

ในกรณีที่แนวเชื่อมไม่ผ่านตามข้อกำหนด จะต้องมีการมาร์คด้วยสีแดงและตัดแนวเชื่อมเดิมออก และทำการเชื่อมใหม่ทันทีด้วยวิธีการเชื่อมเดิม หรือในบางกรณีอาจใช้การเชื่อม Thermit Welding

วิธีการทดสอบและตรวจรับรอยเชื่อม Thermit Welding

- วิธีการทดสอบและตรวจสอบก่อนการเชื่อมจริง

ใช้การทดสอบและการรับรองกรรมวิธีการเชื่อมที่กำหนดในมาตรฐาน เช่น ที่สำคัญได้แก่

1. เช็คความตรงของแนวเชื่อม (Alignment Check)
2. ทำการตรวจสอบด้วยสายตาและโดยใช้คลื่นเสียงอุลตราโซนิค (UT) เพื่อดูความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม
3. ทดสอบการดัดงอ (Slow Bend Test)
4. ทดสอบหาค่าความแข็ง โดยค่าความแข็งต้องอยู่ระหว่าง+/- 30 BHN ของค่าความแข็งของรางก่อนเชื่อม



- วิธีการทดสอบและตรวจสอบหลังการเชื่อมจริง

1. ทำการตรวจสอบด้วยสายตา และเช็คขนาดและความตรงของแนวเชื่อม (Visual and Alignment Check)
2. ทำการตรวจสอบแนวเชื่อมโดยใช้ผงแม่เหล็ก (MT) ทุกแนวเชื่อม (จะต้องไม่มีรอยแตกหรือสิ่งบกพร่องอื่น ๆ)
3. ทำการตรวจสอบแนวเชื่อมโดยใช้คลื่นเสียงอุลตราโซนิค (UT) ทุกแนวเชื่อม (จะต้องไม่มีสิ่งบกพร่องที่เป็นอันตราย เช่น รอยแตกหรือรูพรุน)
4. ทดสอบการดัดงอ (Slow Bend Test) ทุกๆ 500 แนวเชื่อม

รายละเอียดการบันทึกเอกสารการเชื่อมคล้ายคลึงกับกรณีการเชื่อม Flash Butt Welding

<u>การทดสอบคุณภาพราง</u>

ในระหว่างการผลิตรางหรือรางที่ผลิตเสร็จแล้วจะต้องมีการทดสอบ และมีการตรวจเพื่อรับรองคุณภาพของราง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

<u>การทดสอบในห้องปฏิบัติการ</u>

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี

ทดสอบโดยใช้เครื่อง Vacuum-Emission Spectrophotometric Analyzer ค่าองค์ประกอบทางเคมีของรางเกรดต่าง ๆ

การตรวจสอบปริมาณไฮโดรเจน

ทดสอบโดยใช้เครื่อง Hydrogen Determinator

การตรวจสอบปริมาณออกซิเจน

การตรวจสอบปริมาณออกซิเจนโดยเลือกจากตำแหน่งในตารางที่ 7-1 ชนิดของเหล็กรางรถไฟ

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ตำแหน่งของการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในตารางที่ 7-1

- ข้อกำหนดสำหรับเหล็กเกรด 200, 220

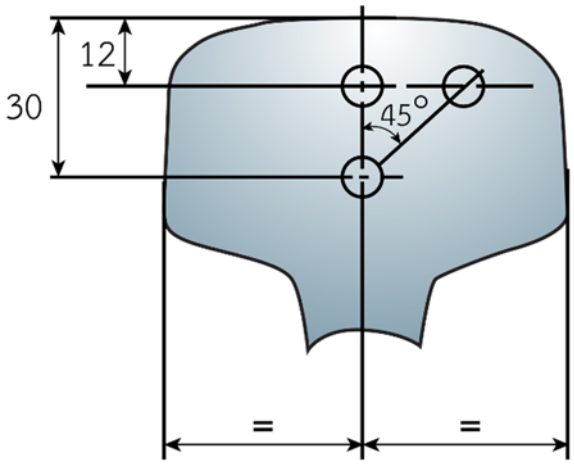
โครงสร้างจุลภาคต้องเป็นโครงสร้างผสมระหว่างเพอร์ไลต์ (Pearlite) กับโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่ขอบเกรนจะต้องไม่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์เบไนท์หรือซีเมนไทต์ที่ขอบเกรน

- ข้อกำหนดสำหรับเหล็กเกรด 260, 260 Mn

โครงสร้างจุลภาคต้องเป็นเพอร์ลิติก (Pearlitic) แต่อาจจะมีเฟอร์ไรท์ที่ขอบเกรน ค่าสูงสุดเฟอร์ไรท์ที่ขอบเกรนจะต้องไม่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์เบไนท์หรือซีเมนไทต์ที่ขอบเกรน

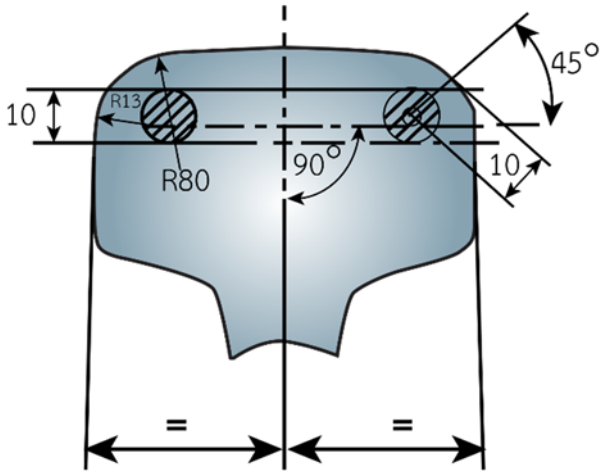
- ข้อกำหนดสำหรับเหล็กเกรด 350 HT, 350 LHT

โครงสร้างจุลภาคต้องเป็นเพอร์ลิติก (Pearlitic) และต้องไม่มีมาร์เทนไซต์เบไนท์หรือซีเมนไทต์ที่ขอบเกรน



หน่วย : มม.

รูปที่ 7-8 ตำแหน่งของรางเพื่อทดสอบหาปริมาณออกซิเจน



หน่วย : มม.

เครื่องหมาย

จุดตัดของรัศมี R 13 และ R 80 (ราง60 E 1)

ตำแหน่งตรงกลางของแรงดึงจากการทดสอบ

พื้นที่ที่จะตรวจสอบถึงโครงสร้างจุลภาค

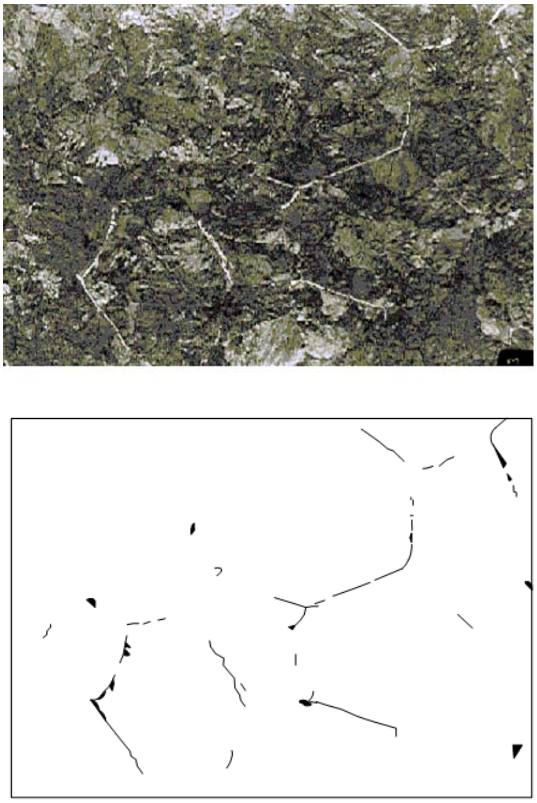
รูปที่ 7-9 ตำแหน่งของรางเพื่อทดสอบแรงดึงและโครงสร้างจุลภาค

ตารางที่ 7-2 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกล

ตัวอย่างของชนิดของเหล็ก		ร้อยละของมวล									สูงสุด 10-4 % (ppm)		ค่า Rm น้อยสุด (MPa)	ค่า elong น้อยสุด (%)	ความแข็งบนผิว (HBW)
		C	Si	Mn	P สูงสุด	S	Cr	Al สูงสุด	V ของแข็ง	N ของแข็ง	O	H			
260	ของเหลว	0.62/0.80	0.15/0.58	0.70/1.20	0.025	0.008/ 0.025	0.15 สูงสุด	0.004	0.030	0.009	20	2.5	880	10	260/300
	ของแข็ง	0.60/0.82	0.13/0.60	0.65/1.25	0.030	0.008/ 0.030	0.15 สูงสุด	0.004	0.030	0.010	20	2.5			
350 HT	ของเหลว	0.72/0.80	0.15/0.58	0.70/1.20	0.020	0.008/ 0.025	0.15 สูงสุด	0.004	0.030	0.009	20	2.5	1175	9	350/390
	ของแข็ง	0.70/0.82	0.13/0.60	0.65/1.25	0.025	0.008/ 0.030	0.15 สูงสุด	0.004	0.030	0.010	20	2.5			

ตารางที่ 7-3 ปริมาณไฮโดรเจน

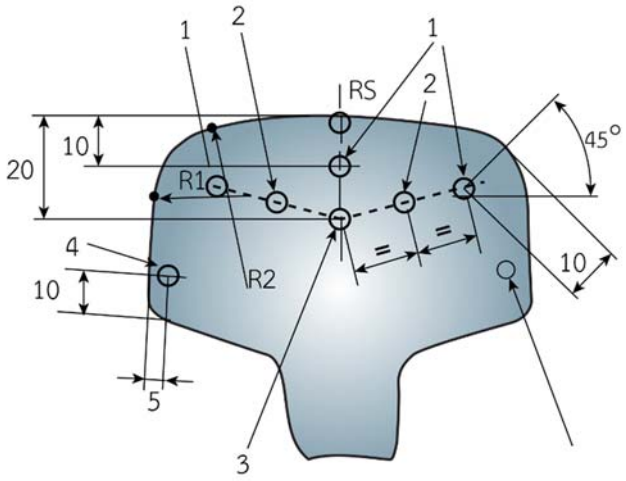
กลุ่มความร้อน	ปริมาณไฮโดรเจน 10^{-4} % (ppm)	
	ชนิดของเหล็ก 200 และ 220	ทั้งหมดของชนิดของเหล็ก
กลุ่ม 1	$\leq$ 3.0	$\leq$ 2.5
กลุ่ม 2	$>$ 3.0	$>$ 2.5



รูปที่ 7-10 โครงสร้างจุลภาคแสดงปริมาณเฟอร์ไรท์ที่ขอบเกรนสำหรับรางทุกเกรด ยกเว้นเกรด 200 และ 220

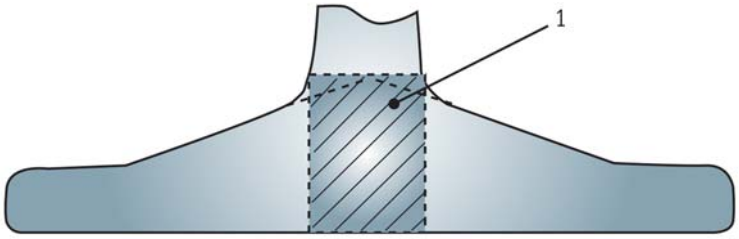
การทดสอบความแข็ง

ทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) โดยนำตัวอย่างหน้าตัดรางทดสอบไปขัดผิวให้เรียบแล้วนำไปกดค่าความแข็งตามตำแหน่งในรูปที่ 7-11 ค่าความแข็งแสดงดังตารางที่ 7-4



หน่วย มิลลิเมตร :

รูปที่ 7-11 ตำแหน่งทดสอบความแข็ง



รูปที่ 7-12 พื้นที่ทดสอบบริเวณฐานราง 60 E 1

ตารางที่ 7-4 ตำแหน่งทดสอบความแข็งและค่าความแข็ง

ตำแหน่ง	ชนิดของเหล็กรางรถไฟ						
	200	220	260	260 Mn	320 Cr	350 HT	350 LHT
	ความแข็ง (HBW)						
RS	200-240	220-260	260-300	260-300	320-360	350-390	350-390
1						340 น้อยสุด	340 น้อยสุด
2						331 น้อยสุด	331 น้อยสุด
3						321 น้อยสุด	321 น้อยสุด
4						340 น้อยสุด	340 น้อยสุด

การทดสอบความต้านทานแรงดึง

ทดสอบความต้านทานแรงดึงตำแหน่งของชิ้นงานทดสอบในรูปที่ 7-12 ผลของการทดสอบแสดงผลตามตารางที่ 7-4

การทดสอบพิกัดความเผื่อ

ใช้ทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจสอบมิติต่าง ๆ โดยที่มิติของขนาดต่าง ๆ จะต้องมีการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อน

การตรวจสอบมิติ

การตรวจสอบมิติ ประกอบด้วยการตรวจสอบขนาด รูปร่าง และสภาพผิว ซึ่งได้แก่ ตรวจสอบความยาวของราง ตรวจสอบความชำรุดที่ผิวราง ตรวจสอบความตรงของรางทั้งท่อน ตรวจสอบความตรงที่ปลายราง ตรวจสอบความสูงของราง ตรวจสอบความกว้างของฐานราง ตรวจสอบความกว้างของหัวราง ตรวจสอบความหนาของเอวรางการตรวจสอบมิติจะใช้ร่วมกับการทดสอบพิกัดความเผื่อ

การตรวจสอบคุณภาพภายในและผิวของราง

คุณภาพภายในของรางจะต้องผ่านการตรวจสอบด้วย UT ตลอดความยาวของราง รวมถึงการตรวจสอบหน้าตัดของราง โดยที่พื้นที่หน้าตัดที่ต้องตรวจสอบด้วย UT อย่างน้อย 70% ของหัวราง (Head) อย่างน้อย 60% ของเอวราง (Web) พื้นที่ของฐานราง (Foot) ที่ต้องตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 7-12

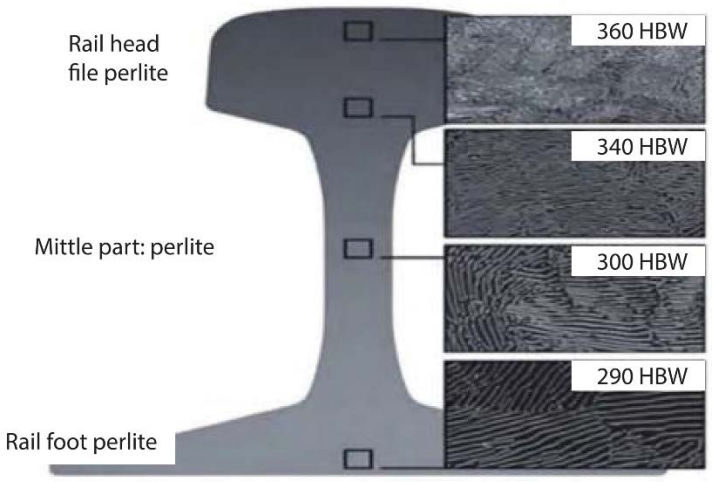
รางหัวแข็ง (Head-hardened Rail)

รางหัวแข็ง คือรางที่มีความแข็งมากเป็นพิเศษบริเวณหัวราง นิยมใช้ในบริเวณสถานีและบริเวณทางโค้ง เนื่องจากมีสมบัติทนทานต่อการเสียดสี (Wear Resistance) ดีเป็นพิเศษ โดยในขั้นตอนการผลิตมีการกระทำความร้อน (Heat Treatment) ที่บริเวณหัวราง ในส่วนของเอวรางและฐานรางยังคงเป็นเหล็กกล้าปกติ จึงดูเหมือนว่ารางหัวแข็งทำจากโลหะ 2 ชนิด (ดังรูปที่ 7-13)



รูปที่ 7-13 รางรถไฟที่ชุบแข็งที่หัวราง

โดยบริเวณหัวรางประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคเป็นเพอร์ไลต์ละเอียด (Fine Pearlite) (ดังรูปที่ 7-14) เช่น รางเกรด R350HT ซึ่งมีค่าความแข็งแรงหัวรางประมาณ 1,175 MPa ในขณะที่ส่วนอื่น ๆ เช่น เอวรางและฐานราง มีค่าประมาณ 880 MPa และค่าความแข็งบริเวณหัวรางอย่างน้อยตั้งแต่ 350 BHN



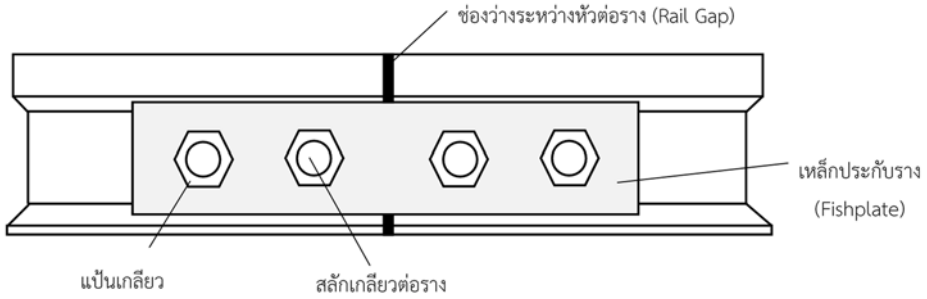
รูปที่ 7-14 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็งบริเวณหัวราง เอวราง และฐานราง

7.3.5 ประกับราง

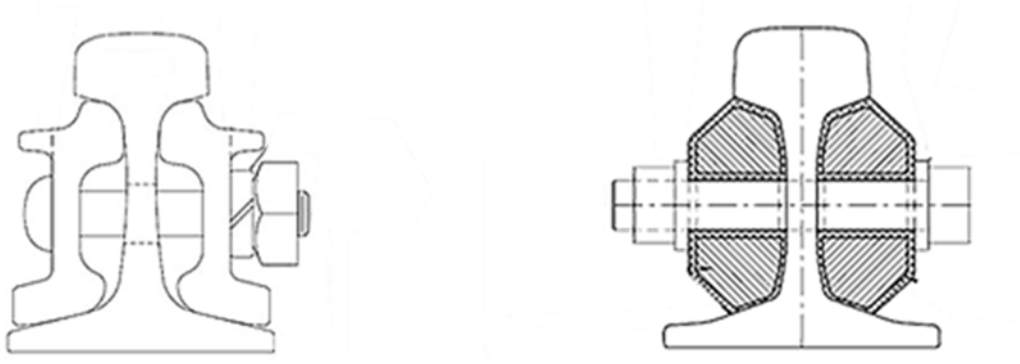
องค์ประกอบและวัสดุของประกับราง

ทั่วไป

รอยต่อทางกลที่จะพิจารณาในหัวข้อนี้คือ เหล็กประกับราง (Fishplate, splice bar or joint bar) โดยเหล็กประกับรางนั้นเป็นเครื่องประกอบราง (Rail accessories) ใช้สำหรับการเชื่อมต่อปลายรางทั้งสองท่อนให้มีความต่อเนื่องเป็นแนวเดียวกันโดยใช้การขันสลักเกลียว (Bolt) หากรอยต่อดังกล่าวได้รับการเชื่อมประสานที่ดีจะเป็นการช่วยลดการเคลื่อนตัวของรางทั้งในทางแนวราบและแนวดิ่งอันเป็นผลมาจากการที่คุณสมบัติโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดถูกรบกวนรูปที่ 7-15 นั้นได้แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของรอยต่อทางกลโดยใช้แผ่นเหล็กประกับ ส่วนภาคตัดขวางสำหรับรอยต่อทางกลชนิดไร้ฉนวนและมีฉนวนได้แสดงไว้ในรูปที่ 7-16



รูปที่ 7-15 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของเหล็กประกับราง



รูปที่ 7-16 ชนิดของรอยต่อทางกลโดยใช้แผ่นเหล็กประกับ

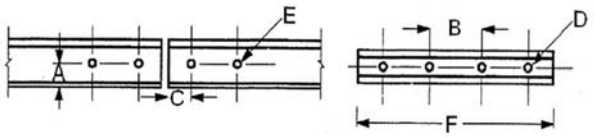
เหล็กประกับรางแบบไม่มีฉนวนที่ดีนั้น เมื่อทำการขันด้วยสลักเกลียวจนแน่นแล้วจะมี 2 จุดที่แนบสนิทกับรางเหล็กคือ ส่วนบนต้องแนบกับใต้สันรางและส่วนล่างต้องแนบกับฐานราง นอกจากนั้น โดยทั่วไปบริเวณส่วนกลางจะมีระยะห่างจากเอวรางประมาณ 5-6 มม.ระยะห่างดังกล่าวมีข้อดีคือ ช่วยในการระบายอากาศ ซึ่งทำให้ตัวเหล็กประกับและรางเหล็กไม่เกิดสนิม ผุกร่อนง่าย ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาการสึกกร่อน หลวมคลอนของเหล็กประกับรางอันเนื่องจากการถูกใช้งานไปเป็นระยะเวลานานได้โดยง่าย เพียงแค่ขันสลักเกลียวให้แน่นคงเดิม

คุณลักษณะโดยทั่วไปที่ต้องการสำหรับการออกแบบรอยต่อทางกล

- รอยต่อสามารถเชื่อมปลายทั้งสองข้างของรางในลักษณะที่การเชื่อมต่อนั้นต้องทำให้จุดต่อมีพฤติกรรมเสมือนคานต่อเนื่อง
- สามารถจำกัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและด้านข้าง แต่ยังคงสามารถยอมให้รางมีการเคลื่อนตัวตามแนวยาวจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
- สามารถเข้ากันได้และช่วยส่งเสริมการทำงานกับระบบอุปกรณ์ยึดรั้งของราง (Fastener) ง่ายและสะดวกในการประกอบ ติดตั้ง สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ไม่ต้องใช้อุปกรณ์มาก

รูปร่างและมิติ

รายละเอียดของเหล็กประกับสำหรับรางชนิดต่าง ๆ รวมถึงขนาดของสลักเกลียวที่ใช้ในการประกอบได้แสดงในตารางที่ 7-5



ตารางที่ 7-5 รายละเอียดของเหล็กประกับรางขนาดต่าง ๆ และสลักเกลียวต่อรางที่ใช้ประกอบในทาง

ขนาดรางเหล็ก	A ระยะจากฐานรางถึงศูนย์กลางรู	B ระยะห่างระหว่างรูเหล็กประกับราง	C ระยะจากปลายรางถึงศูนย์กลางรู	D ขนาดรูเหล็กประกับราง	E ขนาดรูเจาะรางเหล็ก	F ความยาวเหล็กประกับราง	ขนาดสลักเกลียวที่ใช้ยึด
50#	47.63	120	57	20.63	23.81 (15/16)”	500	19.05 (3/4)”
60#	47.63	101.60	47.80	20.63	23.81 (15/16)”	406.40	19.05 (7/8)”
70# A	50.80	101.60	47.80	22.23	26.98 (1 1/16)”	406.40	20.63 (13/16)”
70# R	51.91	101.60	47.80	22.23	23.81 (1 1/16)”	406.40	20.63 (13/16)”
70# ASCE	54.00	127	60.50	22.23	23.81 (1 1/8)”	484	22.23 (7/8)”
80# A	60.30	101.60	47.80	23.81	23.81 (1 1/4)”	406.40	25.40 (1)”
100# A (แบบโรงงาน)	60.30	101.60	47.80	26.98	23.81 (1 1/4)”	406.40	25.40 (1)”
100# A (ปรับปรุงทาง)	60.30	130	62	26.98	23.81 (1 1/4)”	560	25.40 (1)”
100# A (ทางคู่)	48.22	114.30	54.15	26.98	23.81 (1 1/16)”	543	20.63

หมายเหตุ มิติ เป็น มิลลิเมตร



พิกัดความคลาดเคลื่อน

ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะต่าง ๆ ที่ยอมให้ อ้างอิงที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ได้แสดงในตารางที่ 7-6 ดังนี้

ตารางที่ 7-6ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะต่าง ๆ ที่ยอมให้ อ้างอิงที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

รายการ	พิกัดความคลาดเคลื่อน	
	มิลลิเมตร	มิลลิเมตร
ความยาว	+1.6	-1.6
เส้นผ่าศูนย์กลางรูสลักเกลียว	+0.8	-0.0
ระยะห่างระหว่างรูสลักเกลียว	+0.8	-0.8
การได้ฉากของปลาย	0.4	0.4

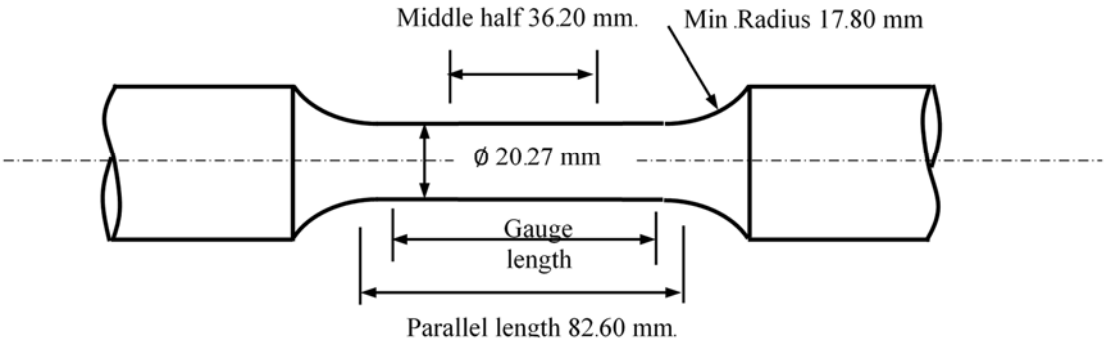
7.3.6 คุณสมบัติทางกลและการทดสอบประกับราง

<u>การทดสอบ</u>

นอกจากการตรวจสอบขนาดและมิติต่าง ๆ แล้ว ต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุและรอยต่อซึ่งประกอบด้วย

- การทดสอบแรงดึงของวัสดุ(ต้องมีผลการทดสอบ Hardnessร่วมด้วยทุกครั้ง
- การทดสอบการดัดโค้ง
- การทดสอบความแข็งโดยวิธี Brinell Hardness Test
- การทดสอบกาลังต้านทานแรงดึงตามแนวยาวของจุดต่อ
- การทดสอบกาลังต้านทานแรงดัด
- การทดสอบคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า

การทดสอบแรงดึงของวัสดุ



รูปที่ 7-17 ขนาดมาตรฐานของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงของวัสดุเหล็กประกับราง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้จากการกลึงเหล็กประกับรางให้ได้ขนาดมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 7-17 เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ค่า Tensile Strength ต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 57 ถึง 66 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร และมีค่า Minimum Elongation ไม่เกิน ร้อยละ 20

อย่างไรก็ตามหากชิ้นส่วนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบขาดออกจากกันอยู่นอกบริเวณ Middle half ของ Gauge lengthจะไม่ยอมรับผลการทดสอบนั้นถึงแม้ว่าจะผ่านตามเงื่อนไขข้างต้นแล้วก็ตาม

- จำนวนครั้งการทำการทดสอบ
    - ทำการทดสอบ 1 ตัวอย่าง จากการผลิตแต่ละครั้งไม่เกิน 1000 คู่ ต่อครั้ง และเศษของ 1000 คู่
    - ทำการทดสอบ 2 ตัวอย่าง จากการผลิตแต่ละครั้งเกินกว่า 1000 คู่ ต่อครั้ง และเศษของ 1000 คู่
    - หากไม่ผ่านผลการทดสอบดังที่แสดงก่อนหน้านี้ ต้องดำเนินการ
    - ทำการทดสอบแรงดึงเพิ่มเติม 2 ตัวอย่าง กรณีผลิตไม่เกิน 1000 คู่ ต่อครั้ง
    - ทำการทดสอบแรงดึงเพิ่มเติม 3 ตัวอย่าง กรณีผลิตเกินกว่า 1000 คู่ ต่อครั้ง

หากตัวอย่างที่ทำการทดสอบเพิ่มอันใดอันหนึ่งไม่ผ่านคุณสมบัติดังที่ระบุไว้ ให้ถือว่า เหล็กประกับรางที่ผลิตในครั้งนั้นไม่ได้มาตรฐาน

การทดสอบการดัดโค้ง

การทดสอบจะนำเหล็กประกับรางมาทำการดัดโค้งระหว่างรูคู่ในของเหล็กประกับราง ณ อุณหภูมิห้อง โดยทำการดัดโค้งที่ 120 องศา ทั้งนี้ในการดัดรัศมีภายในของความโค้งต้องไม่เกินสองเท่าของความหนาที่จุด



ศูนย์กลางของเหล็กประกับราง และการดัดต้องเพิ่มแรงกดขึ้นทีละน้อยเหล็กประกับรางที่ผ่านการทดสอบต้องไม่ปรากฏรอยปริ ร้าว แตก บนผิวเหล็กด้านนอก

- จำนวนครั้งการทำการทดสอบ
  - ทำการทดสอบการดัดโค้ง 1 ตัวอย่างจากการผลิตแต่ละครั้งหรือส่วนหนึ่งของการผลิตแต่ละครั้งซึ่งมีปริมาณการผลิตเหล็กประกับรางไม่เกิน 1000 คู่ต่อครั้ง
  - ทำการทดสอบการดัดโค้ง 2 ตัวอย่างจากการผลิตแต่ละครั้งหรือส่วนหนึ่งของการผลิตแต่ละครั้งซึ่งมีปริมาณการผลิตเหล็กประกับรางมากกว่า 1000 คู่ต่อครั้ง
  - หากพบรอย ปริ ร้าว หรือแตก เกิดขึ้นที่ผิวเหล็กประกับจะถือว่าไม่ผ่านการทดสอบ และจะต้องดำเนินการดังนี้
    - ทำการทดสอบการดัดโค้ง เพิ่มเติมจำนวน 2 ตัวอย่าง ในกรณีที่ผลิตครั้งละไม่เกิน 1000 คู่ต่อครั้ง
    - ทำการทดสอบการดัดโค้ง เพิ่มเติมจำนวน 3 ตัวอย่าง ในกรณีที่ผลิตครั้งละเกินกว่า 1000 คู่ต่อครั้ง

โดยเตรียมตัวอย่างทดสอบจากเหล็กประกับรางอื่นที่ได้จากการผลิตครั้งเดียวกันกับเหล็กประกับรางที่ไม่ผ่านการทดสอบ หากพบว่ามีตัวอย่างทดสอบอันใดอันหนึ่งไม่ผ่าน มีรอย ปริ แตก ร้าว ที่ผิวเหล็กด้านนอก ถือว่าไม่ผ่านมาตรฐาน

<u>การทดสอบความแข็ง (Brinell Hardness Test)</u>

เป็นการวัดความแข็งของตัวอย่างทดสอบจากรอยบุ๋มที่เกิดจากการกดลูกปืนแข็ง (Ball) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าหรือทังสเตนคาร์ไบด์โดยมีข้อกำหนดดังนี้

เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกปืน (Ball) = 10 มิลลิเมตร

น้ำหนักกด = 3000 กิโลกรัม

ระยะเวลากด = 15 วินาที

การทดสอบจะทำ Brinell Hardness Test1 ครั้ง กับตัวอย่างทดสอบแรงดึงทุกตัวอย่าง

<u>การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงตามแนวยาวของจุดต่อ (Longitudinal tensile strength)</u>

ค่าน้อยสุดของกำลังต้านทานแรงดึง$\left(F_{\mathrm{s,min}}\right)$ตามแนวยาวของเหล็กประกับราง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7-1

$$F_{\mathrm{s,min}} = F_{\mathrm{max}}\gamma_s$$
$$F_{\mathrm{max}} = EA_{\mathrm{rail}}\alpha\Delta T_1\gamma_s \qquad \text{สมการที่ 7-1}$$

เมื่อ

F_{max}= แรงดึงมากสุดที่เกิดขึ้นในรางเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (นิวตัน)

E= ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของราง (นิวตัน/ตารางเมตร)ซึ่งมีค่าเท่ากับ 210×10^9นิวตัน/ตารางเมตร

A_{rail}= พื้นที่หน้าตัดของราง (ตารางเมตร)

α= ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิเชิงเส้นค่าที่แนะนำคือ 1.2×10^{-5}/องศาเซลเซียส

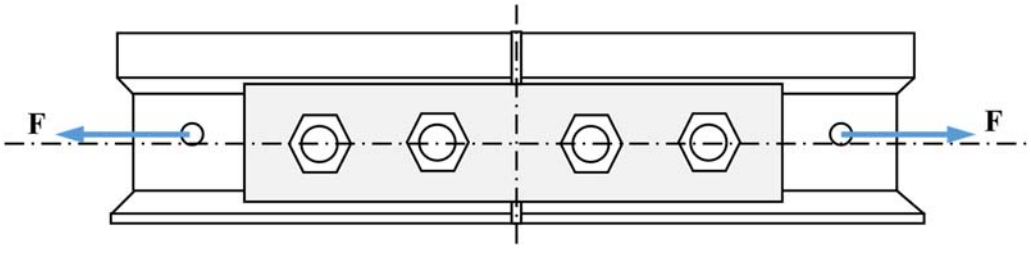
ΔT_1= ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (Natural, Stress-Free, And Minimum Rail Temperature)

γ_s= อัตราส่วนความปลอดภัยของน้ำหนักที่กระทำ (ค่าที่แนะนำ คือ 1.5)

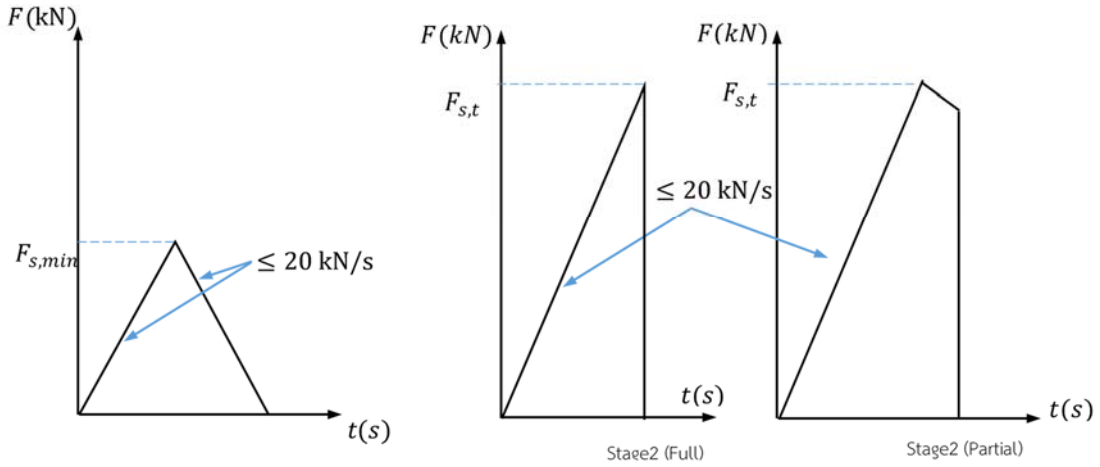
การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงตามแนวยาว สามารถทำได้โดยติดตั้งเหล็กประกับรางเข้ากับชิ้นส่วนรางรถไฟ เพื่อเป็นชิ้นส่วนตัวอย่างในการทดสอบ ทั้งนี้การทดสอบโดยทั่วไปจะแบ่งออกได้เป็น 2 ระยะคือ

ระยะที่ 1 แรงดึงที่กระทำต่อชิ้นส่วนทดสอบจะถูกเพิ่มค่าขึ้นเรื่อย ๆ ในอัตราส่วนที่คงที่ โดยทั่วไปจะไม่เกิน 20 กิโลนิวตัน/วินาที จนกระทั้งถึงค่ากำลังแรงดึงน้อยสุด $(F_{\mathrm{s,min}})$ จากนั้นทำการลดค่าแรงดึงลงไปสู่ค่า 0กิโลนิวตัน โดยอัตราส่วนการลดแรงมีค่าเช่นเดียวกันกับการเพิ่มแรง แล้วจึงทำการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น

ระยะที่ 2 การทดสอบในครั้งนี้เป็นการทดสอบเพื่อคำนวณหากำลังต้านทานแรงดึงของรอยต่อทางกล $(F_{\mathrm{s,t}})$โดยในการทดสอบจะทำการเพิ่มค่าแรงดึงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบในอัตราส่วนที่คงที่เช่นกันซึ่งไม่เกิน 20 กิโลนิวตัน/วินาที จนกระทั่งรอยต่อนั้นเกิดการวิบัติหรือถึงค่าแรงดึงมากสุดที่รอยต่อนั้นจะรับได้ แล้วจึงทำการลดค่าแรงที่กระทำไปสู่ค่า 0 kNในทันทีทันใด ค่าแรงดึงมากสุดจากค่าที่บันทึกได้คือค่ากำลังต้านทานแรงดึงของรอยต่อทางกล $(F_{\mathrm{s,t}})$



รูปที่ 7-18 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง



รูปที่ 7-19 ขั้นตอนการให้น้ำหนักกระทำในการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและรูปแบบการวิบัติ

- จำนวนครั้งการทำการทดสอบ
  - การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงตามแนวยาวของจุดต่อจะทำ 1 ตัวอย่างจากเหล็กประกับราง 1000 ชิ้น

การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด (Flexural Strength)

คุณสมบัติเชิงกลสำหรับการต้านทานแรงดัดสามารถหาได้โดยการทดสอบแรงดัดแบบซ้ำ ๆ (Repeated Bending Test) ซึ่งวัตถุประสงค์ในการทดสอบก็เพื่อหาความสามารถของรอยต่อทางกลในการต้านทานแรงในแนวดิ่งจากขบวนรถซึ่งผ่านมายังล้อและกระทำต่อรอยต่อ แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 7-20 ขนาดของโมเมนต์ที่จะกระทำต่อชิ้นส่วนตัวอย่าง (M_r)สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7-2

$$M_r = \sqrt[3]{\frac{Q^2 E I_{rail} W_{max}}{8}} \gamma_C$$ สมการที่ 7-2

เมื่อ

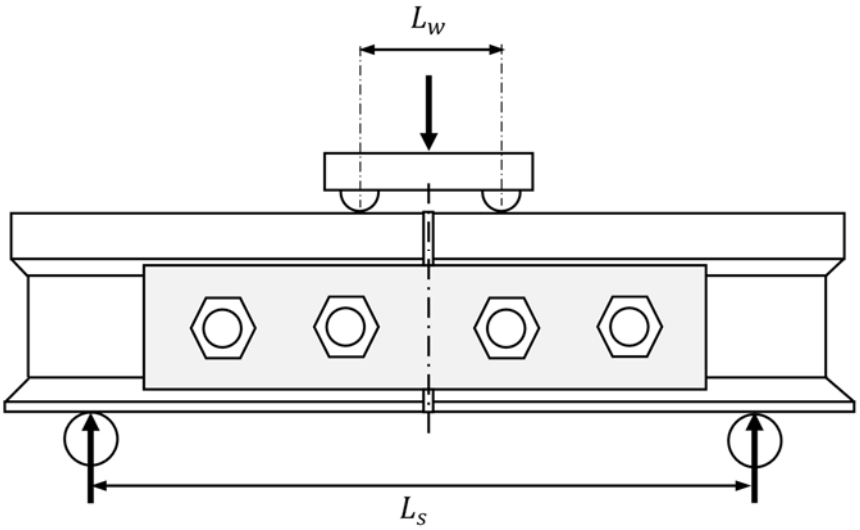
Q= Nominal wheel load (นิวตัน) ปกติมีค่าเท่ากับ125×10^3นิวตัน

E= ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของราง (นิวตัน/ตารางเมตร) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 210×10^9(นิวตัน/ตารางเมตร)

I_{rail}= โมเมนต์ความเฉื่อยของราง (เมตร^4)

W_{max}= ค่าการทรุดตัวของมากสุดของรางซึ่งอยู่ติดกับโครงสร้างทาง ค่าที่แนะนำคือ 1.5×10^{-3} เมตร

γ_C= ค่าความปลอดภัย และ ค่าปรับแก้ โดย มีค่าเท่ากับ 1.5 สำหรับ a suspended mechanical rail joint และ เท่ากับ 1.0 สำหรับ a supported mechanical rail joint สามารถคำนวณหาแรงมากสุดที่กระทำได้โดย



$$F_{\max} = 4\frac{M_r}{(L_s - L_w)}$$ สมการที่ 7-3

รูปที่ 7-20 การติดตั้งตัวอย่างเพื่อทดสอบการดัดแบบซ้ำ ๆ

การทดสอบจะทำการให้น้ำหนักกระทำกับชิ้นส่วนตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 7-20 โดยขนาดของน้ำหนักจะอยู่ระหว่างค่าน้อยสุด ($F_{\min}$)ซึ่งโดยปกติมีค่าเท่ากับ 5 กิโลนิวตัน และค่ามากสุด ($F_{\max}$)จากสมการที่ 7-3 ความถี่ของแรงที่กระทำมีค่าระหว่าง $3 - 5$ Hzและจำนวนรอบเท่ากับ 3 ล้านรอบเมื่อการทดสอบเสร็จสิ้นลงจึงทำการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น หากไม่พบความเสียหายแสดงว่าชิ้นส่วนตัวอย่างผ่านการทดสอบ

- จำนวนครั้งการทำการทดสอบ
  - การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดจะทำ 1 ตัวอย่างจากเหล็กประกับราง 1000 ชิ้น

7.3.7 คุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าและการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า

วัตถุประสงค์ในการทดสอบนี้ก็เพื่อจะหาความสามารถของรอยต่อรางประเภทฉนวน (Insulated Rail Joints) ในการแยกกระแสไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองข้างของรางออกจากกันชิ้นส่วนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนั้นสามารถใช้ตัวอย่างดังเช่นกรณีการทดสอบแรงดัดการทดสอบจะดำเนินการใน 2 เงื่อนไขคือสภาวะแบบเปียกและแห้งโดยในการทดสอบแบบเปียกนั้นจะนำชิ้นส่วนตัวอย่างไปแช่น้ำซึ่งมีความเข้มข้นของ NaCl เท่ากับ5 % เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างมาวางบน Insulated Support โดยทิ้งให้แห้งเอง ณ อุณหภูมิห้อง ประมาณ 23±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงแล้วจึงทำการตรวจวัดค่าฉนวนไฟฟ้าซึ่งในขั้นตอนนี้การทดสอบทั้งแบบเปียกและแห้งนั้นมีกระบวนการที่เหมือนกันนอกจากนั้น เครื่องมือดิจิตอลที่ใช้ในการวัดต้องสามารถวัดค่าการเป็นฉนวนได้จากกระแสไฟฟ้า 500 V DC และ ต้องสามารถวัดค่าได้ถูกต้องอย่างน้อยที่ความต้านทาน 50 เมกกะโอห์มหรือมากกว่า โดยมีค่าความละเอียดในระดับทศนิยม 2 ตำแหน่ง

รูปที่ 7-21 นั้น แสดงตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและตำแหน่งในการวัดค่า ซึ่งข้อมูลในการวัดจะประกอบด้วยข้อมูลทั้งหมด 5 ชุดด้วยกัน คือ

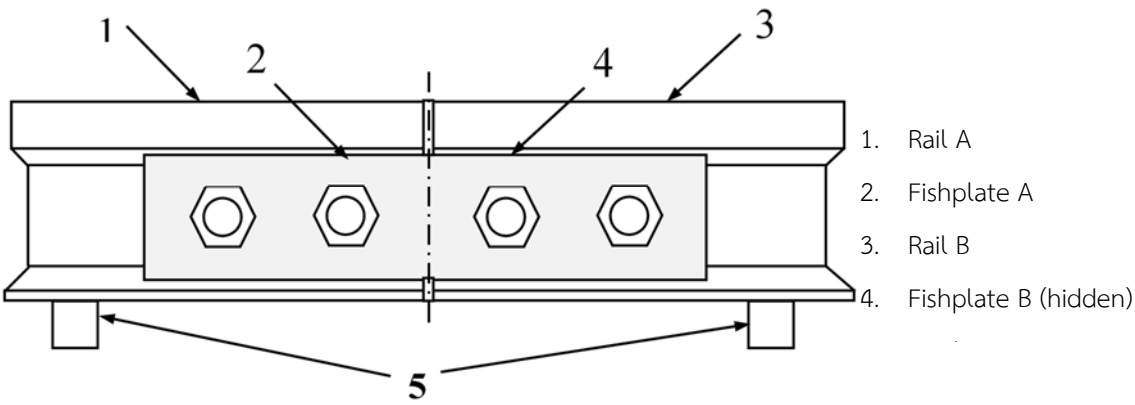
Rail A – Rail B

Rail A – Fishplate A

Rail A – Fishplate B

Rail B – Fishplate A

Rail B – Fishplate B



รูปที่ 7-21 การจัดวางชิ้นส่วนตัวอย่างสำหรับ Electrical insulation test และตำแหน่งการวัดค่า



- จำนวนครั้งการทำการทดสอบ
  - การทดสอบ Electrical insulation test ต้องทำทุกตัวอย่าง สำหรับเหล็กประกับรางชนิดมีฉนวน

7.4 จุดต่อเผื่อขยาย

7.4.1 องค์ประกอบและวัสดุของจุดต่อเผื่อขยาย

ทั่วไป

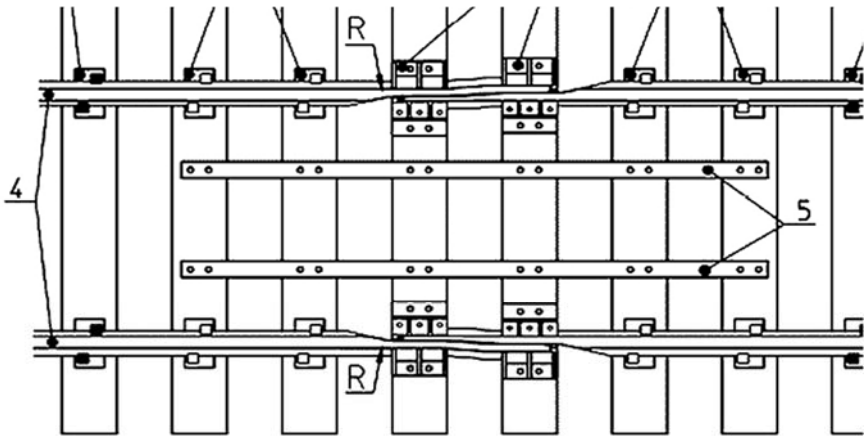
รอยต่อเพื่อการขยายตัวเป็นรอยต่อที่อนุญาตให้รางทั้งสองที่ต่อกันนั้นสามารถขยายตัวตามแนวยาวของรางได้ โดยยังคงรักษาแนวเส้นทางการเดินรถและมีจุดรองรับที่เหมาะสม

ประเภทของรอยต่อให้ขยายตัว

สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ ๆ คือ Adjustment Switch และ Expansion Switch โดยในแบบแรกนั้น ขอบทางวิ่ง (Running Edge) จะถูกลดพื้นที่หน้าตัดลง ส่วนในแบบหลังนั้นจะไม่มีการรบกวนพื้นที่หน้าตัดของขอบทางวิ่ง ดังต่อไปนี้

Adjustment switch (bayonet type)

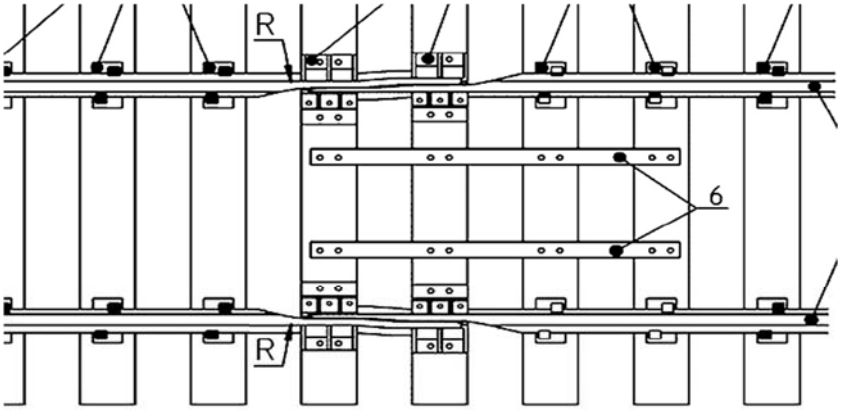
- Adjustment switch without check rails (both sides moveable*)*



lide chair
ow restrain fastening
4 moveable rails
5 bearer straps

รูปที่ 7-22 Adjustment Switch – Both Sides Moveable

- Adjustment switch without check rails (one side moveable)

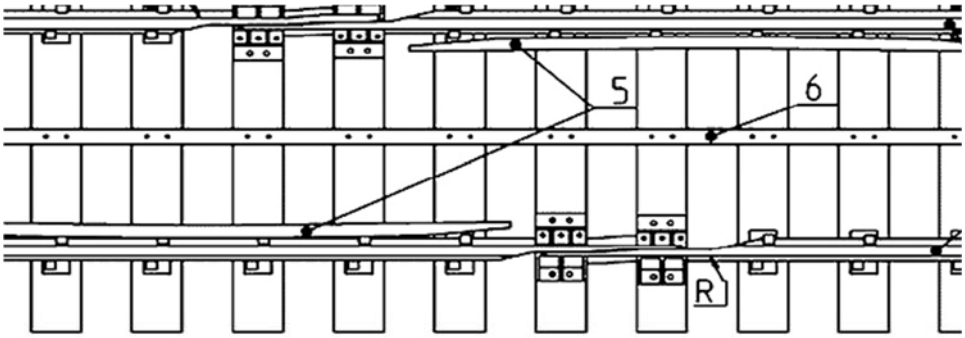


r
in fastening
fastening
rails

5 fixed rails
6 bearer straps
R reference point

รูปที่ 7-23 Adjustment switch – one side moveable

- Adjustment Switch with Check Rails (Both Sides Moveable)

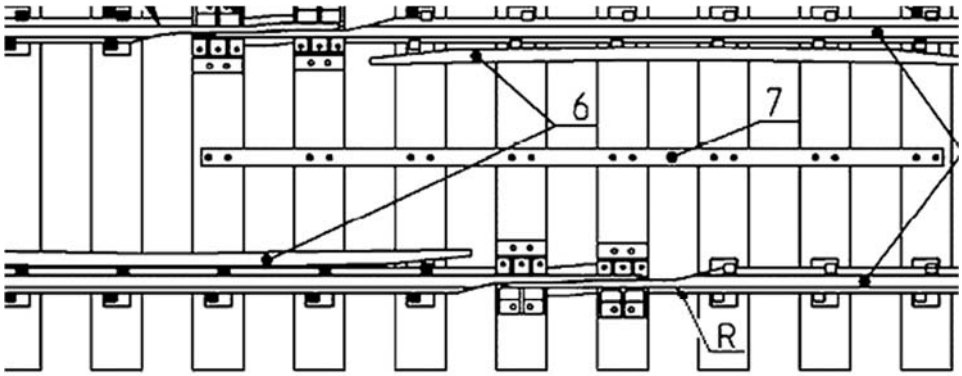


stening
ening
s

5 check rails
6 bearer strap
R reference point

รูปที่ 7-24 Adjustment Switch with Check Rails – Both sides Moveable

- Adjustment switch with check rails (one side moveable)

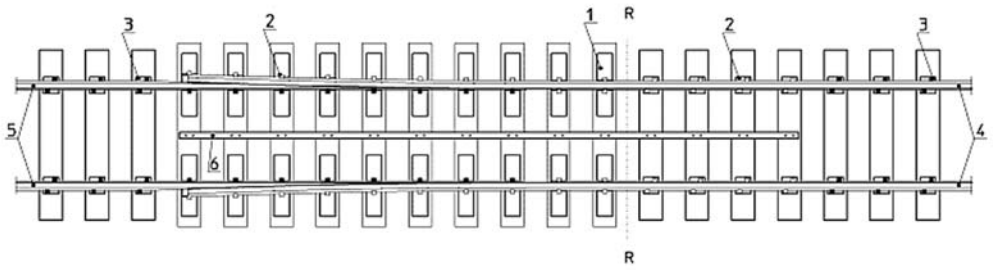


	5	fixed rails
ɛning	6	check rails
ŋg	7	bearer strap

รูปที่ 7-25 Adjustment switch with check rails – one side moveable

Expansion switch

- Expansion Switch with Moveable Stock Rails

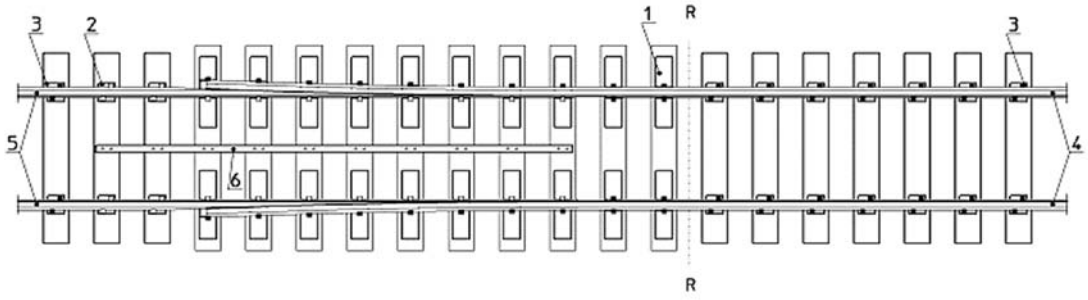


Key

1	slide chair	5	fixed switch rails
2	low restrain fastening	6	bearer strap
3	standard fastening	R	reference point
4	moveable stock rails		

รูปที่ 7-26 Expansion Switch – Moveable Stock Rails

- Expansion switch with moveable switch rails

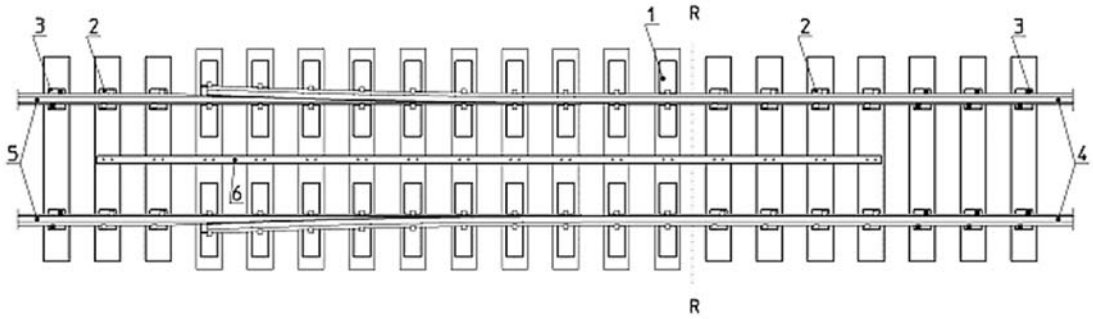


Key

1	slide chair	5	moveable switch rails
2	low restrain fastening	6	bearer strap
3	standard fastening	R	reference point
4	fixed stock rails		

รูปที่ 7-27 Expansion Switch – Moveable Switch Rails

- Expansion switch both sides moveable



Key

1	slide chair	5	moveable switch rails
2	low restrain fastening	6	bearer strap
3	standard fastening	R	reference point
4	moveable stock rails		

รูปที่ 7-28 Expansion switch – both sides moveable



ค่าความคลาดเคลื่อนทางมิติที่ยอมให้และการตรวจสอบ

Adjustment switch (bayonet type)

ตารางที่ 7-7 Rail (fixed and/or movable)

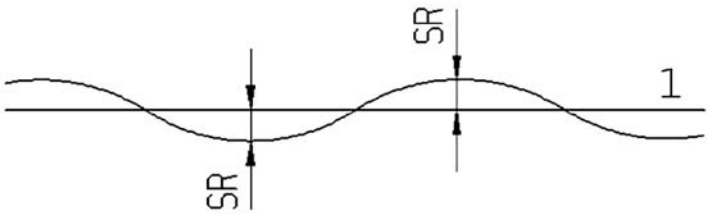
Variable	Description	Tolerance
	ความยาวของราง	± 3 มิลลิเมตร สำหรับความยาวไม่เกิน 24เมตร และ ± 4 มิลลิเมตร สำหรับความยาวมากกว่า 24เมตร
SR	Straightness of the running edge (รูปที่ 7-29,รูปที่ 7-31)	± 1 มิลลิเมตร และ 0.5/1500 (มิลลิเมตร/มิลลิเมตร)
SR	Course of the curve of the running edge (รูปที่ 7-30, รูปที่ 7-31)	± 1 มิลลิเมตร และ 0.5/1500 (มิลลิเมตร/มิลลิเมตร)
IM	Inclination of the machined contact surface (รูปที่ 7-32)	± 0.5 องศา

ตารางที่ 7-8 Half set of adjustment switches

Variable	Description	Tolerance
LS	Construction length (รูปที่ 7-33)	± 6 มิลลิเมตร สำหรับความยาวไม่เกิน 24เมตร และ ± 8 มิลลิเมตร สำหรับความยาวมากกว่า 24เมตร
SR	Straightness of the running edge (รูปที่ 7-29,รูปที่ 7-31)	± 1 มิลลิเมตร และ 0.5/1500 (มิลลิเมตร/มิลลิเมตร)
SR	Course of the curve of the running edge (รูปที่ 7-30, รูปที่ 7-31)	± 1 มิลลิเมตร และ 0.5/1500 (มิลลิเมตร/มิลลิเมตร)
GH	Close gap at rail head in the parallel contact area during inspection (รูปที่ 7-34)	มากสุด 0.25 มิลลิเมตร
GF	Gap at rail foot (รูปที่ 7-34)	มากสุด 0.5 มิลลิเมตร
LC	Lateral clearance at the slide chair (รูปที่ 7-34)	มากว่า 0 แต่ไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

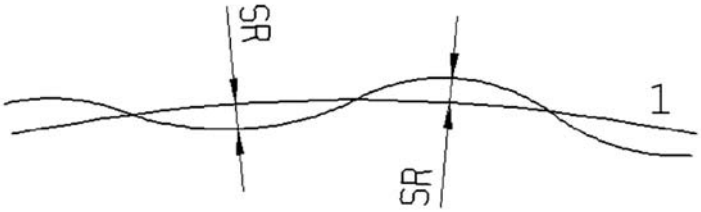
ตารางที่ 7-9 Full set of adjustment switches

Variable	Description	Tolerance
G	Gauge (รูปที่ 7-33)	ค่าที่ยอมให้เป็นค่าที่สอดคล้องกับทางรถไฟในบริเวณเดียวกัน เมื่อไม่มีรอยต่อให้ขยายตัว
CG	Check gauge (รูปที่ 7-33)	สามารถอ้างอิงได้จาก EN 13232-9



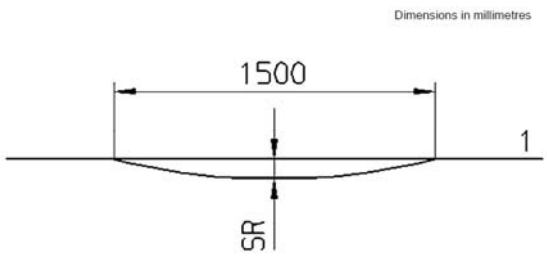
Key
1 theoretical running edge
SR course of the running edge

รูปที่ 7-29 Alignment of running edge (straight)



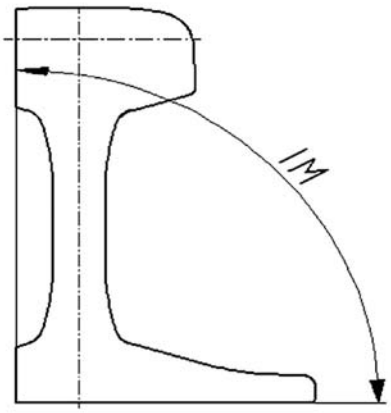
Key
1 theoretical running edge
SR course of the curve

รูปที่ 7-30 Alignment of running edge (curved)



Key
1 theoretical running edge
SR course of the running edge

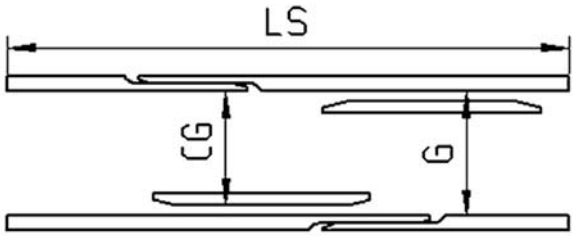
รูปที่ 7-31 Local straightness



Key

IM inclination of the machined contact surface

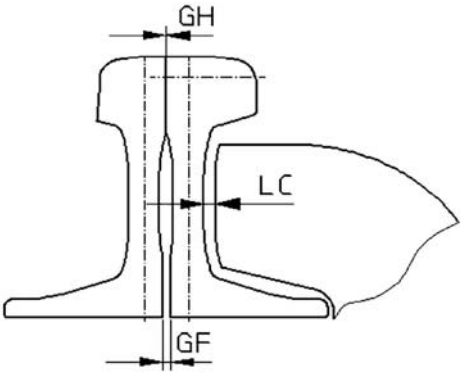
รูปที่ 7-32 Inclination



Key

G gauge
CG check gauge
LS overall constructional length

รูปที่ 7-33 Adjustment switch parameters



Key

GH contact between rail heads
GF contact between rail feet
LC contact between rail and stud

รูปที่ 7-34 Critical dimensions for adjustment switches – rail contact and rail/stud contact



Expansion switch

ตารางที่ 7-10 Stock rail

Variable	Description	Tolerance
LS	Total length of stock tail(รูปที่ 7-35)	± 3มิลลิเมตร สำหรับความยาวไม่เกิน 24เมตร และ ± 4มิลลิเมตร สำหรับความยาวมากกว่า 24เมตร
SR	Straightness of the running edge (รูปที่ 7-29, รูปที่ 7-31)	± 1มิลลิเมตร และ 0.5/1500 (มิลลิเมตร/มิลลิเมตร)
SR	Course of the curve of the running edge(รูปที่ 7-30, รูปที่ 7-31)	± 1มิลลิเมตร และ 0.5/1500 (มิลลิเมตร/มิลลิเมตร)
HM	Height at machined area (รูปที่ 7-36)	± 0.5 (+ tolerance of height of rail)
IM	Inclination of the machined contact surface (รูปที่ 7-36)	± 0.5องศา

ตารางที่ 7-11 Switch rail

Variable	Description	Tolerance
LS	Total length of stock tail(รูปที่ 7-35)	± 3มิลลิเมตร สำหรับความยาวไม่เกิน 24เมตร และ ± 4มิลลิเมตร สำหรับความยาวมากกว่า 24เมตร
SR	Straightness of the running edge (รูปที่ 7-29, รูปที่ 7-31)	± 1มิลลิเมตร และ 0.5/1500 (มิลลิเมตร/มิลลิเมตร)
SR	Course of the curve of the running edge (รูปที่ 7-30, รูปที่ 7-31)	± 1มิลลิเมตร และ 0.5/1500 (มิลลิเมตร/มิลลิเมตร)
HM	Height at machined area (รูปที่ 7-36, รูปที่ 7-37, รูปที่ 7-38)	± 0.5 (+ tolerance of height of rail)
TM	Thickness at machined area (อย่างน้อย 3 จุด ทุก ๆ 1.5 เมตร) (รูปที่ 7-37, รูปที่ 7-38)	± 0.5 มิลลิเมตร
IM	Inclination of the machined contact surface (รูปที่ รูปที่ 7-36, รูปที่ 7-37, รูปที่ 7-38)	± 0.5องศา

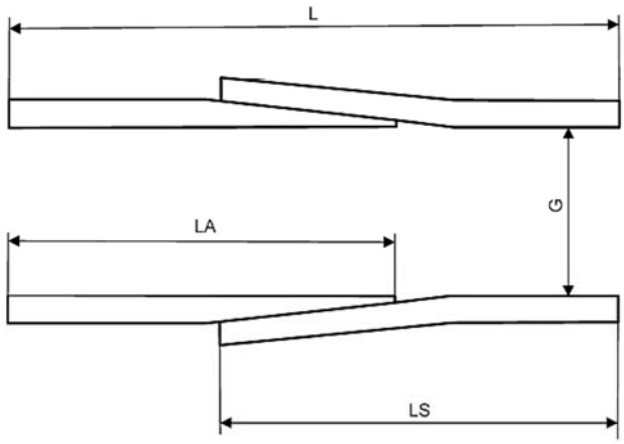


ตารางที่ 7-12 Half set of expansion switches

Variable	Description	Tolerance
L	Construction length (รูปที่ 7-35)	± 6 มิลลิเมตร สำหรับความยาวไม่เกิน 24เมตร และ ± 8 มิลลิเมตร สำหรับความยาวมากกว่า 24เมตร
SR	Straightness of the running edge (รูปที่ 7-29, รูปที่ 7-31)	± 1 มิลลิเมตร และ 0.5/1500 (มิลลิเมตร/มิลลิเมตร)
SR	Course of the curve of the running edge (รูปที่ 7-30, รูปที่ 7-31)	± 1 มิลลิเมตร และ 0.5/1500 (มิลลิเมตร/มิลลิเมตร)
CH	Switch-stock rail contact allowance (รูปที่ 7-39, รูปที่ 7-40)	มากสุด ± 0.5 มิลลิเมตร
LC 1 + LC 2	Lateral clearance at the slide chairs when clamped switch and stock rail modify at (รูปที่ 7-39, รูปที่ 7-40)	+1.5 มิลลิเมตร / +0.5 มิลลิเมตร
CP	Maximum allowance between tongue and slide plate (รูปที่ 7-41)	1 มิลลิเมตร

ตารางที่ 7-13 Full set of expansion switches

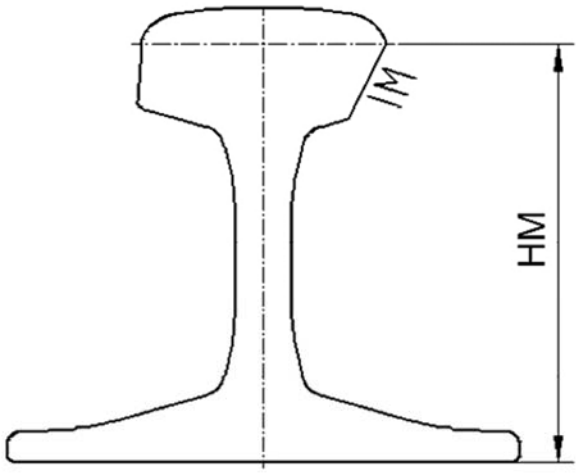
Variable	Description	Tolerance
G	Gauge (รูปที่ 7-35)	ค่าที่ยอมให้เป็นค่าที่สอดคล้องกับทางรถไฟในบริเวณเดียวกัน เมื่อไม่มีรอยต่อให้ขยายตัว



Key

LA switch rail length
LS stock rail length
G gauge
L overall length

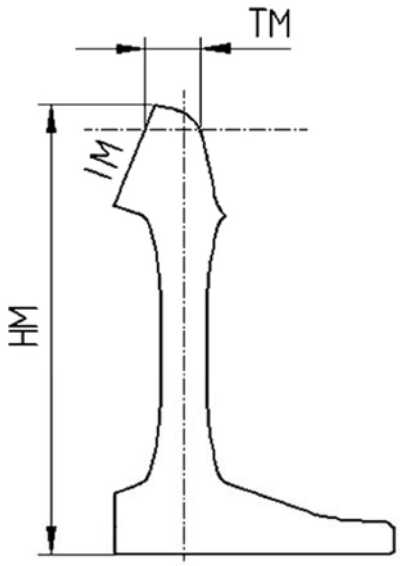
รูปที่ 7-35 Expansion switch parameters



Key

IM inclination of machined area
HR height of machined area

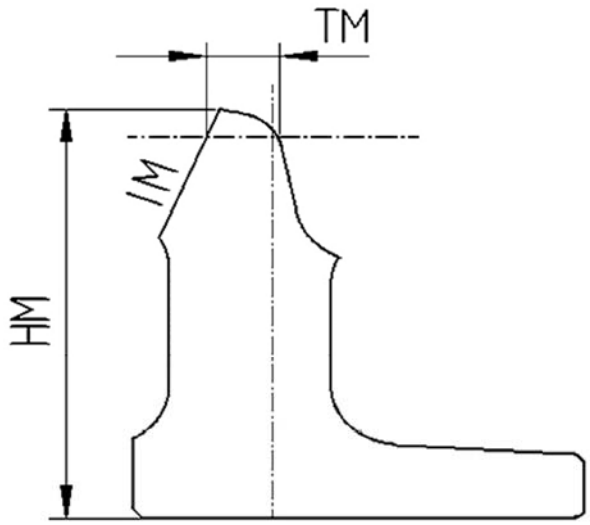
รูปที่ 7-36 Critical dimensions for machined rails



Key

IM inclination of machined area
HM height at machined area
TM thickness at machining reference plane

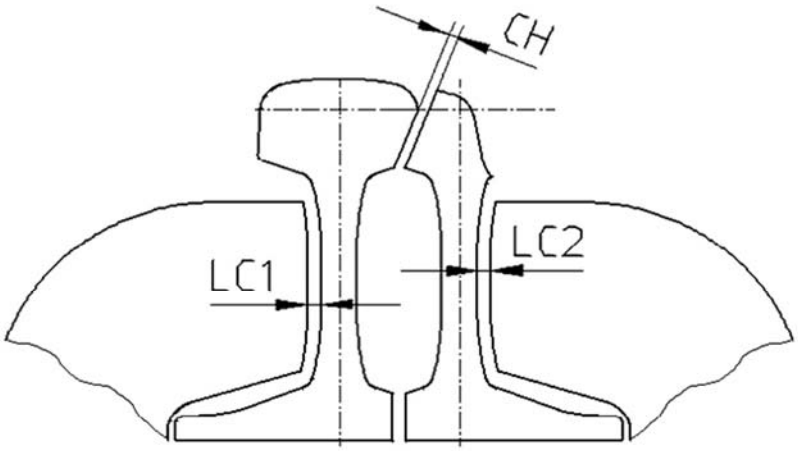
รูปที่ 7-37 Critical dimensions for machined rails – full depth switch rails



Key

IM inclination of machined area
HM height at machined area
TM thickness at machining reference plane

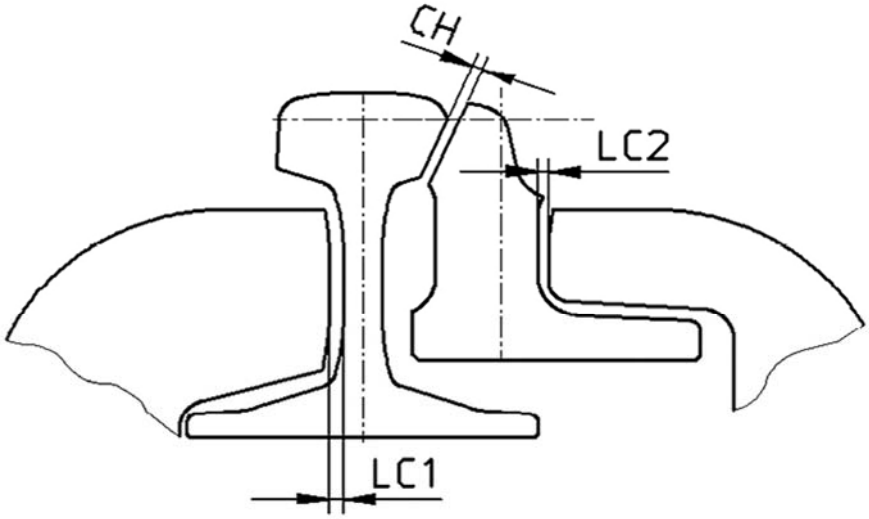
รูปที่ 7-38 Critical dimensions for machined rails – asymmetric switch rails



Key

CH contact switch to stock rail
LC1 contact stock rail to stud
LC2 contact switch rail to stud

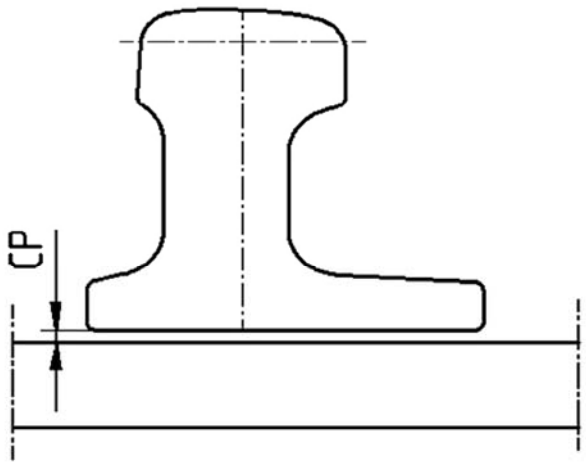
รูปที่ 7-39 Critical dimensions for expansion switches – contact gaps



Key

CH contact switch to stock rail
LC1 contact stock rail to stud
LC2 contact switch rail to stud

รูปที่ 7-40 Critical dimensions for expansion switches – contact gaps



Key
CP flatness/maximum allowance between rail and base plate

รูปที่ 7-41 Critical dimensions for expansion switches – rail and base plate contact

การตรวจสอบความเสียหายของจุดต่อ

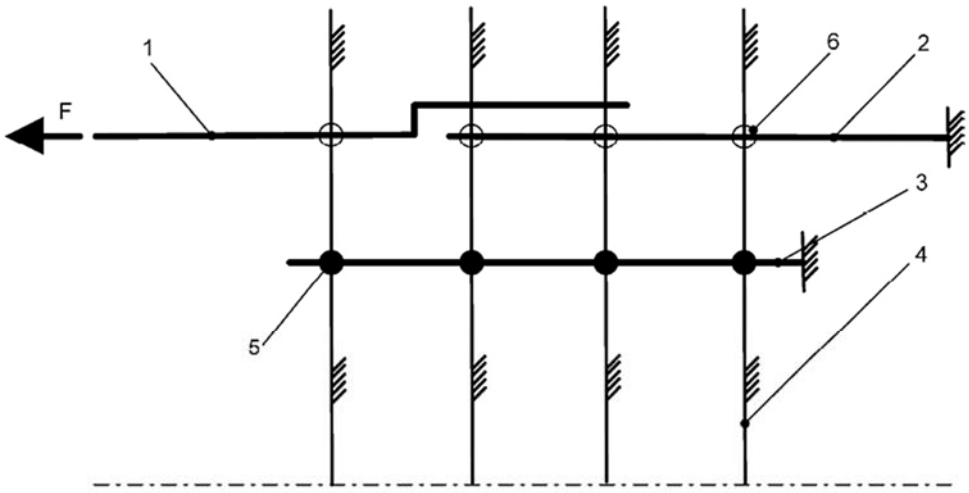
สามารถทำได้ด้วยการตรวจพินิจ (Visual Inspection) หรือ ตรวจสอบโดยใช้สารแทรกซึม (Dye Penetrant Testing)

7.4.2 คุณสมบัติและการทดสอบจุดต่อเผื่อขยาย

การทดสอบความต้านทานตามแนวยาวของจุดต่อ (Longitudinal Resistance Testing)

ในการทดสอบจะทำการติดตั้งจุดต่อให้ขยายตัวเพียงด้านเดียวของราง ดังแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 7-42 จากรูปจะเห็นได้ว่า รางที่ใช้ในการทดสอบจะมี 2 ราง โดยรางหนึ่งจะถูกยึดแน่นที่ส่วนปลายเอาไว้ ในขณะที่รางอีกอันหนึ่งจะถูกดึงด้วยแรง F

แรงดังกล่าวจะกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนรางเริ่มจะขยับ เมื่อรางเคลื่อนตัวต้องพยายามรักษาอัตราการเคลื่อนตัวให้อยู่ในอัตราคงที่ และทำการบันทึกค่าแรงดึงเอาไว้ตลอดเวลา การทดสอบจะสิ้นสุดลงเมื่อช่องว่างของรอยต่อมีขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้หลังจากนั้นทำการทดสอบใหม่อีกครั้งโดยเปลี่ยนทิศทางการกระทำของแรงให้อยู่ในทางตรงกันข้ามบันทึกค่ามากสุดของแรงจากทั้งสองกรณีไว้



Key

1	pulled rail	4	bearer (blocked)
2	blocked rail	5	fix link
3	strap (blocked)	6	low restraint fastening
F	force		

รูปที่ 7-42 แผนภาพการทดสอบ Longitudinal resistance testing

7.5 อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

7.5.1 องค์ประกอบและวัสดุของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางเป็นส่วนประกอบสำคัญของทางรถไฟที่มีหน้าที่ยึดรั้งให้รางอยู่ติดกับหมอนหรือพื้นคอนกรีตอย่างมั่นคง โดยตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางนั้น จะมีแรงต่าง ๆ ที่มากระทำอยู่ตลอดเวลาเช่น แรงจากการยืดหดตัวและการโก่งตัวออกด้านข้าง รวมไปถึงการขยับขึ้นลงแนวดิ่งของราง แรงกระแทกจากล้อรถไฟทั้งในแนวดิ่ง แนวยาวและด้านข้าง ซึ่งแปรผันไปตามความเร็วของรถไฟและสภาพของทางรถไฟ เป็นต้น ปัจจัยดังกล่าวมีผลทำให้การออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ฯจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- สามารถรักษาตำแหน่งของรางไว้ให้อยู่บนหมอนอย่างมั่นคง
- สามารถต้านแรงกระทำกับตัวรางในแนวดิ่ง แนวด้านข้างและแนวยาวได้อย่างปลอดภัย
- สามารถดูดซับแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากล้อรถไฟโดยให้ความยืดหยุ่นกับระบบราง/หมอนรองราง (Elastic Resilience)
- ปกป้องหรือลดการเสียดสีบนราง/หมอนรองราง
- เป็นฉนวนไฟฟ้าสำหรับวงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์อาณัติสัญญาณ
- มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมในพื้นที่ได้
- ติดตั้งได้ง่าย โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อน



- มีการออกแบบที่ป้องกันการขโมยถอดรื้อออกจากทางได้โดยง่าย
- มีส่วนประกอบน้อยชิ้น และง่ายต่อการซ่อมบำรุง
- มีความสามารถในการปรับแต่งตำแหน่งของรางได้หลังจากติดตั้ง

<u>คุณสมบัติที่สำคัญของชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง</u>

- ส่วนประกอบของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางที่ถอดประกอบไม่ได้หรือต้องมีการหล่อเข้ากับชิ้นส่วนอื่น จะต้องได้รับการออกแบบและผลิตเพื่อให้มีอายุการใช้งานขั้นต่ำ 50 ปีภายใต้ปริมาณการจราจรตามสายทางที่ถูกใช้งาน
- ส่วนประกอบของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางที่ถอดประกอบได้หรือไม่มีการหล่อเข้ากับชิ้นส่วนอื่น จะต้องได้รับการออกแบบและผลิตเพื่อให้มีอายุการใช้งานขั้นต่ำ 25 ปีภายใต้ปริมาณการจราจรตามสายทางที่ถูกใช้งาน
- ชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางจะต้องสามารถยึดรางเข้ากับหมอนหรือแผ่นพื้นได้อย่างมั่นคง โดยจะต้องสามารถคงสภาพทางรถไฟให้มีความราบเรียบและความกว้างคงที่รวมไปถึงต้านทานแรงกระทำต่าง ๆที่เกิดขึ้นขณะใช้งานได้ เช่น แรงกระแทกจากล้อ แรงยกตัวจากการสั่นสะเทือนและแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นต้น
- แผ่นรองรางจะต้องถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติในการจัดวางตำแหน่งของตนเองให้อยู่ตำแหน่งที่เหมาะสมบนหมอนได้ (Self-Locating)
- แผ่นรองรางจะต้องถูกออกแบบให้สามารถติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆในชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวได้โดยง่าย
- ความเป็นฉนวนไฟฟ้าของชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวต้องมีความต้านทานไฟฟ้าเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดปัญหาต่อระบบขณะใช้งาน

<u>คุณสมบัติปลีกย่อยของส่วนประกอบในชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง</u>

ส่วนประกอบที่หล่อเข้ากับชิ้นส่วนอื่น (Cast-in Component)

- ต้องออกแบบให้มีอายุการใช้งานไม่น้อยกว่าหมอนหรือแผ่นพื้นทางรถไฟ โดยไม่ต้องมีการซ่อมบำรุง (Maintenance Free)
- ต้องมีคุณสมบัติที่ทนต่อการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมปกติในการใช้งานและจะต้องมีการแสดงรายละเอียดในการป้องกันการกัดกร่อนโดยเฉพาะในส่วนที่มีการสัมผัสกับหินโรยทาง
- ต้องสามารถทนต่อแรงกระทำซ้ำ ๆที่เกิดจากปริมาณการจราจรในสายทางได้โดยไม่เกิดความเสียหายจากการล้า
- คลิป (Clip)



- คลิปจะต้องทำจากเหล็กกล้าสปริงและผลิตตามกระบวนการหล่อ การชุบแข็ง และการดัด เพื่อให้มีประสิทธิภาพตามที่ระบุ

แผ่นรองราง (Rail Pad)

แผ่นรองรางต้องทำจากวัสดุที่มีค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ที่พอเหมาะเพื่อให้มีความสามารถในการซับแรงกระแทกภายใต้แรงกระแทกและในขณะเดียวกันก็ต้องสามารถคงรูปไว้ได้โดยไม่ทำให้รางเคลื่อนที่ได้มากเกิน เช่น วัสดุ HDPE (High Density Polyethylene) ยาง (Rubber) เป็นต้น

แผ่นรองเสริม (Spacers)

- ต้องมีคุณสมบัติทางกลและถูกทดสอบภายใต้สภาวะการใช้งานเช่นเดียวกับแผ่นรองราง
- ต้องถูกออกแบบให้สามารถคงตำแหน่งได้ตลอดอายุการใช้งานหลังจากที่ติดตั้งลงบนทางรถไฟ
- ต้องสามารถทนต่อรังสีอัลตร้าไวโอเลต โอโซนและการกัดกร่อน ตลอดอายุการใช้งาน

ฉนวน (สำหรับใช้กับหมอนคอนกรีต) (Insulation)

ฉนวนจะต้องถูกออกแบบให้ติดตั้งร่วมกับชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางได้โดยง่ายโดยไม่กระทบต่อประสิทธิภาพด้านอื่นของชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

7.5.2 คุณสมบัติและการทดสอบของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

1) การทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางแต่ละชุดจะต้องมีการสุ่มตรวจสอบและรับรองคุณภาพก่อนนำมาใช้งานจริง โดยจากมาตรฐาน มขร-S-T-007ฯ ได้กำหนดให้ต้องมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ตารางที่ 7-14 คุณสมบัติและการทดสอบของชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

การทดสอบ	คุณสมบัติที่ต้องทำการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่าที่ยอมให้	ข้อสังเกต
1	ความต้านทานต่อแรงกระทำแนวยาว (Longitudinal rail restraint)	มอก.2528 [77] หรือ- EN-13146- 1 [68]	ไม่ต่ำกว่า 7 กิโลนิวตัน ณ จุดที่เกิดการเลื่อนไถล	การทดสอบนี้ต้องดำเนินการก่อนการทดสอบแรงกระทำซ้ำ



ตารางที่ 7-14 (ต่อ) คุณสมบัติและการทดสอบของชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

การทดสอบ	คุณสมบัติที่ต้องทำการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่าที่ยอมให้	ข้อสังเกต
2	แรงกดของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง (Clamping force)	มอก.2528 [77] หรือ EN-13146-7 [74]	ไม่ต่ำกว่า 20 กิโลนิวตันต่อชุดรางหนึ่งข้าง	แรงกดที่คลิปหนึ่งตัวต้องมีไม่น้อยกว่า 10 กิโลนิวตัน การทดสอบนี้ต้องดำเนินการก่อนการทดสอบแรงกระทำซ้ำ
3	ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistance)	มอก.2528 [77] หรือ EN-13146-5 [72]	ไม่ต่ำกว่า 5 กิโลโอห์ม	Higher value may be specified if required by Metros for track circuit ในกรณีที่จำเป็น อาจใช้ค่าที่สูงกว่าที่กำหนดนี้
4	แรงกระทำซ้ำ (Effect of repeated Loading)	มอก.2528 [77] หรือ EN-13146-4 [71]	ต้องไม่ปรากฏถึงร่องรอยการสึกหรือการเสียรูป หลังจากที่ทำการทดสอบ	
4A	ความแข็งเกร็งแนวดิ่งหลังจากทดสอบแรงกระทำซ้ำ (Effect of repeated loading On Vertical stiffness)	EN-13146-4 [71]	ต้องมีค่าไม่ต่างไปจากก่อนทำการทดสอบเกิน 25 เปอร์เซ็นต์	ต้องไม่มีร่องรอยการเสียหาย ฉีกขาด หรือการเลื่อนไถล
4B	ความต้านทานต่อแรงกระทำแนวยาวหลังจากทดสอบแรงกระทำซ้ำ (Effect of repeated loading On Longitudinal rail restraint)	มอก.2528 [77] หรือ EN-13146-1 [68]	ต้องมีค่าไม่ต่างไปจากก่อนทำการทดสอบเกิน 20 เปอร์เซ็นต์	ต้องไม่เกิดการเลื่อนไถล การคราก หรือการแตกหักของชิ้นส่วน ยกเว้นรางที่ยอมให้เกิดการเลื่อนไถลได้ โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนตัวในแนวยาวจะต้องถูกบันทึกและรับรองโดยผู้รับผิดชอบ
4C	แรงกดของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง หลังจากทดสอบแรงกระทำซ้ำ (Effect of repeated loading On Clamping force)	มอก.2528 [77] หรือ EN-13146-7 [74]	ต้องมีค่าไม่ต่างไปจากก่อนทำการทดสอบเกิน 20 เปอร์เซ็นต์	



ตารางที่ 7-14 (ต่อ) คุณสมบัติและการทดสอบของชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

การทดสอบ	คุณสมบัติที่ต้องทำการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่าที่ยอมให้	ข้อสังเกต
5	การถอนออกของวัสดุฝังยึด (Insert Pullout)	มอก.2528 [77]	แรงถอนต้องไม่ต่ำกว่า 60 กิโลนิวตันต่อวัสดุฝังยึดหนึ่งตัว	
6	การต้านทานแรงกระทำด้านข้างของวัสดุฝังยึด (Insert lateral resistant)	มอก.2528 [77]	ไม่ต่ำกว่า 70 กิโลนิวตันต่อชุดรางหนึ่งข้าง	
7	การต้านทานต่อการคืบ (Creep resistant)	มอก.2528 [77]	ไม่น้อยกว่า 9 กิโลนิวตัน ณ ตำแหน่งที่เริ่มเกิดการไถล รายงานผลการเคลื่อนตัวของรางภายใต้แรงกระทำแนวยาวที่หัวราง 24.5 กิโลนิวตัน เป็นเวลา 5 นาที	
8	การต้านทานต่อแรงกระทำด้านข้าง(Lateral resistant)	มอก.2528 [77]	รายงานผลการเคลื่อนตัวของรางภายใต้แรงกระทำแนวเอียง 30 องศาจากพื้นระนาบที่หัวราง 90 กิโลนิวตัน	
9	การต้านทานต่อแรงบิด (Torsional resistant)	EN-13146-2[69]	รายงานผลความสัมพันธ์ของแรงบิดและการหมุนรอบตัวของราง	
10	การยกตัวของราง (Rail uplift)	มอก.2528 [77]	รายงานผลของแรงกระทำเพื่อให้รางยกขึ้น 0.25 มิลลิเมตร บนรางหนึ่งด้าน	
11	การตรวจสอบมิติ (Dimensional assessment)	มอก.2528 [77]	<u>ขนาดทาง</u> ตรวจสอบมิติของทางวิ่งหลังจากติดตั้ง	



ตารางที่ 7-14 (ต่อ) คุณสมบัติและการทดสอบของชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

การทดสอบ	คุณสมบัติที่ต้องทำการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่าที่ยอมให้	ข้อสังเกต
			อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวเข้ากับรางแล้ว ขนาดคลิป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคลิปต้องคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.25 เปอร์เซ็นต์ และค่าความกลมต้องไม่เบี่ยงเบนเกิน 0.25 มิลลิเมตร	
12	ความแข็งเกร็งในแนวดิ่ง (Vertical static stiffness of complete fastening system)	EN-13146-4 [71], EN-13146-9 [75]	ไม่เกินกว่า 35 กิโลนิวตันต่อเมตร	ต้องไม่เกิดการเลื่อนไถล การคราก หรือการแตกหักของชิ้นส่วน โดยค่าความแข็งเกร็งในแนวดิ่งจะถูกคำนวณในช่วงแรงกระทำระหว่าง 5 ถึง 80 กิโลนิวตัน
13	ความแข็งเกร็งเชิงพลศาสตร์ (Dynamic/static stiffness ratio)	EN 13481-5, Annex B [75]	ไม่เกินกว่า 1.4	อัตราส่วนสามารถคำนวณได้โดยนำค่าความแข็งเกร็งเชิงพลศาสตร์หารด้วยค่าความแข็งเกร็งเชิงสถิต
14	ความต้านทานต่อการสึกกร่อน (Effect of severe environmental conditions)	EN-13146-6 [76]	ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติในการใช้งานหลังจากการทดสอบ	
15	การซับแรงกระแทก (Impact attenuation)	EN-13146-3 [70]	ค่าการลดแรงกระแทกต้องไม่ต่ำกว่า 30 เปอร์เซ็นต์	
16	การฉีกขาดของแผ่นรองราง (Rail pad tear resistant)	UIC-864-5 [77]		

ตารางที่ 7-14 (ต่อ) คุณสมบัติและการทดสอบของชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

การทดสอบ	คุณสมบัติที่ต้องทำการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่าที่ยอมให้	ข้อสังเกต
17	อุณหภูมิอ่อนตัวของแผ่นรองราง (Rail pad Vicat softening temperature)	UIC-864-5 [77]	มีค่า Melt Flow Index 2 กรัมต่อ 10 นาที คุณสมบัติของวัสดุจะต้องคงที่ตลอดช่วง + 60 และ -10 องศาเซลเซียส	
18	ความหนาแน่นของแผ่นรองราง (Rail pad density)	UIC-864-5 [77]	ไม่น้อยกว่า 0.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	

<u>วิธีการทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง</u>

ความต้านทานต่อแรงกระทำแนวยาว

เครื่องมือ

- เครื่องมือทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 7-43
- เครื่องวัดชนิดหน้าปัดจำนวน 2 ตัว ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.025 mm

การเตรียมตัวอย่าง

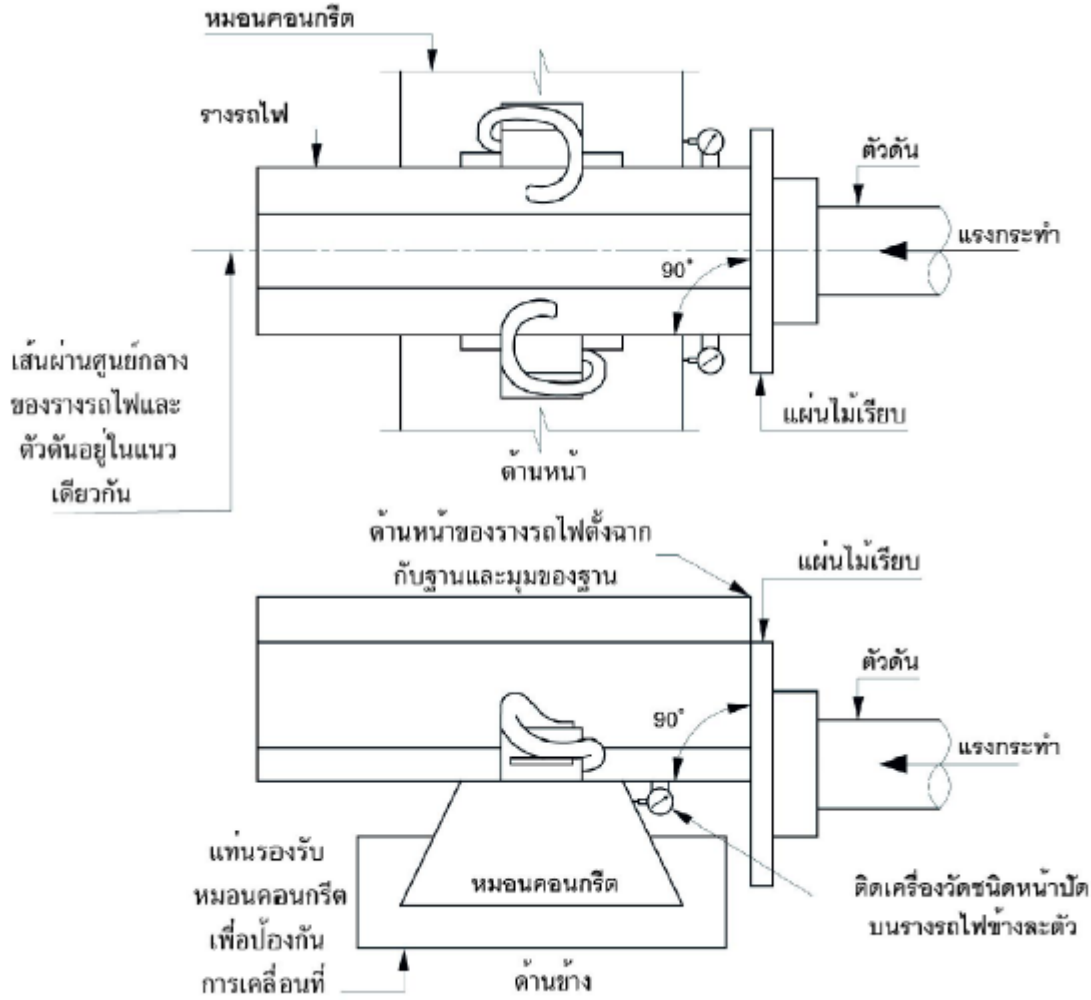
- ประกอบตัวอย่างหมอนคอนกรีต 1 ท่อนเข้ากับรางรถไฟ 1 รางที่มีความยาวรางมากกว่าความกว้างของหมอนคอนกรีต ด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวรางครบชุด ตามลักษณะการประกอบจริง
- ติดตั้งเครื่องมือทดสอบเข้ากับรางรถไฟ ตามรูปที่ 7-43

วิธีทดสอบ

- ให้แรงดันกระทำเริ่มต้นที่ 2 kNแล้วเพิ่มแรงดันจนถึง 10 kNแล้วคงไว้เป็นเวลา ไม่น้อยกว่า 15 min

การรายงานผล

ให้รายงานระยะการเคลื่อนที่ของราง ระหว่าง 3 minแรกที่เริ่มทดสอบ และรายงานอีกครั้งในช่วงหลังจากทดสอบไปแล้ว 3 min ตามข้อตกลงของผู้ที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 7-43 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระทำแนวยาว[77]

แรงกดของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

เครื่องมือ

- เครื่องทดสอบแรงกดเครื่องยึดเหนี่ยว (fastener) ที่ฐานทาง
- ฟีเลอร์เกจที่มีความหนา 0.1 มิลลิเมตร

การเตรียมตัวอย่าง

- ประกอบตัวอย่างหมอนคอนกรีต 1 ท่อนเข้ากับรางรถไฟ 2 รางที่มีความยาวราง มากกว่าความกว้างหมอนคอนกรีต ด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวรางครบชุด ตามลักษณะการประกอบจริง
- ติดตั้งเครื่องทดสอบ ที่ตำแหน่งเครื่องยึดเหนี่ยวกดราง



วิธีทดสอบ

- ให้แรงดึงที่เครื่องยึดเหนี่ยวราง โดยเพิ่มแรงดึงจนกระทั่งสามารถสอดฟีเลอร์เกจเข้าไปได้ที่บริเวณเครื่องยึดเหนี่ยวกดราง
- บันทึกค่าแรงดึงที่ได้ แล้วคลายแรงออก
- ทดสอบดึงเครื่องยึดเหนี่ยวรางกับตำแหน่งที่เหลือ

การรายงานผล

– ค่าแรงกดเครื่องยึดเหนี่ยวที่ฐานราง ให้รายงานค่าเฉลี่ยของผลรวมค่าแรงกดเครื่องยึดเหนี่ยวเฉลี่ยของแต่ละราง

ความต้านทานไฟฟ้า

เครื่องมือ

- อุปกรณ์ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 V หรือกระแสสลับ 12 V
- เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือกระแสสลับ

การเตรียมตัวอย่าง

- ประกอบตัวอย่างหมอนคอนกรีต จำนวน 2 ท่อนที่มีระยะเรียงหมอนคอนกรีต 600 mm เข้ากับรางรถไฟ 2 รางที่มีความยาวราง 1 500 mm ด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวรางครบชุดตามลักษณะการประกอบจริงและต้องอัดหินโรยทางรอบบริเวณชุดตัวอย่างนี้ โดยให้มีช่องว่างใต้รางรถไฟอย่างน้อย 20 mm

วิธีทดสอบ

- พ่นน้ำรอบบริเวณนี้ในลักษณะเหมือนฝนตก ในอัตรา 150 mm/h เป็นเวลา 4 h
- พื้นผิวสัมผัสรางบริเวณที่จะติดตั้งอุปกรณ์ให้กระแสไฟฟ้า ถ้ามีสนิม สิ่งสกปรก ให้ทำความสะอาดก่อนช่วง 15 minสุดท้าย
- ติดตั้งอุปกรณ์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือกระแสสลับผ่านเข้ารางรถไฟ
- ปล่อยกระแสไฟฟ้าแรงดัน 12 V เข้ารางรถไฟ ในช่วงเวลา 15 minสุดท้ายก่อนจะครบเวลาพ่นน้ำ 4 h
- บันทึกค่ากระแสไฟฟ้า หน่วยเป็นแอมแปร์

การรายงานผล

- ให้รายงานค่าความต้านทานไฟฟ้า หน่วยเป็นโอห์ม โดยการคำนวณจากค่าแรงดันไฟฟ้าหารด้วยค่ากระแสไฟฟ้า



การยกตัวของราง

เครื่องมือ

- เครื่องทดสอบ ตามรูปที่ 7-44
- ฟีเลอร์เกจ ที่มีความหนา 0.25 mm 2 ชิ้น

การเตรียมตัวอย่าง

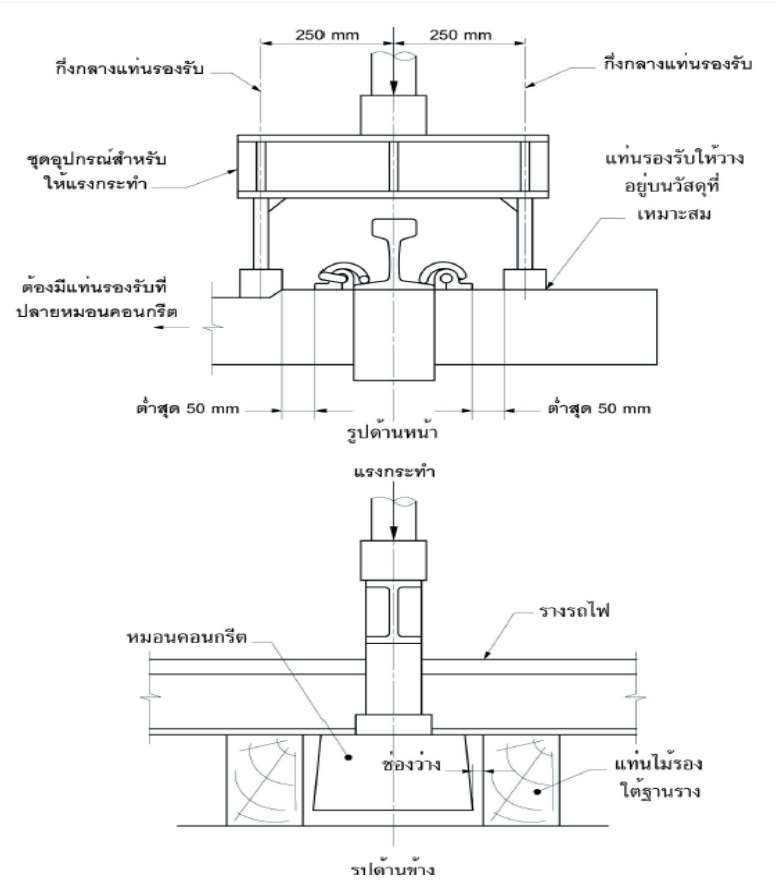
- ประกอบตัวอย่างหมอนคอนกรีต 1 ท่อนเข้ากับรางรถไฟ 1 ราง ที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 450 mm ด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวรางครบชุด ตามลักษณะการประกอบจริง โดยมีฟีเลอร์เกจวางไว้ใต้รางทั้ง 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกัน
- ติดตั้งเครื่องทดสอบ ตามตัวอย่างรูปที่ 7-44

วิธีทดสอบ

- ให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบตามตัวอย่างรูปที่ 7-44 โดยค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักบรรทุกทดสอบจนกระทั่งรางแยกออกจากหมอนคอนกรีตบริเวณที่รองรับราง และสามารถดึงฟีเลอร์เกจออกได้อย่างอิสระจากใต้รางทั้ง 2ด้าน บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกทดสอบที่สามารถดึงฟีเลอร์เกจแต่ละชิ้นออกได้ แล้วคลายแรงออก
- หาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกทดสอบที่สามารถดึงฟีเลอร์เกจได้แต่ละชิ้น
- บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกทดสอบ P-5 ซึ่งคำนวณได้จากผลรวมของค่าน้ำหนักบรรทุกทดสอบเฉลี่ยกับน้ำหนักบรรทุกที่เกิดจากมวลของหมอนคอนกรีต (ที่ไม่รวมแท่นธาร) และอุปกรณ์ให้แรง
- ทดสอบต่อโดยให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบ 1.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกทดสอบ P-5 แต่ต้องไม่มากกว่า 50kNแล้วคลายแรงออก

การรายงานผล

- ให้รายงานความเสียหายของวัสดุฝังยึด
- ให้รายงานความเสียหายของเครื่องยึดเหนี่ยวราง
- ให้รายงานสภาพการยึดเหนี่ยวของราง



รูปที่ 7-44 การทดสอบการยกตัวของราง [10]

แรงกระทำซ้ำ

เครื่องมือ

- เครื่องทดสอบความต้านการล้าของเครื่องยึดเหนี่ยวราง ที่ให้แรงกระทำลง หน่วยเป็นกิโลนิวตัน ที่เป็นไปตาม ข้อตกลงระหว่างผู้ที่เกี่ยวข้อง และแรงกระทำขึ้นเป็น 0.6 เท่าของค่าแรงกระทำ P-5 ตามข้อ 12.3.2 (ด้วยการติดสปริง 2 ตัวที่ใต้รางรถไฟ เพื่อให้เกิดแรง 0.3 P5 ที่แต่ละข้าง) ด้วยอัตรา 300 รอบต่อนาที

การเตรียมตัวอย่าง

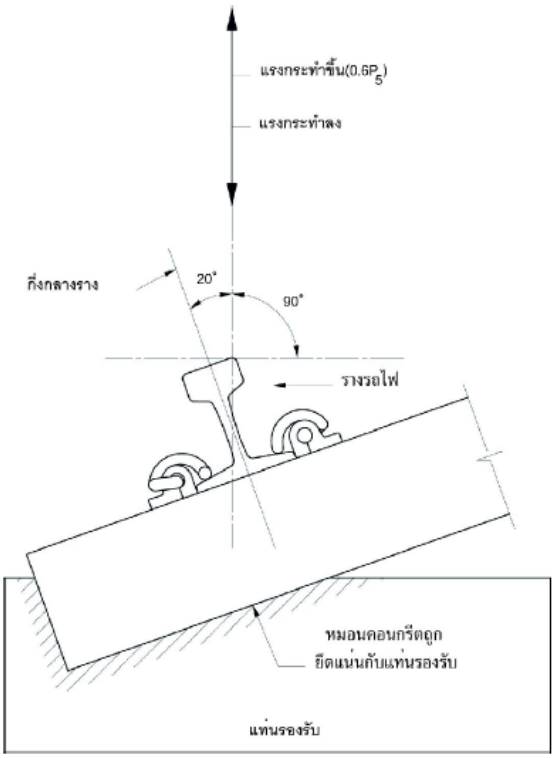
- หลังจากทดสอบการยกตัวของราง แล้วติดตั้งหมอนคอนกรีตพร้อมเครื่องยึดเหนี่ยวรางครบชุดตามลักษณะการประกอบจริง บนแท่นรองรับที่มั่นคงและไม่มีการขยับตัว ตามรูปที่ 7-45
- ติดตั้งเครื่องทดสอบแรงกระทำที่หัวรางให้ทำมุม 20 องศา กับแนวดิ่งตามตัวอย่างรูปที่ 7-45

วิธีทดสอบ

- ให้แรงกระทำตามรูปที่ 7-45 จำนวน 3,000,000 รอบ แล้วตรวจพินิจเนื้อคอนกรีตและเครื่องยึดเหนี่ยวราง

การรายงานผล

- ให้รายงานความเสียหายของเนื้อคอนกรีต และเครื่องยึดเหนี่ยวราง



รูปที่ 7-45 การทดสอบรงกระทำซ้ำของเครื่องยึดเหนี่ยวราง

การถอนออกของวัสดุฝังยึด

เครื่องมือ

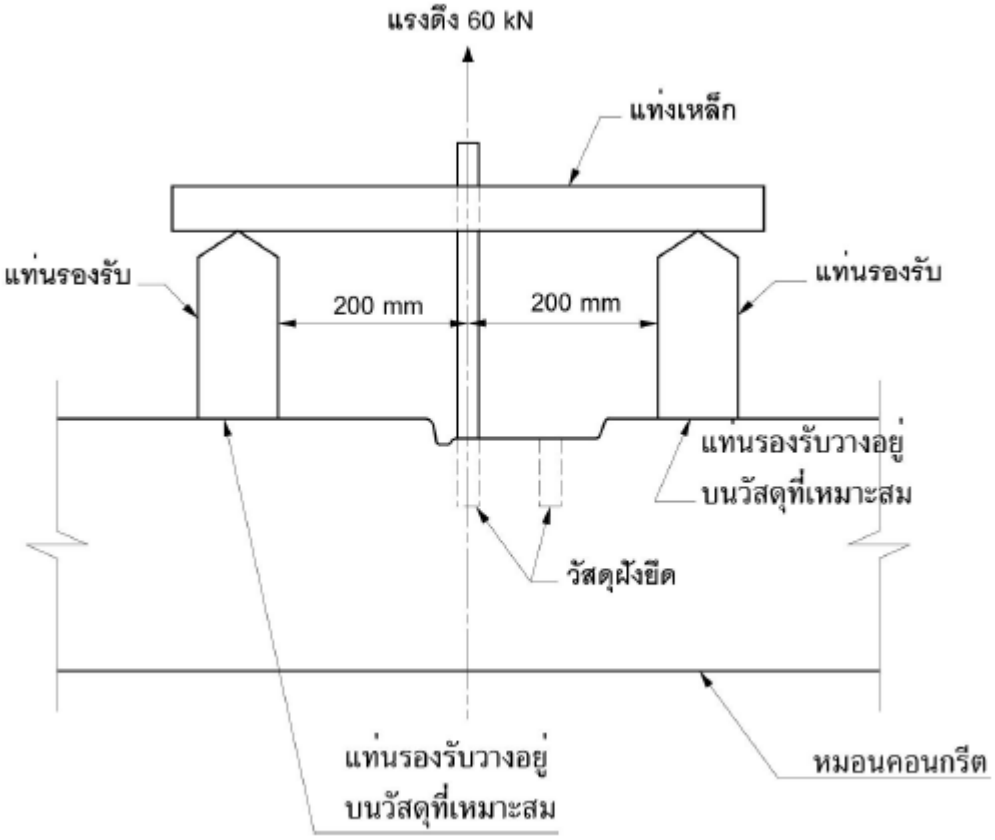
- เครื่องทดสอบ ตามตัวอย่างรูปที่ 7-46
- เครื่องวัดชนิดหน้าปัดที่อ่านได้ละเอียด 0.05 mm

วิธีทดสอบ

- ติดตั้งเครื่องทดสอบ ตามรูปที่ 7-46
- ตั้งเครื่องวัดชนิดหน้าปัดที่ตำแหน่งเหมาะสม ให้รายงานการเคลื่อนที่ของวัสดุฝังยึด
- เพิ่มแรงดึงวัสดุฝังยึด จนถึง 60kNแล้วคงแรงดึงไว้ เป็นเวลา 3 min แล้ว คลายแรงออก
- ทดสอบซ้ำตามข้อ 10.2.3 อีก 4 ครั้ง รวมเป็น 5 ครั้ง

การรายงานผล

- ให้รายงานการเคลื่อนที่ของตำแหน่งวัสดุฝังยึด ความเสียหายของวัสดุฝังยึด และการเสียหายของเนื้อคอนกรีตโดยรอบ



รูปที่ 7-46 การทดสอบการถอนออกของวัสดุฝังยึด

ความต้านแรงกระทำด้านข้างวัสดุฝังยึด (สำหรับวัสดุฝังยึดที่มีลักษณะเป็นเกลียว)

เครื่องมือ

เครื่องมือทดสอบที่ให้แรงด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 7-47

การเตรียมตัวอย่าง

- ประกอบชุดวัสดุฝังยึดตามลักษณะการประกอบจริง
- ติดตั้งเครื่องมือทดสอบให้แรงด้านข้างกระทำที่ชุดประกอบสลักเกลียว ตามรูปที่ 7-47

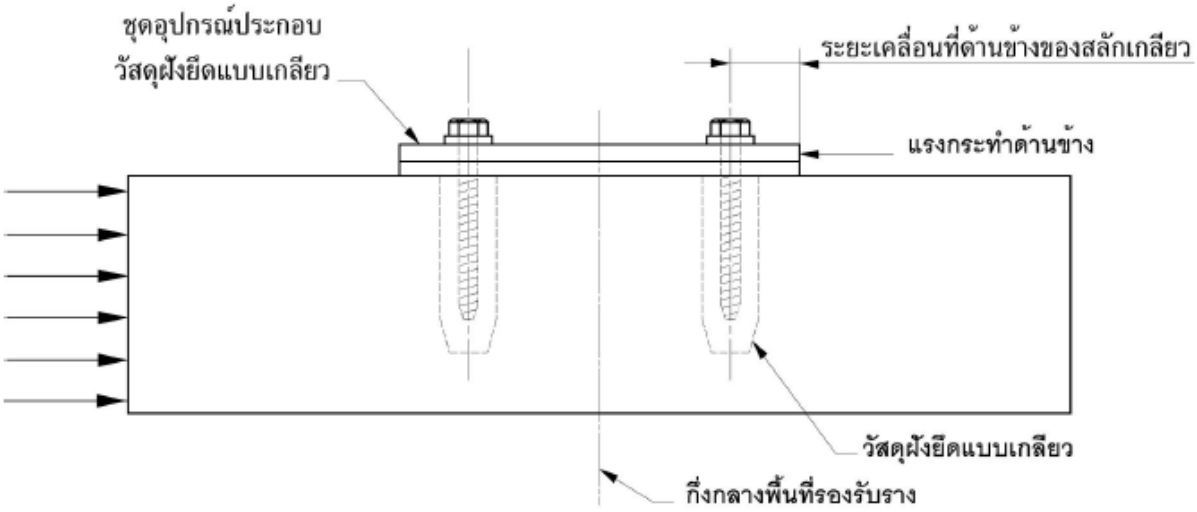
วิธีทดสอบ

- ให้แรงกระทำด้านข้าง 70 kN เป็นเวลา 5 min

- บันทึกระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของสลักเกลียวแต่ละตัว ตามแนวแรงกระทำ
- คลายแรงออก และสังเกตการกลับคืนของสลักเกลียวแต่ละตัว
- บันทึกระยะเคลื่อนที่ถาวรของสลักเกลียวแต่ละตัว
- ทดสอบซ้ำตามข้อ 1 ถึง ข้อ 4 อีก 5 รอบ
- ให้แรงกระทำซ้ำที่ตำแหน่งเดิมด้วยอัตราไม่เกิน 600 รอบต่อนาที โดยที่แรงกระทำแต่ละรอบให้เพิ่มโดยสม่ำเสมอ จาก 5kNถึง 50kNจนครบ 3 000 000 รอบ
- บันทึกระยะเคลื่อนที่ถาวรของสลักเกลียวแต่ละตัว

การรายงานผล

- รายงานระยะเคลื่อนที่สูงสุดของสลักเกลียว ในขณะที่มีแรงกระทำ 70kNกระทำอยู่
- รายงานระยะเคลื่อนที่ถาวรสูงสุดของสลักเกลียว ในขณะที่คลายแรงกระทำ 70kN
- รายงานระยะเคลื่อนที่ถาวรของสลักเกลียวแต่ละตัวเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ



รูปที่ 7-47 การทดสอบความต้านแรงด้านข้างวัสดุฝังยึด

ความต้านทานต่อการคืบ

เครื่องมือ

– แม่แรงดันราง
– เครื่องวัดชนิดหน้าปัดจำนวน 3 ตัว ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.05 mm



การเตรียมตัวอย่าง

- ประกอบตัวอย่างหมอนคอนกรีต 2 ท่อนที่มีระยะเรียงหมอนคอนกรีต 600 mm เข้ากับรางรถไฟ 2 รางที่มีความยาว 2 000 mm ด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวรางครบชุดตามลักษณะการประกอบจริง และติดตั้งบนแท่นธารที่มั่นคงไม่มีการขยับตัว
- ที่หัวรางด้านหนึ่งติดตั้งแม่แรงโดยให้แรงกระทำส่งผ่านเข้ารางรถไฟทั้ง 2 รางได้ และที่ปลายรางอีกด้านหนึ่ง ให้ติดเครื่องวัดชนิดหน้าปัดรางละ 1 ตัว สำหรับอ่านค่าระยะการเคลื่อนที่ของราง
- ติดเครื่องวัดชนิดหน้าปัด1 ตัว ที่กึ่งกลางด้านข้างของหมอนคอนกรีต สำหรับอ่านค่าระยะการเคลื่อนที่ของหมอนคอนกรีต

วิธีทดสอบ

- ให้แม่แรงดันหัวราง ด้วยแรงกระทำ 24.5kNเป็นเวลา 15 min
- อ่านค่าจากเครื่องวัดชนิดหน้าปัดทั้ง 3 ตัว เมื่อครบเวลา 3 min และครบเวลา 15 min ระยะการเคลื่อนที่ของราง คือผลต่างค่าเฉลี่ยของระยะการเคลื่อนที่ของทั้ง 2 ราง กับค่าระยะการเคลื่อนที่ของหมอนคอนกรีต

การรายงานผล

- ให้รายงานระยะการเคลื่อนที่ของราง ที่เวลา 3 min และที่เวลา 15 min

การต้านทานต่อแรงกระทำด้านข้าง

เครื่องมือ

- เครื่องมือทดสอบ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 7-48
- เครื่องวัดชนิดหน้าปัดจำนวน 2 ตัว ที่สามารถอ่านได้ละเอียด 0.1 mm

การเตรียมตัวอย่าง

- ประกอบตัวอย่างหมอนคอนกรีต 1 ท่อนเข้ากับรางรถไฟ 1 รางที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 450 mm ด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวรางครบชุดตามลักษณะการประกอบจริง
- ติดตั้งตัวอย่างเข้ากับเครื่องมือทดสอบ ตามรูปที่ 7-48
- ติดเครื่องวัดชนิดหน้าปัดA ที่ฐานราง และเครื่องวัดชนิดหน้าปัดB ที่หัวราง

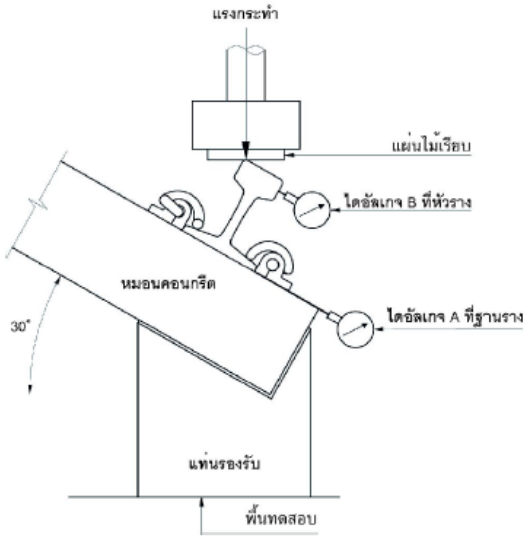
วิธีทดสอบ

- ให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบเริ่มต้น 90 kN กระทำที่ราง

- คลายน้ำหนักบรรทุกทดสอบเริ่มต้นออก แล้วปรับเครื่องวัดชนิดหน้าปัดA ให้อ่านที่ศูนย์
- ให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบหน่วยเป็นกิโลนิวตัน ที่เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ที่เกี่ยวข้อง หรือฐานรางเคลื่อนที่ไป 3 mm แล้วแต่ว่าสิ่งใดจะปรากฏขึ้นก่อน
- บันทึกน้ำหนักบรรทุกทดสอบ และค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดชนิดหน้าปัดA แล้วคลายแรงออก
- หลังจากคลายน้ำหนักบรรทุกทดสอบออกแล้ว ปรับเครื่องวัดชนิดหน้าปัดB ให้อ่านที่ศูนย์
- ให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบในอัตรา 20kN/min จนได้น้ำหนักบรรทุกทดสอบ 90kN
- บันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดชนิดหน้าปัดB

การรายงานผล

- ให้รายงานระยะที่ฐานรางเคลื่อนที่ไป จากผลต่างของค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดชนิดหน้าปัดA และเครื่องวัดชนิดหน้าปัดB



รูปที่ 7-48 การทดสอบการต้านทานต่อแรงกระทำด้านข้าง

<u>การตรวจสอบมิติ</u>

ขนาดทาง

เครื่องมือ

- เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 mm



วิธีทดสอบ

- ประกอบตัวอย่างหมอนคอนกรีต จำนวน 6 ท่อนที่มีระยะหมอนคอนกรีต 600 mm เข้ากับรางรถไฟ 2 ราง ด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวรางครบชุด ตามลักษณะการประกอบจริง
- วัดขนาดทางที่ระยะห่างภายในของขอบรางที่ระยะต่ำกว่าระดับสันราง 14 mm จำนวน 3 ตำแหน่ง

การรายงานผล

- ให้รายงานผลค่าขนาดทางทุกค่า

ขนาดคลิป

เครื่องมือ

- เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.05 mm

วิธีทดสอบ

- วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมของคลิป บริเวณหัว กลาง ท้าย ของความยาว

การรายงานผล

- ให้รายงานผลค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมของคลิปทุกค่า

7.6 การออกแบบหมอนคอนกรีตรองรางรถไฟ

<u>การออกแบบหมอนคอนกรีต</u>

ชนิดและรูปแบบของหมอนคอนกรีต

หมอนคอนกรีตในที่นี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตาม มขร S-T-007-256X มาตรฐานองค์ประกอบทางรถไฟ คือ หมอนคอนกรีตสำหรับทางรถไฟชนิดหินโรยทาง และหมอนคอนกรีตสำหรับทางรถไฟชนิดไม่มีหินโรยทาง

หมอนคอนกรีตสำหรับทางรถไฟชนิดหินโรยทางในที่นี้มี 3 รูปแบบ คือ

[1] หมอนคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete Sleeper) ซึ่งเป็นแท่งคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว (Monoblock) หรืออาจจะเรียกว่า หมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว (Prestressed Monoblock Sleeper)

[2] หมอนคอนกรีตแท่งคู่ (Twin-Block Concrete Sleeper) ซึ่งเป็นแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กสองแท่งต่อกันด้วยแท่งเหล็กต่อหมอน (Steel Connection Bar) จึงอาจจะเรียกว่า หมอนคอนกรีตเสริมเหล็กแท่งคู่ (Twin-block Reinforced Sleeper)



[3] หมอนรองประแจคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Bearer) ซึ่งเป็นแท่งคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว (Monoblock) สำหรับรองประแจ

หมอนคอนกรีตสำหรับทางรถไฟชนิดไม่มีหินโรยทางในที่นี้มี 2 รูปแบบ คือ

[1] หมอนรองรางแบบฝังในชั้นที่รองรับ (Sleeper Embedded in Supporting Layer) เช่น หมอนคอนกรีตแท่งคู่ฝังในพื้นคอนกรีต (Twin-Block Concrete Sleeper Embedded in Concrete) เป็นต้น

[2] หมอนรองรางแบบวางบนชั้นที่รองรับ (Sleeper on Top of Supporting Layer) เช่น หมอนคอนกรีตอัดแรงวางบนพื้นแอสฟัลท์คอนกรีต (Prestressed Concrete Sleeper on Top of Asphalt Concrete) เป็นต้น

การออกแบบหมอนคอนกรีต

การออกแบบหมอนคอนกรีตออกแบบตามเกณฑ์ที่กำหนดใน มขร S-T-007-256X มาตรฐานองค์ประกอบทางรถไฟ

ในคู่มือนี้ให้แนวทางการออกแบบหมอนคอนกรีตโดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎี (Theoretical Method) ในการคำนวณน้ำหนักลงพื้นที่รองรับรางออกแบบ (Design Rail Seat Load, P_d) การคำนวณโมเมนต์ดัดออกแบบ (Design Bending Moment, M_d) ที่พื้นที่รองรับรางและที่กึ่งกลางหมอน ขั้นตอนการออกแบบ และตัวอย่างการออกแบบ

[1] การออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรง

- การคำนวณน้ำหนักลงพื้นที่รองรับรางออกแบบ

  การคำนวณน้ำหนักลงพื้นที่รองรับรางออกแบบ (Design Rail Seat Load, Pd) ในคู่มือนี้ให้น้ำหนักลงพื้นที่รองรับรางออกแบบเป็นผลคูณของน้ำหนักลงเพลา (Axle Load, A) กับค่าปัจจัยน้ำหนักบรรทุกพลวัต (Impact Factor, I) และกับค่าปัจจัยการกระจายน้ำหนักบรรทุก (Load Distribution Factor, D) ตามสมการที่ 7-4

$$P_d = \frac{DIA}{2} \qquad \text{สมการที่ 7-4}$$

  ค่าปัจจัยน้ำหนักบรรทุกพลวัตให้ขึ้นกับความเร็วออกแบบสูงสุด (Maximum Design Speed, V) ของรถไฟในหน่วยกิโลเมตรต่อชั่วโมง และคำนวณได้ตามสมการที่ 7-5 แต่ค่าต้องไม่ต่ำกว่า 2.5



$$I = 1 + V/100 \geq 2.5$$ สมการที่ 7-5

ค่าปัจจัยการกระจายน้ำหนักบรรทุกให้ขึ้นกับคุณสมบัติของรางและระยะเรียงหมอนรองราง และคำนวณได้ตามสมการที่ 7-6 เมื่อรางต้องเป็นรางที่มีน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 47 กิโลกรัมต่อเมตร และระยะเรียงหมอนรองราง (Sleeper Spacing, S) ในหน่วยมิลลิเมตรมีค่าระหว่าง 500 – 750 มิลลิเมตร

$$D = 0.0006S + 0.15$$ สมการที่ 7-6

- การคำนวณโมเมนต์ดัดออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรง

ด้วยแบบจำลองอย่างง่าย (Simplified Design Model) และสมมุติให้การกระจายแรงและค่าสติฟเนสเฉลี่ยของที่รองรับใต้หมอนมีค่าคงที่ โมเมนต์ดัดออกแบบสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

สำหรับหมอนรองรางชนิดหินโรยทางที่มีความยาว L โมเมนต์ดัดออกแบบบวกที่พื้นที่รองรับราง (Rail Seat Positive Design Bending Moment, M_{dR+}) และโมเมนต์ดัดออกแบบลบที่พื้นที่รองรับราง (Rail Seat Negative Design Bending Moment, M_{dR-}) คำนวณได้จากสมการดังแสดงในตารางที่ 7-15 โมเมนต์ดัดออกแบบบวกที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (Center Positive Design Bending Moment, M_{dC+}) และโมเมนต์ดัดออกแบบลบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (Center Negative Design Bending Moment, M_{dC-}) คำนวณได้จากสมการดังแสดงในตารางที่ 7-16 แม้หมอนรองรางสำหรับทางรถไฟชนิดไม่มีหินโรยทางซึ่งรองรับด้วยชั้นวัสดุอื่นที่มีค่าสติฟเนสมากกว่าหินโรยทางจะเกิดโมเมนต์ดัดน้อยกว่า ถ้าไม่มีรายการคำนวณยืนยันก็ให้ใช้ค่าตามที่ระบุ



ตารางที่ 7-15 โมเมนต์ดัดออกแบบที่พื้นที่รองรับราง

ระยะห่างระหว่างราง (g)	g > 1.5 เมตร (ขนาดทางมาตรฐานหรือกว้าง)	1.5 เมตร > g > 1.0 เมตร (ขนาดทางแคบ)
โมเมนต์ดัดออกแบบบวก (กิโลนิวตันเมตร)	$M_{dR+} = \frac{P_d(L-g)}{8}$	$M_{dR+} = \frac{P_d(L-g)}{6.4}$
โมเมนต์ดัดออกแบบลบ (กิโลนิวตันเมตร)	$M_{dR-} = 0.67M_{dR+} \geq 14$	

หมายเหตุ P_d หน่วยเป็นกิโลนิวตัน; L และ g หน่วยเป็นเมตร

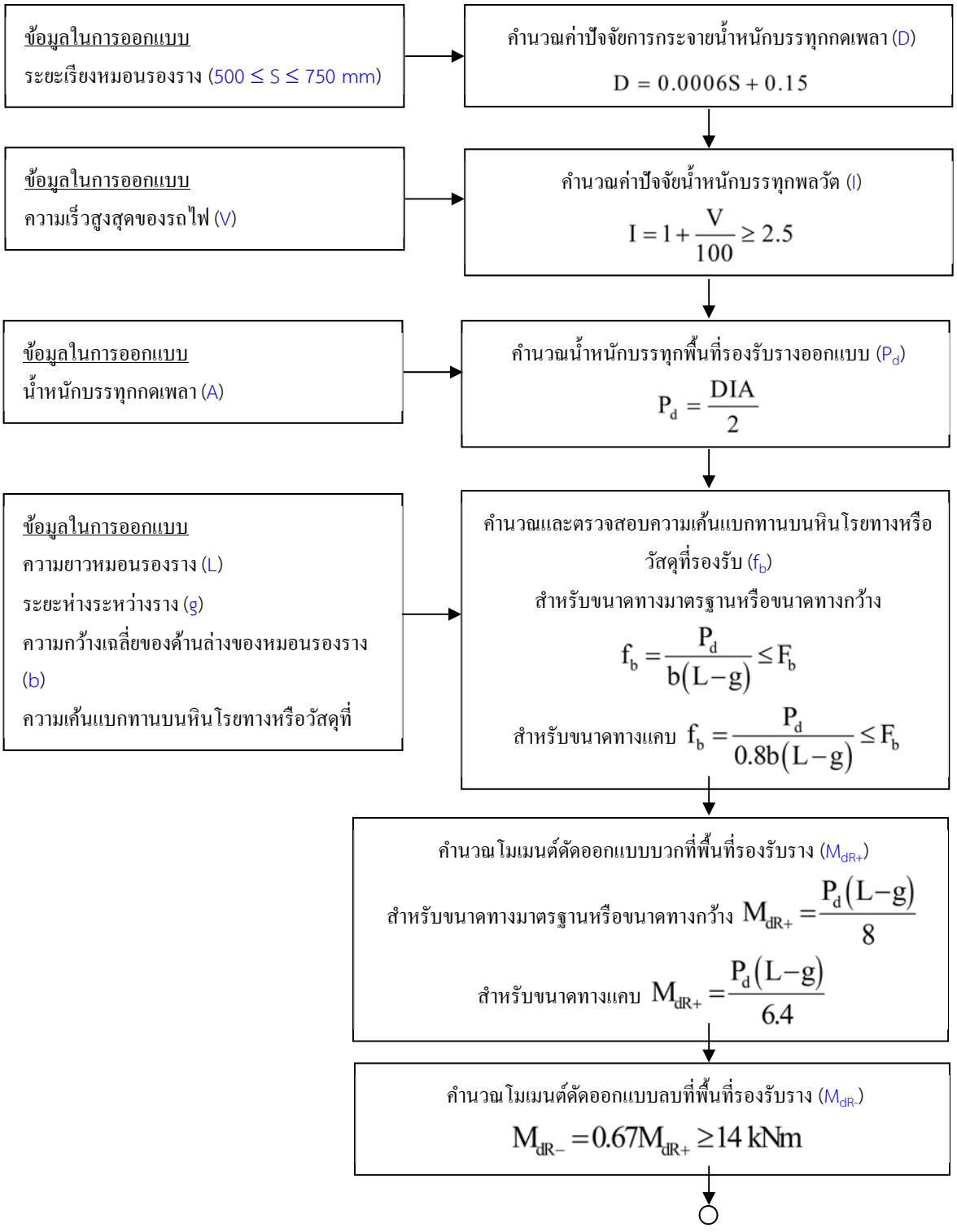
ตารางที่ 7-16 โมเมนต์ดัดออกแบบที่กึ่งกลางหมอน

ขนาดทาง	ขนาดทาง < 1435 มิลลิเมตร	ขนาดทาง 1435 มิลลิเมตร	ขนาดทาง ≥ 1600 มิลลิเมตร
โมเมนต์ดัด ออกแบบบวก (กิโลนิวตันเมตร)	$M_{dC+} = 0.05P_d(L-g)$		
โมเมนต์ดัด ออกแบบลบ (กิโลนิวตันเมตร)	$M_{dC-} = P_d(2g-L)/4$ ≥ 14	$M_{dC-} = P_d(2g-L)/4$	$M_{dC-} = 0.5\left[gP_d - \left(Wg(L-g)\right) - W(2g-L)^2/8\right]$ $W = 4P_d/(3L-2g)$

หมายเหตุ P_d หน่วยเป็นกิโลนิวตัน; L และ g หน่วยเป็นเมตร

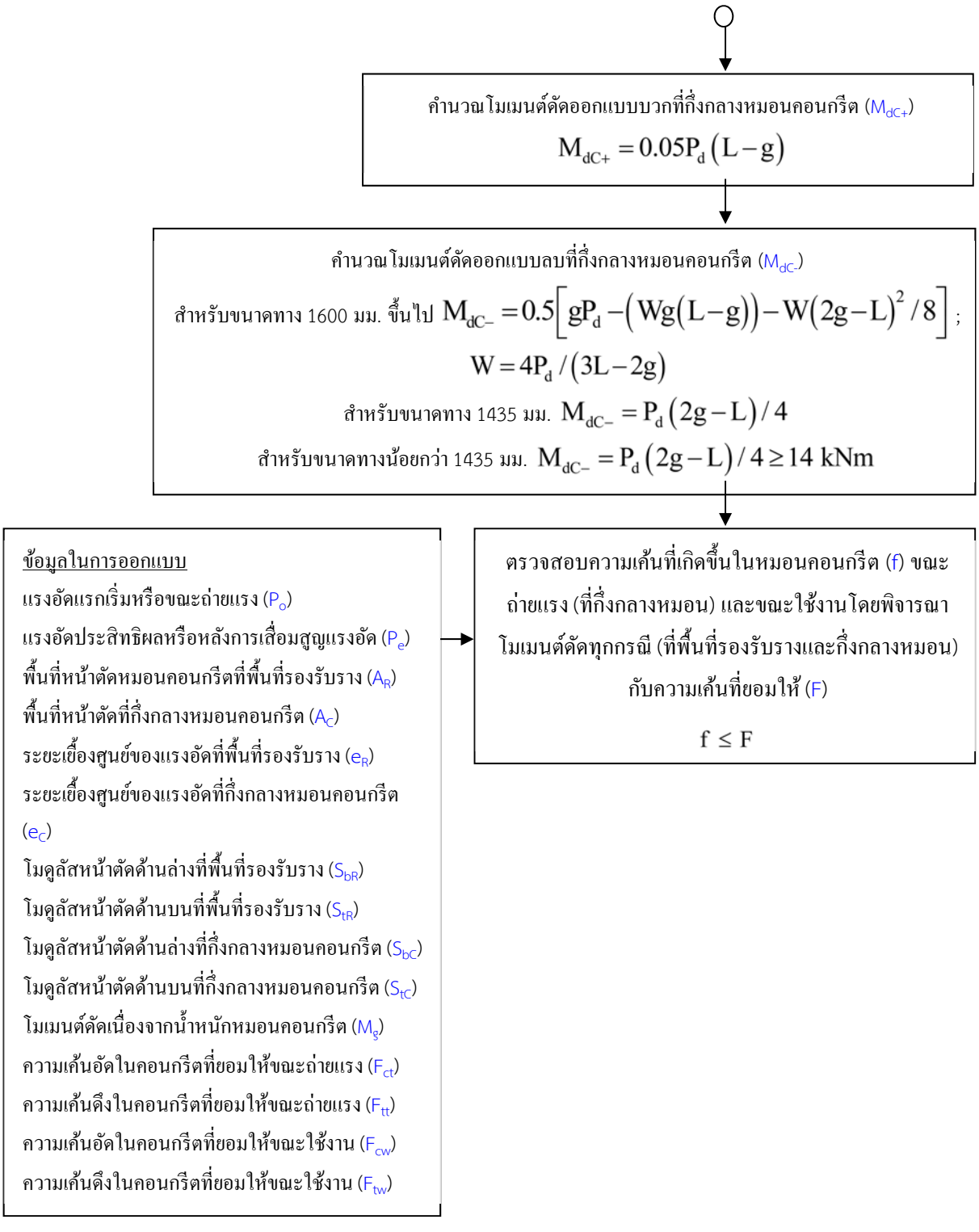
- ขั้นตอนการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรง

รูปที่ 7-49 แสดงขั้นตอนการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรง



รูปที่ 7-49 ขั้นตอนการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรง





รูปที่ 7-49 (ต่อ) ขั้นตอนการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรง



- ตัวอย่างการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรง

ตัวอย่างนี้แสดงตัวอย่างการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงสำหรับขนาดทางมาตรฐาน

1) ข้อมูลการออกแบบ

1.1) น้ำหนักบรรทุกและความเร็ว

น้ำหนักลงเพลา (A) = 20 ton

ความเร็วออกแบบสูงสุดของรถไฟ (V) = 160 km/h

1.2) หมอนคอนกรีต

ระยะเรียงหมอนรองราง (S) = 600 mm

ขนาดทาง = 1,435 mm

ความยาวหมอนรองราง (L) = 2.60 m

ระยะห่างระหว่างราง (g) = 1.51 m

ความกว้างเฉลี่ยของด้านล่างของหมอนรองราง (b) = 261.5 mm

โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักหมอนคอนกรีต (M_g) = 1,067 Nm

1.2.1) หน้าตัดที่พื้นที่รองรับราง

พื้นที่หน้าตัดหมอนคอนกรีตที่พื้นที่รองรับราง (A_R) = 505 cm^2

โมดูลัสหน้าตัดด้านล่างที่พื้นที่รองรับราง (S_{bR}) = 1,850 cm^3

โมดูลัสหน้าตัดด้านบนที่พื้นที่รองรับราง (S_{tR}) = 1,590 cm^3

ระยะเยื้องศูนย์ของแรงอัดที่พื้นที่รองรับราง (e_R) = 8 mm (ต่ำกว่าแกนสะเทินเป็น+)

1.2.2) หน้าตัดที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต

พื้นที่หน้าตัดที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (A_C) = 337 cm^2

โมดูลัสหน้าตัดด้านล่างที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (S_{bC}) = 1,020 cm^3

โมดูลัสหน้าตัดด้านบนที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (S_{tC}) = 900 cm^3

ระยะเยื้องศูนย์ของแรงอัดที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (e_C) = -4 mm (สูงกว่าแกนสะเทินเป็น-)

1.3) การอัดแรง

แรงอัดแรกเริ่มหรือขณะถ่ายแรง (P_o) = 0.49 MN

แรงอัดประสิทธิผล (P_e) = 0.39 MN

1.4) หินโรยทาง

ความเค้นแบกทานบนหินโรยทางที่ยอมให้ (F_b) = 0.586 MPa

1.5) คอนกรีต

ความต้านทานแรงอัด (f_c') = 50 MPa (รูปทรงกระบอก)

ความต้านทานแรงอัดขณะถ่ายแรง (f_{ci}') = 30 MPa (รูปทรงกระบอก)



ความเค้นอัดในคอนกรีตที่ยอมให้ขณะถ่ายแรง (F_{ct}= 0.6f_{ci}') = 18.00 MPa

ความเค้นดึงในคอนกรีตที่ยอมให้ขณะถ่ายแรง (F_{tt}= -0.25$\sqrt{f'_{ci}}$) = -1.37 MPa

ความเค้นอัดในคอนกรีตที่ยอมให้ขณะใช้งาน (F_{cw}= 0.45f_c') = 22.50 MPa

ความเค้นดึงในคอนกรีตที่ยอมให้ขณะใช้งาน (F_{tw} = -0.50$\sqrt{f'_c}$ ≥-3) = -3.00 MPa

2) คำนวณค่าปัจจัยการกระจายน้ำหนักบรรทุก (D)

$$D = 0.0006S + 0.15 = 0.0006 \times 600 + 0.15 = 0.51$$

3) คำนวณค่าปัจจัยน้ำหนักบรรทุกพลวัต (I)

$$I = 1 + \frac{V}{100} = 1 + \frac{160}{100} = 2.6 \geq 2.5 \implies I = 2.6$$

4) คำนวณน้ำหนักลงพื้นที่รองรับรางออกแบบ (P_d)

$$P_d = \frac{DIA}{2} = \frac{0.51 \times 2.6 \times 20 \times 8.896}{2} = 117.96 \text{ kN}$$

5) คำนวณและตรวจสอบความเค้นแบกทานบนหินโรยทาง (f_b)

สำหรับขนาดทางมาตรฐาน: $f_b = \frac{P_d}{b(L-g)} = \frac{117.96}{261.5 \times (2.60 - 1.51)} = 0.414$ MPa

$F_b = 0.586$ MPa ==> $f_b < F_b$ o.k.

6) คำนวณโมเมนต์ดัดออกแบบบวกที่พื้นที่รองรับราง (M_{dR+})

สำหรับขนาดทางมาตรฐาน: $M_{dR+} = \frac{P_d(L-g)}{8} = \frac{117.96 \times 1,000 \times (2.60 - 1.51)}{8} = 16,072$ Nm

7) คำนวณโมเมนต์ดัดออกแบบลบที่พื้นที่รองรับราง (M_{dR-})

$M_{dR-} = 0.67 M_{dR+} = 0.67 \times 16,072 = 10,768 < 14,000$ Nm ==> $M_{dR-} = 14,000$ Nm

8) คำนวณโมเมนต์ดัดออกแบบบวกที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (M_{dC+})

$$M_{dC+} = 0.05 P_d (L-g) = 0.05 \times 117.96 \times 1,000 \times (2.60 - 1.51) = 6,429 \text{ Nm}$$



9) คำนวณโมเมนต์ดัดออกแบบลบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (M_{dC-})

สำหรับขนาดทาง 1,435 mm:

$$M_{dC-} = \frac{P_d\left(2g - L\right)}{4} = \frac{117.96 \times 1{,}000 \times \left(2 \times 1.51 - 2.60\right)}{4} = 12{,}386 \text{ Nm}$$

10) ตรวจสอบความเค้นที่เกิดขึ้นในหมอนคอนกรีต (f)

10.1) ขณะถ่ายแรง พิจารณาเฉพาะที่หน้าตัดกึ่งกลางหมอนคอนกรีต

ความเค้นที่ผิวบน: $f_{ttC} = \frac{P_0}{A_C} - \frac{P_0 e_C}{S_{tC}} + \frac{M_g}{S_{tC}}$

$$f_{ttC} = \frac{0.49}{337 \times 10^{-4}} - \frac{0.49 \times \left(-4 \times 10^{-3}\right)}{900 \times 10^{-6}} + \frac{1{,}067 \times 10^{-6}}{900 \times 10^{-6}} = 17.76 < 18.00 \text{ MPa}$$

o.k.

ความเค้นที่ผิวล่าง: $f_{btC} = \frac{P_0}{A_C} + \frac{P_0 e_C}{S_{bC}} - \frac{M_g}{S_{bC}}$

$$f_{btC} = \frac{0.49}{337 \times 10^{-4}} + \frac{0.49 \times \left(-4 \times 10^{-3}\right)}{1{,}020 \times 10^{-6}} - \frac{1{,}067 \times 10^{-6}}{1{,}020 \times 10^{-6}} = 11.46 < 18.00 \text{ MPa}$$

o.k.

10.2) ขณะใช้งาน

10.2.1) ที่หน้าตัดพื้นที่รองรับราง

10.2.1.1) เนื่องจาก M_{dR+}

ความเค้นที่ผิวบน: $f_{twR} = \frac{P_e}{A_R} - \frac{P_e e_R}{S_{tR}} + \frac{M_{dR+}}{S_{tR}}$

$$f_{twR} = \frac{0.39}{505 \times 10^{-4}} - \frac{0.39 \times \left(8 \times 10^{-3}\right)}{1{,}590 \times 10^{-6}} + \frac{16{,}072 \times 10^{-6}}{1{,}590 \times 10^{-6}} = 15.85 < 22.50 \text{ MPa}$$

o.k.

ความเค้นที่ผิวล่าง: $f_{bwR} = \frac{P_e}{A_R} + \frac{P_e e_R}{S_{bR}} - \frac{M_{dR+}}{S_{bR}}$

$$f_{bwR} = \frac{0.39}{505 \times 10^{-4}} + \frac{0.39 \times \left(8 \times 10^{-3}\right)}{1{,}850 \times 10^{-6}} - \frac{16{,}072 \times 10^{-6}}{1{,}850 \times 10^{-6}} = 0.69 < 22.50 \text{ MPa}$$

o.k.



10.2.1.1) เนื่องจาก M_{dR-}

ความเค้นที่ผิวบน: $f_{twR} = \frac{P_e}{A_R} - \frac{P_e e_R}{S_{tR}} + \frac{M_{dR-}}{S_{tR}}$

$$f_{twR} = \frac{0.39}{505\times10^{-4}} - \frac{0.39\times\left(8\times10^{-3}\right)}{1,590\times10^{-6}} + \frac{\left(-14,000\right)\times10^{-6}}{1,590\times10^{-6}}$$

$$= -3.07 \approx -3.00 \text{ MPa} \quad \underline{\text{o.k.}}$$

ความเค้นที่ผิวล่าง: $f_{bwR} = \frac{P_e}{A_R} + \frac{P_e e_R}{S_{bR}} - \frac{M_{dR-}}{S_{bR}}$

$$f_{bwR} = \frac{0.39}{505\times10^{-4}} + \frac{0.39\times\left(8\times10^{-3}\right)}{1,850\times10^{-6}} - \frac{\left(-14,000\right)\times10^{-6}}{1,850\times10^{-6}}$$

$$= 16.94 < 22.50 \text{ MPa } \underline{\text{o.k.}}$$

10.2.2) ที่หน้าตัดกึ่งกลางหมอนคอนกรีต

10.2.2.1) เนื่องจาก M_{dC+}

ความเค้นที่ผิวบน: $f_{twC} = \frac{P_e}{A_C} - \frac{P_e e_C}{S_{tC}} + \frac{M_{dC+}}{S_{tC}}$

$$f_{twC} = \frac{0.39}{337\times10^{-4}} - \frac{0.39\times\left(-4\times10^{-3}\right)}{900\times10^{-6}} + \frac{6,429\times10^{-6}}{900\times10^{-6}} = 20.04 < 22.50 \text{ MPa } \underline{\text{o.k.}}$$

ความเค้นที่ผิวล่าง: $f_{bwC} = \frac{P_e}{A_C} + \frac{P_e e_C}{S_{bC}} - \frac{M_{dC+}}{S_{bC}}$

$$f_{bwC} = \frac{0.39}{337\times10^{-4}} + \frac{0.39\times\left(-4\times10^{-3}\right)}{1020\times10^{-6}} - \frac{6,429\times10^{-6}}{1020\times10^{-6}} = 3.70 < 22.50 \text{ MPa } \underline{\text{o.k.}}$$

10.2.2.2) เนื่องจาก M_{dC-}

ความเค้นที่ผิวบน: $f_{twC} = \frac{P_e}{A_C} - \frac{P_e e_C}{S_{tC}} + \frac{M_{dC-}}{S_{tC}}$

$$f_{twC} = \frac{0.39}{337\times10^{-4}} - \frac{0.39\times\left(-4\times10^{-3}\right)}{900\times10^{-6}} + \frac{\left(-12,386\right)\times10^{-6}}{900\times10^{-6}}$$

$$= -0.51 > -3.00 \text{ MPa} \quad \underline{\text{o.k.}}$$

ความเค้นที่ผิวล่าง: $f_{bwC} = \frac{P_e}{A_C} + \frac{P_e e_C}{S_{bC}} - \frac{M_{dC-}}{S_{bC}}$

$$f_{bwC} = \frac{0.39}{337\times10^{-4}} + \frac{0.39\times\left(-4\times10^{-3}\right)}{1020\times10^{-6}} - \frac{\left(-12,386\right)\times10^{-6}}{1020\times10^{-6}}$$

$$= 22.15 < 22.50 \text{ MPa } \underline{\text{o.k.}}$$



[2] การออกแบบหมอนคอนกรีตแท่งคู่

- การคำนวณน้ำหนักลงพื้นที่รองรับรางออกแบบ

น้ำหนักลงพื้นที่รองรับรางออกแบบคำนวณโดยใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรง

- การคำนวณโมเมนต์ดัดออกแบบหมอนคอนกรีตแท่งคู่

การคำนวณโมเมนต์ดัดออกแบบหมอนคอนกรีตแท่งคู่ให้คำนวณด้วยแบบจำลองอย่างง่าย (Simplified Design Model) และสมมุติให้การกระจายแรงและค่าสติฟเนสเฉลี่ยของที่รองรับใต้หมอนมีค่าคงที่ แล้วเผื่อค่าโมเมนต์ดัดที่จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลกระทบของความยาวและความกว้างด้านล่างของหมอนที่ไม่คงที่และเนื่องจากคุณภาพและความไม่สม่ำเสมอของที่รองรับ

- การออกแบบหมอนคอนกรีตแท่งคู่

การออกแบบหมอนคอนกรีตแท่งคู่ใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กและการออกแบบแท่งเหล็กเชื่อมต่อหมอนใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบคานเหล็กรูปพรรณ

[3] การออกแบบหมอนรองประแจคอนกรีตอัดแรง

- การคำนวณน้ำหนักลงพื้นที่รองรับรางออกแบบ

น้ำหนักลงพื้นที่รองรับรางออกแบบคำนวณโดยใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรง

- การคำนวณโมเมนต์ดัดออกแบบหมอนรองประแจคอนกรีตอัดแรง

การคำนวณโมเมนต์ดัดออกแบบใช้สมมุติฐานว่า โมเมนต์ดัดออกแบบบวกและลบมีค่าเท่ากัน โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 22 – 30 กิโลนิวตันเมตร

- การออกแบบหมอนรองประแจคอนกรีตอัดแรง

การออกแบบหมอนรองประแจคอนกรีตอัดแรงใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว โดยต้องออกแบบให้หมอนยังคงมีความตรงตลอดความยาว



[4] การออกแบบหมอนรองรางแบบฝังในชั้นที่รองรับ

การออกแบบหมอนรองรางฝังในชั้นที่รองรับ ขึ้นกับว่าใช้หมอนรองรางแบบใด ซึ่งอาจจะเป็นหมอนคอนกรีตอัดแรง หมอนคอนกรีตแท่งคู่ หรือหมอนรองประแจคอนกรีตอัดแรง ซึ่งถ้าใช้แบบใดก็ให้ออกแบบตามหลักการออกแบบหมอนนั้น ๆ หรือตามข้อตกลงในสัญญา

[5] การออกแบบหมอนรองรางแบบวางบนชั้นที่รองรับ

การออกแบบหมอนรองรางวางบนชั้นที่รองรับ ขึ้นกับว่าใช้หมอนรองรางแบบใด ซึ่งอาจจะเป็นหมอนคอนกรีตอัดแรง หมอนคอนกรีตแท่งคู่ หรือหมอนรองประแจคอนกรีตอัดแรง ซึ่งถ้าใช้แบบใดก็ให้ออกแบบตามหลักการออกหมอนแบบนั้น ๆ หรือตามข้อตกลงในสัญญา

การทดสอบหมอนคอนกรีต

การทดสอบหมอนคอนกรีตทดสอบตามเกณฑ์ที่กำหนดใน มขร S-T-007-256X มาตรฐานองค์ประกอบทางรถไฟ

ในคู่มือนี้ให้ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักบรรทุกทดสอบ

[1] การทดสอบหมอนคอนกรีตอัดแรง

- การคำนวณน้ำหนักบรรทุกทดสอบหมอนคอนกรีตอัดแรง

คำนวณตามเกณฑ์ที่กำหนดใน มขร S-T-007-256X มาตรฐานองค์ประกอบทางรถไฟ เพื่อแสดงตัวอย่างการคำนวณ ในที่นี้ใช้ข้อมูลเดียวกันกับตัวอย่างการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงข้างต้น ดังนั้นจะได้

$$f_t' = -0.85\sqrt{f_c'} = -6.01 \text{ MPa}$$

$$P = 0.95P_0 = 461 \text{ kN}$$

1) น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดลบที่พื้นที่รองรับราง (P_{tR-})

$$M_{crR-} = S_{tR}\left(f_t' - \frac{P}{A_R}\right) + Pe_R = -20.393 \text{ kNm}$$

$$P_{tR-} = \frac{2\left|M_{crR-}\right|}{\left(0.33 - 0.075\right)} = 160 \text{ kN}$$

2) น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดบวกที่พื้นที่รองรับราง (P_{tR+})

$$M_{crR+} = S_{bR}\left(-f_t' + \frac{P}{A_R}\right) + Pe_R = 31.713 \text{ kNm}$$



$$P_{tR+} = \frac{2M_{crR+}}{(0.33-0.045)} = 223 \text{ kN}$$

3) น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดลบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (P_{tC-})

$$M_{crC-} = S_{tC}\left(f'_t - \frac{P}{A_C}\right) + Pe_C = -19.577 \text{ kNm}$$

$$P_{tC-} = \frac{2|M_{crC-}|}{(0.5g-0.075)} = 58 \text{ kN}$$

4) น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดบวกที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (P_{tC+})

$$M_{crC+} = S_{bC}\left(-f'_t + \frac{P}{A_C}\right) + Pe_C = 15.886 \text{ kNm}$$

$$P_{tC+} = \frac{2M_{crC+}}{(0.5g-0.075)} = 47 \text{ kN}$$

[2] การทดสอบหมอนคอนกรีตแท่งคู่

- การคำนวณน้ำหนักบรรทุกทดสอบหมอนคอนกรีตแท่งคู่

  คำนวณตามเกณฑ์ที่กำหนดใน มขร S-T-007-256X มาตรฐานองค์ประกอบทางรถไฟ เพื่อแสดงตัวอย่างการคำนวณ ในที่นี้ใช้ข้อมูลในการคำนวณต่อไปนี้

$$f'_t = -0.85\sqrt{f'_c} = -6.01 \text{ MPa}$$

S_{bR} = 580 cm^3

L_r = 0.3 m

1) น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดบวกที่พื้นที่รองรับราง (P_{tR+})

$$M_{crR+} = -S_{bR}f'_t = \left(-580\times10^{-6}\right)\left(-6.01\times10^{3}\right) = 3.48 \text{ kNm}$$

$$P_{tR+} = \frac{2|M_{crR+}|}{(0.33-0.075)} = \frac{2\times3.48}{(0.33-0.075)} = 27.30 \text{ kN}$$

2) น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดลบที่พื้นที่รองรับราง (P_{tR-})

$$P_{tR-} = 0.5P_{tR+} = 13.65 \text{ kN}$$



[3] การทดสอบหมอนรองประแจคอนกรีตอัดแรง

- การคำนวณน้ำหนักบรรทุกทดสอบหมอนรองประแจคอนกรีตอัดแรง

คำนวณตามเกณฑ์ที่กำหนดใน มขร S-T-007-256X มาตรฐานองค์ประกอบทางรถไฟ ตัวอย่างการคำนวณให้ดูตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักบรรทุกทดสอบหมอนคอนกรีตอัดแรงเป็นแนวทาง

[4] การทดสอบหมอนรองรางฝังในชั้นที่รองรับ

การทดสอบหมอนรองรางฝังในชั้นที่รองรับ ขึ้นกับว่าใช้หมอนรองรางแบบใด ซึ่งอาจจะเป็นหมอนคอนกรีตอัดแรง หมอนคอนกรีตแท่งคู่ หรือหมอนรองประแจคอนกรีตอัดแรง ซึ่งถ้าใช้แบบใดก็ให้ทดสอบตามการทดสอบหมอนแบบนั้น ๆ หรือตามข้อตกลงในสัญญา

[5] การทดสอบหมอนรองรางวางบนชั้นที่รองรับ

การทดสอบหมอนรองรางวางบนชั้นที่รองรับ ขึ้นกับว่าใช้หมอนรองรางแบบใด ซึ่งอาจจะเป็นหมอนคอนกรีตอัดแรง หมอนคอนกรีตแท่งคู่ หรือหมอนรองประแจคอนกรีตอัดแรง ซึ่งถ้าใช้แบบใดก็ให้ทดสอบตามการทดสอบหมอนแบบนั้น ๆ หรือตามข้อตกลงในสัญญา

7.6.1 การทดสอบหมอนคอนกรีต

หมอนคอนกรีตอัดแรงต้องมีขนาดเป็นไปตามพิกัดความคลาดเคลื่อนตามที่กำหนดในตารางที่ 7-17 และมีระยะคอนกรีตหุ้มลวดอัดแรง ตามตารางที่ 7-18

ตารางที่ 7-17 พิกัดความคลาดเคลื่อนของขนาดหมอนคอนกรีตอัดแรง (รฟท-คู่มือการผลิต&การทดสอบหมอนฯ)

มิติ	พิกัดความคลาดเคลื่อน
ความยาว	± 5.0 มม.
ความกว้างที่พื้นที่รองรับราง	± 5.0 มม.
ความกว้างที่กึ่งกลางหมอน	± 5.0 มม.
ความกว้างที่ปลายหมอน	± 5.0 มม.
ความสูงที่พื้นที่รองรับราง	+5.0 หรือ -2.0 มม.
ความสูงที่กึ่งกลางหมอน	+5.0 หรือ -2.0 มม.
ความสูงที่ปลายหมอน	+5.0 หรือ -2.0 มม.
ตำแหน่งของลวดอัดแรงแต่ละเส้น	± 5.0 มม.
ความตรงด้านข้าง	± 5.0 มม.
ความเรียบของผิวที่พื้นที่รองรับราง	± 0.5 มม.
ความเอียงหรือลาดของพื้นที่รองรับราง	1:45 < x < 1:35
ความเอียงหรือระดับของพื้นที่รองรับรางในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของราง	± 30 ลิปดา



ตารางที่ 7-18 ระยะคอนกรีตหุ้มลวดอัดแรง (AS 1085.14-2003)

ตำแหน่ง	ระยะคอนกรีตหุ้ม
ด้านล่างหมอน	≥ 35 มม.
ด้านอื่น ๆ	≥ 25 มม.
บริเวณวัสดุฝังยึด	≥ 12 มม.

1) การทดสอบและเกณฑ์การทดสอบ

น้ำหนักบรรทุกทดสอบขึ้นกับระยะห่างระหว่างราง (g) และโมเมนต์ดัดแตกร้าว (Mcr) น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดลบที่พื้นที่รองรับราง (PtR-) การทดสอบการรับโมเมนต์ดัดบวกที่พื้นที่รองรับราง (PtR+) การทดสอบการรับโมเมนต์ดัดลบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (PtC-) และการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดบวกที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (PtC+) คำนวณได้จากสมการแสดงใน ตารางที่ 7-19

ตารางที่ 7-19 น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (AS 1085.14-2003)

การทดสอบ	น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (kN)
การรับโมเมนต์ดัดลบที่พื้นที่รองรับราง	$P_{tR-}=\frac{2\lvert M_{crR-}\rvert}{(0.33-0.075)}\ ;\ M_{crR-}=S_{tR}\left(f_t'-\frac{P}{A_R}\right)+Pe_R$
การรับโมเมนต์ดัดบวกที่พื้นที่รองรับราง	$P_{tR+}=\frac{2M_{crR+}}{(0.33-0.045)};\ M_{crR+}=S_{bR}\left(-f_t'+\frac{P}{A_R}\right)+Pe_R$
การรับโมเมนต์ดัดลบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต	$P_{tC-}=\frac{2\lvert M_{crC-}\rvert}{(0.5g-0.075)};\ M_{crC-}=S_{tC}\left(f_t'-\frac{P}{A_C}\right)+Pe_C$
การรับโมเมนต์ดัดบวกที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต	$P_{tC+}=\frac{2M_{crC+}}{(0.5g-0.075)};\ M_{crC+}=S_{bC}\left(-f_t'+\frac{P}{A_C}\right)+Pe_C$

หมายเหตุ: กำหนดให้ความเค้นอัดเป็นบวก และระยะเยื้องศูนย์ (e) ต่ำกว่าแกนสะเทินเป็นบวก

เมื่อ S_{tR} คือ โมดูลัสหน้าตัดด้านบนที่พื้นที่รองรับราง หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

S_{bR} คือ โมดูลัสหน้าตัดด้านล่างที่พื้นที่รองรับราง หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร

S_{tC} คือ โมดูลัสหน้าตัดด้านบนที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร

S_{bC} คือ โมดูลัสหน้าตัดด้านล่างที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร

f_t' คือ ความต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ณ วันทดสอบ $f_t'=0.85\sqrt{f_c'}$ =หน่วยเป็น เมกกะปาสคาล

P คือ แรงอัดในลวดอัดแรง ณ วันทดสอบ $P=0.95P_0$ = หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

P_0 คือ แรงอัดแรกเริ่มหรือขณะถ่ายแรง หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

A_R คือ พื้นที่หน้าตัดหมอนคอนกรีตที่พื้นที่รองรับราง หน่วยเป็น ตารางเมตร

A_C คือ พื้นที่หน้าตัดที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีตหน่วยเป็น ตารางเมตร



e_R คือ ระยะเยื้องศูนย์ของแรงอัดที่พื้นที่รองรับรางหน่วยเป็น เมตร

e_C คือ ระยะเยื้องศูนย์ของแรงอัดที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีตหน่วยเป็น เมตร

การทดสอบหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยวและหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยวประกอบเสร็จต้องทำตามรายการและวิธีที่กำหนดในมาตรฐาน มขร S-T-007-256x การออกแบบองค์ประกอบโครงสร้างทางรถไฟ (หมอนคอนกรีต) และเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในตารางที่ 7-20 และ ตารางที่ 7-21 ตามลำดับ หรือตามข้อตกลงในสัญญา

ตารางที่ 7-20 เกณฑ์การทดสอบหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว (รฟท-คู่มือการผลิต&การทดสอบหมอนฯ)

การทดสอบ	เกณฑ์การทดสอบ
การทดสอบมิติ	ตามที่กำหนดในตารางที่ 7-17
การทดสอบการรับโมเมนต์ดัดลบที่พื้นที่รองรับราง	ไม่เกิดการแตกร้าว
การทดสอบการรับโมเมนต์ดัดบวกที่พื้นที่รองรับราง	ไม่เกิดการแตกร้าว
การทดสอบการรับแรงกระทำซ้ำที่พื้นที่รองรับราง	ไม่เกิดการแตกร้าว
การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของลวดอัดแรง	การเลื่อนไหลของเส้นลวดต้องไม่เกิน 0.025 มม.
การทดสอบการรับโมเมนต์ดัดลบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต	ไม่เกิดการแตกร้าว
การทดสอบการรับโมเมนต์ดัดบวกที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต	ไม่เกิดการแตกร้าว

ตารางที่ 7-21 เกณฑ์การทดสอบหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยวประกอบเสร็จ (รฟท-คู่มือการผลิต&การทดสอบหมอน

การทดสอบ	เกณฑ์การทดสอบ
การทดสอบแรงถอนวัสดุฝังยึด	บ่าจานรองราง (Shoulder) เคลื่อนตัวไม่เกินค่าที่กำหนดในสัญญา และหมอนคอนกรีตไม่เกิดการแตกร้าว
การทดสอบความต้านทานแรงบิดวัสดุฝังยึด (ถ้ามี)	ตามข้อตกลงในสัญญา
การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของลวดอัดแรง และการรับแรงสูงสุด	ตามข้อตกลงในสัญญา
การทดสอบแรงกดเครื่องยึดเหนี่ยวรางที่ฐานราง	ค่าแรงกดเครื่องยึดเหนี่ยวรางที่ได้เป็นไปตามข้อตกลงในสัญญา
การทดสอบความต้านการคืบ	รางเคลื่อนตัวไม่เกินค่าที่กำหนดในสัญญา
การทดสอบแรงยกขึ้นของเครื่องยึดเหนี่ยวราง	เครื่องยึดเหนี่ยวรางไม่ถอนหลุด และหมอนคอนกรีตไม่แตกร้าว
การทดสอบความต้านการล้าของเครื่องยึดเหนี่ยวราง	ไม่เกิดการชำรุดของเครื่องยึดเหนี่ยวราง และหมอนคอนกรีตไม่แตกร้าว
การทดสอบความต้านแรงด้านข้าง	ฐานรางเคลื่อนตามแนวราบไม่เกินค่าที่กำหนดในสัญญา



การทดสอบ	เกณฑ์การทดสอบ
การทดสอบความต้านการเคลื่อนที่ตามแนวรางของเครื่องยึดเหนี่ยวราง (ถ้ามี)	ตามข้อตกลงในสัญญา
การทดสอบความต้านแรงกระทำซ้ำด้านข้างวัสดุฝังยึด (สำหรับวัสดุฝังยึดที่เป็นเกลียว)	ตามข้อตกลงในสัญญา
การทดสอบขนาดทาง	ค่าขนาดทางไม่เกิน ± 2.0 มม.
การทดสอบความต้านทานไฟฟ้า	ค่าต้านทานไฟฟ้ามากกว่า 4,000 โอห์ม
การทดสอบความต้านไฟฟ้าลัดวงจร	ค่าต้านทานไฟฟ้ามากกว่า 4,000 โอห์ม

2) ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักบรรทุกทดสอบ

ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักบรรทุกทดสอบใช้ข้อมูลเดียวกันกับตัวอย่างการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยวข้างต้น ดังนั้น

$$f_t' = -0.85\sqrt{f_c'} = -6.01 \text{ MPa}$$

$$P = 0.95P_0 = 461 \text{ kN}$$

(2.1) น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดลบที่พื้นที่รองรับราง (PtR-)

$$M_{crR-} = S_{tR}\left(f_t' - \frac{P}{A_R}\right) + Pe_R = -20.393 \text{ kNm}$$

$$P_{tR-} = \frac{2|M_{crR-}|}{(0.33 - 0.075)} = 160 \text{ kN}$$

(2.2) น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดบวกที่พื้นที่รองรับราง (PtR+)

$$M_{crR+} = S_{bR}\left(-f_t' + \frac{P}{A_R}\right) + Pe_R = 31.713 \text{ kNm}$$

$$P_{tR+} = \frac{2M_{crR+}}{(0.33 - 0.045)} = 223 \text{ kN}$$

(2.3) น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดลบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (PtC-)

$$M_{crC-} = S_{tC}\left(f_t' - \frac{P}{A_C}\right) + Pe_C = -19.577 \text{ kNm}$$

$$P_{tC-} = \frac{2|M_{crC-}|}{(0.5g - 0.075)} = 58 \text{ kN}$$

(2.4) น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดบวกที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต (PtC+)



$$M_{crC+} = S_{bC}\left(-f_t' + \frac{P}{A_C}\right) + Pe_C = 15.886 \text{ kNm}$$

$$P_{tC+} = \frac{2M_{crC+}}{(0.5g - 0.075)} = 47 \text{ kN}$$

3) การออกแบบหมอนคอนกรีตเสริมเหล็กแท่งคู่

การออกแบบหมอนคอนกรีตเสริมเหล็กแท่งคู่ใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กและการออกแบบแท่งเหล็กเชื่อมต่อหมอนใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบคานเหล็กรูปพรรณ

4) การออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงสำหรับประแจ

การคำนวณโมเมนต์ดัดออกแบบใช้สมมุติฐานว่า โมเมนต์ดัดออกแบบบวกและลบมีค่าเท่ากัน โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 22 – 30 กิโลนิวตันเมตร (prEN 13230-6:2014)

5) การออกแบบใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว

6) การออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงฝังในแผ่นพื้นคอนกรีต

การออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงฝังในแผ่นพื้นคอนกรีตใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว

7) การออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงวางบนพื้นแอสฟัลท์ติกคอนกรีต

การออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงวางบนพื้นแอสฟัลท์ติกคอนกรีตใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว

7.7 ประแจและจุดตัด

7.7.1 รูปแบบและองค์ประกอบของประแจและจุดตัด

1) การออกแบบประแจ

ประแจ คือเครื่องประดิษฐ์ ที่ใช้วางในทางเส้นหนึ่ง เพื่อให้ขบวนรถหรือล้อเลื่อนใด ๆ สามารถวิ่งผ่านออกจากทางเส้นนั้น แยกไปสู่ทางเส้นอื่นได้ สำหรับเครื่องประดิษฐ์ที่ใช้วางในทาง เพื่อให้ขบวนรถวิ่งในทางเส้นหนึ่งตัดผ่านทางเส้นอื่นได้ เรียกว่า “ทางตัดผ่าน” หรือ “จุดตัด” (Crossing) ซึ่งอนุโลมจัดอยู่ในพวกประแจเช่นกัน [78]

หน้าที่การทำงานหลักของประแจคือ ต้องสามารถเปลี่ยนทิศทางและยอมให้รถไฟแล่นผ่านไปด้วยความเร็วที่กำหนดได้อย่างปลอดภัย ซึ่งพฤติกรรมของโครงสร้างของประแจขณะที่รถไฟวิ่งผ่านนั้นจะมีแรงกระแทกเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางของล้อรถไฟรวมทั้งความไม่สม่ำเสมอบนหน้าสัมผัสของล้อและรางบริเวณประแจ นอกจากนี้ยังมีแรงสู่ศูนย์กลางที่ถ่ายลงมาจากรถไฟขณะเลี้ยวโค้งด้วยความเร็ว จากเหตุผลดังกล่าวจึง



จำเป็นที่ต้องกำหนดมาตรฐานของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในประแจ รวมทั้งรูปทรงของประแจให้สอดคล้องกับความเร็วที่ใช้ออกแบบ โดยสามารถแบ่งหมวดหมู่ตามส่วนประกอบหลักได้ดังนี้

(1.1) รูปทรงของประแจและทางตัดประแจ (Turnout and Crossing Geometry)

รูปทรงของประแจต่าง ๆ รวมทั้งมุมประแจ จะเป็นไปตามความต้องการของระบบการเดินรถ ซึ่งจะเกี่ยวกับความเร็วผ่านในเส้นทางเปลี่ยนทางวิ่งของทางรถไฟ

(1.2) จุดตัด, ตะเฆ่ (Crossing, Frog)

ทางตัดรางรถไฟจะต้องทนทานต่อการสึกหรอและติดตั้งง่าย โดยปัจจุบันนิยมใช้แบบหล่อสำเร็จเป็นชิ้นเดียวมาจากโรงงาน

(1.3) รางประคองลิ้น และรางเสริม (Stock and Closure Rails)

รางของประแจทั้งหมด ยกเว้นรางลิ้น (Switch Rail) และรางกัน (Check Rail) ส่วนใหญ่จะใช้หน้าตัดรูปทรงเดิมที่มีคุณสมบัติเหมือนกับรางบนทางรถไฟปกติ

(1.4) รางลิ้น (Switch Rail)

จะต้องมีรูปทรงที่เหมาะสมกับล้อรถไฟใหม่ และล้อรถไฟที่มีความสึก รวมทั้งต้องมีค่าความแข็งที่เพียงพอ

(1.5) ชุดอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง (Fastening System)

ระบบเครื่องยึดเหนี่ยวรางในประแจจะต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามที่ต้องการและชิ้นส่วนประกอบที่ใช้ในเครื่องยึดเหนี่ยวรางในประแจควรจะมีชิ้นส่วนที่ใช้ร่วมกันได้ในทางรถไฟทั่วไป

(1.6) แผ่นเหล็กรองรางเลื่อน (Sliding Base Plates)

แผ่นเหล็กรองรางเลื่อนควรสามารถรองรับการใช้งานได้โดยที่ไม่ต้องการการบำรุงรักษาโดยใช้วัสดุหล่อลื่น ลูกล้อของแผ่นเหล็กรองรางเลื่อนอาจมีระบบการปรับของลูกล้อที่สามารถปรับได้ทั้งทิศทางแนวราบและแนวดิ่ง

(1.7) หมอนคอนกรีตสำหรับรองรับประแจ

ประแจจะถูกยึดติดเข้ากับหมอนคอนกรีต โดยต้องสามารถรองรับแรงต่าง ๆ ที่ส่งลงมาจากประแจได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

ในการออกแบบประแจจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆดังต่อไปนี้

- รูปร่างลักษณะทางกายภาพของประแจ (Geometry) สามารถแบ่งเป็นหมวดหมู่ได้ดังนี้
    - เส้นสัมผัส (Tangential) และ เส้นตรงที่ตัดวงกลม (Secant) หรือรูปแบบอื่น ๆ (Tangential/Secant/Other Geometry)
    - มุมประแจ (Crossing/Turnout Angle)
    - Turnout Handing
    - รัศมีประแจ (Turnout Radius)

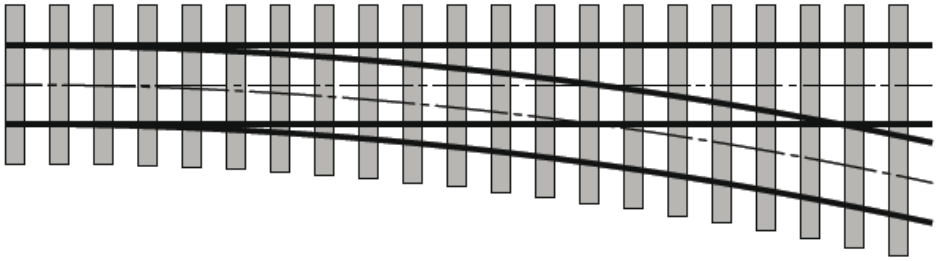


  - รัศมีของทางประธาน (Mainline Radius)
  - (Track Layout)
- ความกว้างของทางรถไฟ (Gauge)
- หน้าตัดและขนาดราง (Rail Weight/Section)
- ชนิดของจุดตัด (Crossing Type) มีสองประเภทหลัก ๆ คือ
  - แบบขยับไม่ได้ (Fixed Nose)
  - แบบขยับได้ (Swing Nose)
- ชนิดของลิ้นประแจ (Switch Type)
- หมอนรองประแจ (Bearer Layout and Spacing) รูปแบบการวางหมอนรองประแจจะต้องคำนึงถึงมาตรฐานของทางรถไฟบนสายทางที่เกี่ยวข้อง
- ชนิดของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางบนประแจ (Fastening System)
- ปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง (Wheel Rail Interface) มีรายละเอียดที่ต้องคำนึงถึงดังนี้
  - โปรไฟล์ของล้อ (Wheel Profile)
  - ระยะระหว่างด้านในของชุดล้อ
  - ความกว้างร่องทางบังใบล้อ
  - ความลึกของร่องทางบังใบล้อ
- ปัจจัยของการให้บริการ (Operating Parameters)
  - น้ำหนักลงเพลา
  - ความเร็วบนทางประธานและทางสายรอง
- ค่าการยกโค้งส่วนขาด (Cant Deficiency) มีผลต่อความเร็วสูงสุดที่ยอมให้ขณะแล่นผ่านประแจ
- อายุการใช้งานของชิ้นส่วนประแจ
  - จำนวนปีที่ใช้งาน
  - ปริมาณเพลาที่วิ่งผ่าน (MGT)
- ปฏิสัมพันธ์ระหว่างระบบอาณัติสัญญาณ (Signaling Interfaces)
  - ชนิดและตำแหน่งของลิ้นประแจ
  - กลไกการล็อค (Locking Mechanism)
  - ชนิดของระบบตรวจจับรถไฟ (Detection Type)

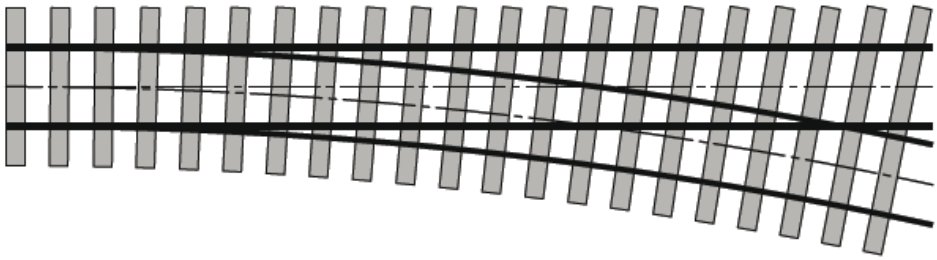


- ตำแหน่งและรายละเอียดของจุดติดตั้งสำหรับ ลิ้นประแจ,รางประธาน,จุดตัดแบบขยับได้,การเจาะราง และกระบวนการกัดกลึง
- ตำแหน่งและรายละเอียดของจุดติดตั้งสำหรับหมอนรองประแจ
- จุดต่อฉนวนทางไฟฟ้า

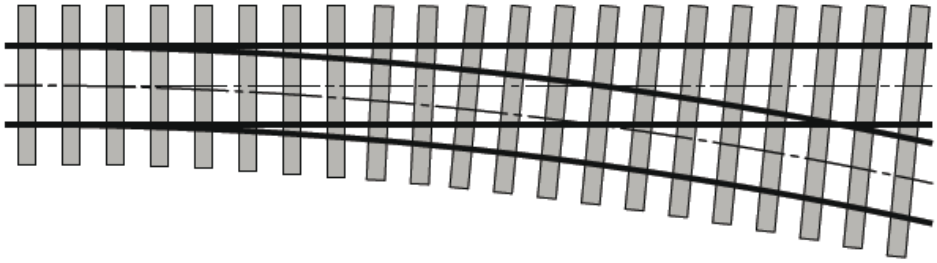
- รายละเอียดทางเทคนิคของรถไฟและโครงสร้างพื้นฐาน
  - ขนาดและระยะเผื่อต่าง ๆ ของโครงสร้างพื้นฐาน
  - ขนาดและระยะเผื่อต่าง ๆ ของรถไฟ
- การสั่นสะเทือนและเสียงรบกวน (Noise and Vibration) ในกรณีที่ประแจถูกติดตั้งอยู่ในชุมชนหรือพื้นที่ ๆ ต้องมีการจำกัดปริมาณการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวน จะต้องมีมาตรการในการลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนลง โดยอาจพิจารณาใช้แผ่นพื้นคอนกรีตและติดตั้งอุปกรณ์ช่วยลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวน นอกจากนี้การใช้จุดตัดแบบขยับได้ (Swing Nose Crossing) ก็จะสามารถลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนลงได้เช่นกัน
- การเชื่อมประแจ โดยจะมีรายละเอียดที่ต้องตรวจสอบเพิ่มเติมในส่วนของการเชื่อมเหล็กหล่อแมงการนีสเข้ากับราง



(a) Straight



(b) Fanned



(c) Combination straight/ half angled

รูปที่ 7-50 แสดงตัวอย่างของรูปแบบการวางหมอนรองประแจในรูปแบบต่าง ๆ

7.7.2 การออกแบบลักษณะทางกายภาพของประแจ

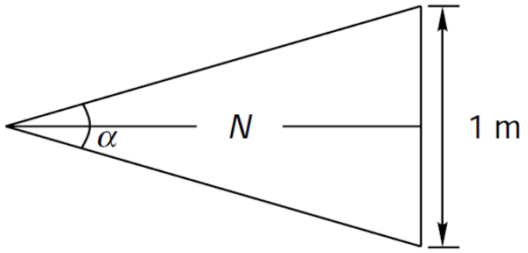
1) การออกแบบรูปร่างของประแจ

ในการออกแบบรูปร่างของประแจ จะต้องกำหนดมุมของประแจซึ่งจะมีผลเกี่ยวข้องกับรัศมีโค้งบนประแจ รวมไปถึงความเร็วสูงสุดที่ยอมให้ขณะแล่นผ่าน โดยสามารถใช้วิธีการวัดมุมได้สองวิธีดังนี้

- วิธีเส้นผ่าศูนย์กลาง (Center line method)

วิธีนี้จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนประแจ (N) และมุมประแจ (α) โดย

$$N = \frac{1}{2}\cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

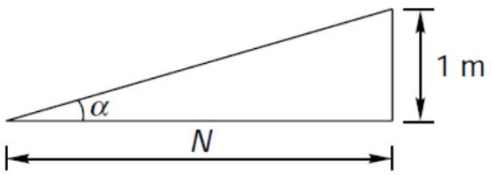


รูปที่ 7-51 การกำหนดมุมประแจโดยวิธีเส้นผ่าศูนย์กลาง (Center Line Method)

- วิธีมุมฉาก (Right Angle Method)

วิธีนี้จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนประแจ (N) และมุมประแจ (α) โดย

$$N = \cot(\alpha)$$

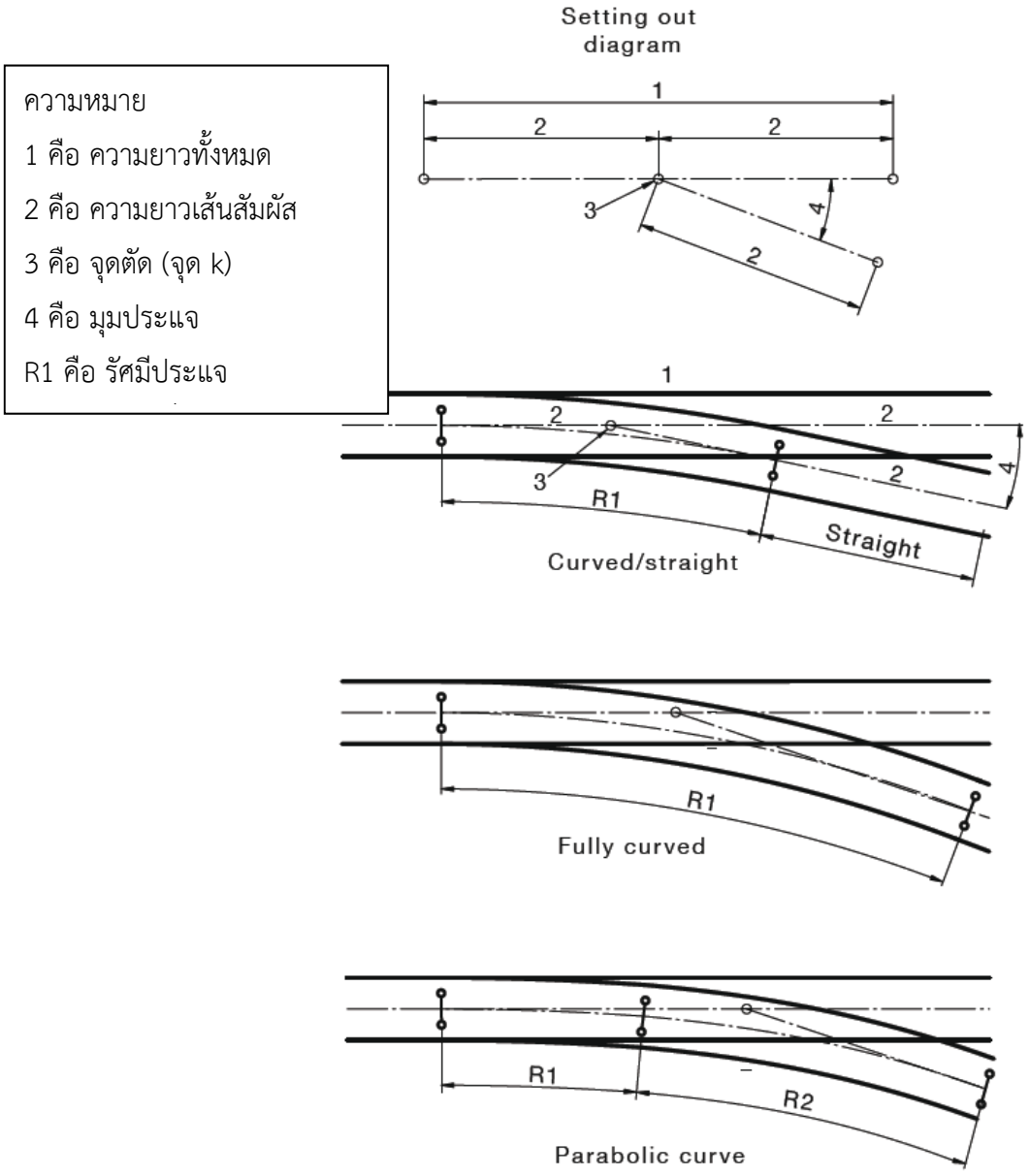


รูปที่ 7-52 การกำหนดมุมประแจโดยวิธีมุมฉาก (Right angle method)

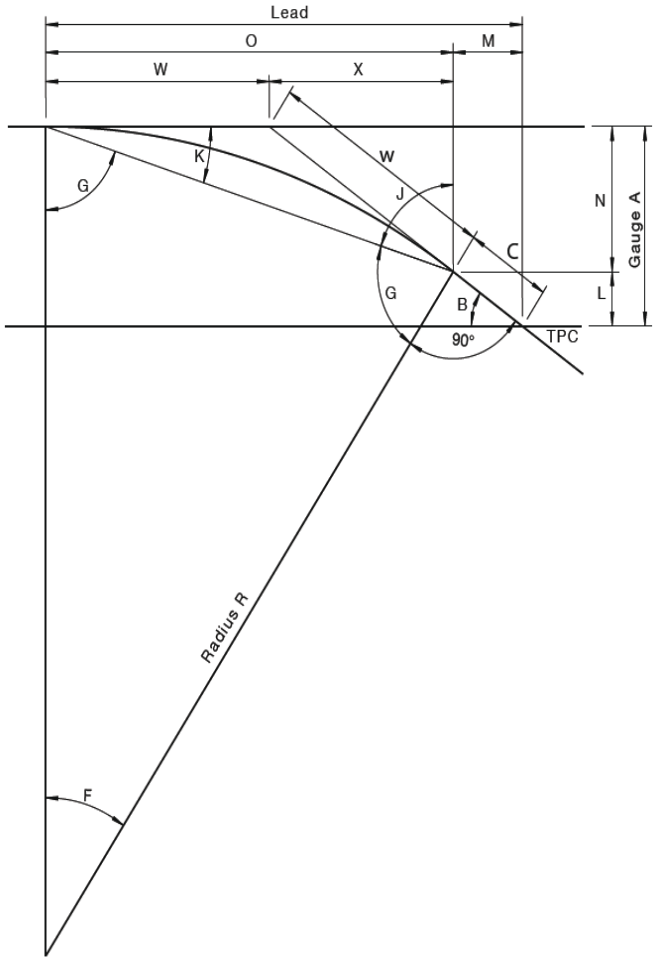
เมื่อกำหนดมุมของประแจแล้ว จะทำให้สามารถคำนวณค่ามุมประแจได้จากสองวิธีข้างต้น ซึ่งจะสามารถนำไปออกแบบรูปร่างของประแจในส่วนอื่น ๆ ได้ต่อไป

2) การออกแบบรูปร่างของประแจด้วยวิธี เส้นสัมผัส (Tangential) [79]

การออกแบบรูปร่างของประแจด้วยวิธีเส้นสัมผัส (Tangential) นั้น ช่วงโค้งของประแจจะเริ่มที่จุดสัมผัสของรัศมีและสิ้นสุดที่จุดสมมุติที่มีมุมเบี่ยงเท่ากับมุมประแจที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 7-53และ รูปที่ 7-54



รูปที่ 7-53 รูปแบบของการออกแบบประแจด้วยวิธีเส้นสัมผัส (Tangential)



ความหมาย

ขนาดทางA= ขนาดทาง, หน่วยมิลลิเมตร

B = มุมของจุดตัดหน่วยองศา = $\tan^{-1}$(1/อัตราส่วนจุดตัด) e.g. $\tan^{-1}$(1/8)

C = ความยาวทางตรงหน่วยมิลลิเมตร

จุด (Point thickness) = 0 mm

มุม (Entry angle) = 0

G + K = 90°

L = C × Sin B

M = C × Cos B

N = A – L

W = N × Cosec B

X = N × Cot B

O = W + X

K = Tan^{-1}N/O

G = J = 90 – K

B = F = 180 – 2G

รูปที่ 7-54 รายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้กำหนดรูปร่างทางกายภาพของประแจ (สำหรับจุดตัดแบบเส้นตรง Straight Crossing)



ตารางที่ 7-22 และตารางที่ 7-23 แสดงค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบประแจโดยวิธีเส้นสัมผัส (Tangential) โดยแบ่งตามขนาดของทางรถไฟ

ตารางที่ 7-22 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบประแจโดยวิธีเส้นสัมผัส (Tangential) สำหรับทางรถไฟขนาดมาตรฐาน 1.435 เมตร

รัศมี (เมตร)	อัตราส่วนประแจ (1:N)	จุดตัด (มม.)	ความยาวก่อนถึงจุดตัด (มม.)	มุมของจุดตัด (องศา)
160	6.6	12052	20939	7.662236°
160	8.25	9662	21054	6.911227°
190	7	13503	22862	7.033006°
190	9	10523	22988	6.340192°
250	8.25	15096	26296	6.133080°
250	10.5	11878	26489	5.440332°
300	9	16616	28853	5.599601°
300	12	12478	29238	4.763642°
500	12	20797	37391	4.763642°
500	15	16648	37707	3.814075°
800	15	26637	46827	3.814075°
800	18.5	21606	47083	3.094058°
1000	20	25000	52790	2.864192°
1200	18.5	32409	56996	2.801473°
1200	24	24989	57754	2.385957°

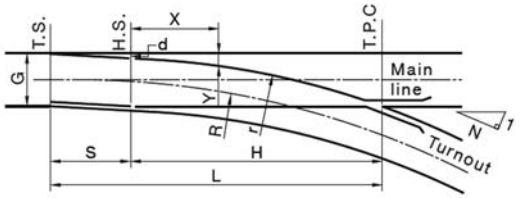
ตารางที่ 7-23 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบประแจโดยวิธีเส้นสัมผัส (Tangential) สำหรับทางรถไฟขนาด 1.0 เมตร

รัศมี (เมตร)	อัตราส่วนประแจ (1:N)	จุดตัด (มม.)	ความยาวรางนำ (มม.)	มุมของจุดตัด (องศา)
130	8.25	7850	16308	6.911227°
200	10	9975	20205	5.710593°
280	12	11646	23920	4.763642°
300/250	12	12060	24402	4.763642°
500	16	15610	31960	3.576334°
1235	25	24684	50213	2.290610°

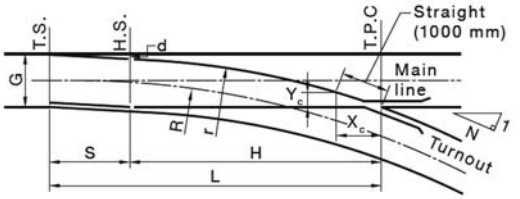
3) การออกแบบรูปร่างของประแจด้วยวิธี เส้นตัดวงกลม (Secant)

การออกแบบรูปร่างประแจด้วยวิธี เส้นตัดวงกลมนับเป็นวิธีแรกที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งการออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวจะทำให้ได้รูปร่างของประแจที่เรียบง่าย โดยช่วงลิ้นประแจจะเป็นเส้นตรงแล้วจึงตามด้วยเส้นโค้งในบริเวณหลังจากผ่านลิ้นประแจไปแล้วดังรูปที่ 7-55

ในหลายประเทศและโครงการระบบรางหลายแห่ง นิยมใช้ประแจที่ถูกออกแบบด้วยวิธี เส้นตัดวงกลม เนื่องจากไม่ยุ่งยากในการออกแบบและติดตั้ง รวมทั้งมีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้งานประแจแบบ เส้นตัดวงกลมโดยทั่วไปจะใช้กับสายทางที่มีความเร็วต่ำหรือในย่านสถานี



(a) Turnout with curved crossing



(b) Turnout with straight crossing

รูปที่ 7-55 ลักษณะของประแจที่ถูกออกแบบด้วยวิธี เส้นตัดวงกลม (Secant)

ตารางที่ 7-24 ตัวแปรและความหมายในการออกแบบประแจโดยวิธี เส้นตัดวงกลม (Secant)

ตัวแปร	ความหมาย
สันของลิ้นประแจ (HS)	ปลายลิ้นประแจมีหน้าตัดรางเต็ม
ปลายของลิ้นประแจ (TS)	ปลายบางของลิ้นประแจ (ปลายตรงข้ามสันของประแจ)
ตำแหน่งจุดตัดทางทฤษฎี	จุดตัดผ่านของเส้นแนวทาง ณ จุดตัด
รัศมี (R)	รัศมีของทางประธาน
รัศมี (r)	รัศมีของโค้งประแจ
ขนาดทาง (G)	ขนาดของทางรถไฟ
อัตราส่วนมุมประแจ (N)	อัตราส่วนของความเบี่ยงของประแจ



ตารางที่ 7-24 (ต่อ) ตัวแปรและความหมายในการออกแบบประแจโดยวิธี เส้นตัดวงกลม (Secant)

ตัวแปร	ความหมาย
มุมประแจ (α)	มุมประแจ หน่วยองศา
มุมลิ้นประแจ (B)	มุมระหว่างเส้นทางรถไฟและรางประคองลิ้น
กึ่งกลางของสัน (d)	ระยะห่างระหว่างเส้นทางรถไฟและสันของประแจ
ความยาวลิ้นประแจ (S)	ความยาวประแจจากสันถึงปลายของลิ้นประแจ
ทางนำช่วงสั้น (H)	ระยะห่างระหว่างสันลิ้นประแจถึงจุดตัดทางทฤษฎี (TPC) ที่วัดตามแนวเส้นทางประธาน
ทางนำ (L)	ระยะห่างระหว่างปลายลิ้นประแจถึงจุดตัดทางทฤษฎี (TPC) ที่วัดตามแนวเส้นทางประธาน

ในการออกแบบประแจแบบ เส้นตัดวงกลมจะใช้สมการดังต่อไปนี้ใช้สำหรับคำนวณหาค่ารายละเอียดทางกายภาพต่าง ๆ โดยจะมีเส้นโค้งที่เริ่ม ณ ตำแหน่งต่อจากลิ้นประแจวิ่งไปจนถึงจุดตัดทางทฤษฎีดังแสดงในรูปข้างต้น

$$Lead(L) = (G-d)Cot\left(\frac{1}{2(A+B)}\right)+S$$

$$Radius(r) = \frac{G-d}{\left[Cos(B)-Cos(A)\right]}$$

$$Offset(y) = d + x\,Tan\left[\frac{1}{2\left[B+Sin^{-1}\left(\frac{x}{r}+Sin(B)\right)\right]}\right]$$

โดยปกติระยะร่น (Y) จะคำนวณทุก ๆ 1 เมตรเพื่อความถูกต้องแม่นยำในขณะติดตั้งประแจ

7.7.3 อุปกรณ์และการติดตั้งประแจ

1) การก่อสร้างประแจ

(1.1) หลักการทั่วไปเกี่ยวกับการก่อสร้างประแจ

- ขนาดของทางและชิ้นส่วนประแจต้องอยู่พิกัดที่ยอมให้
- หินโรยทาง หมอนรองประแจ อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวต่าง ๆ จะต้องกระชับแน่นหนา



2) การประกอบชุดประแจ

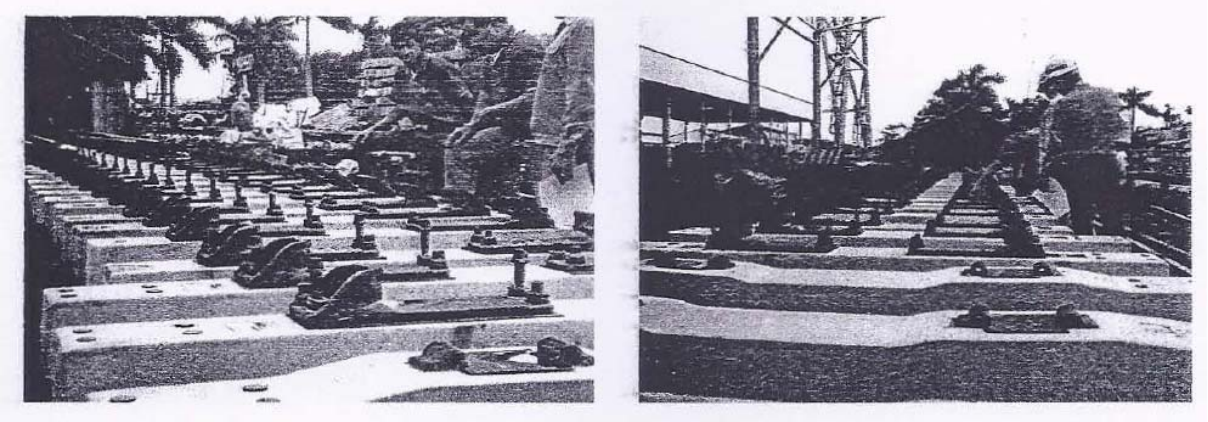
การประกอบชุดประแจ แยกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

- การประกอบชุดประแจนอกพื้นที่ก่อสร้าง (ในโรงงาน)
- การประกอบชุดประแจในพื้นที่ที่กำลังก่อสร้าง (ในจุดกำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง)

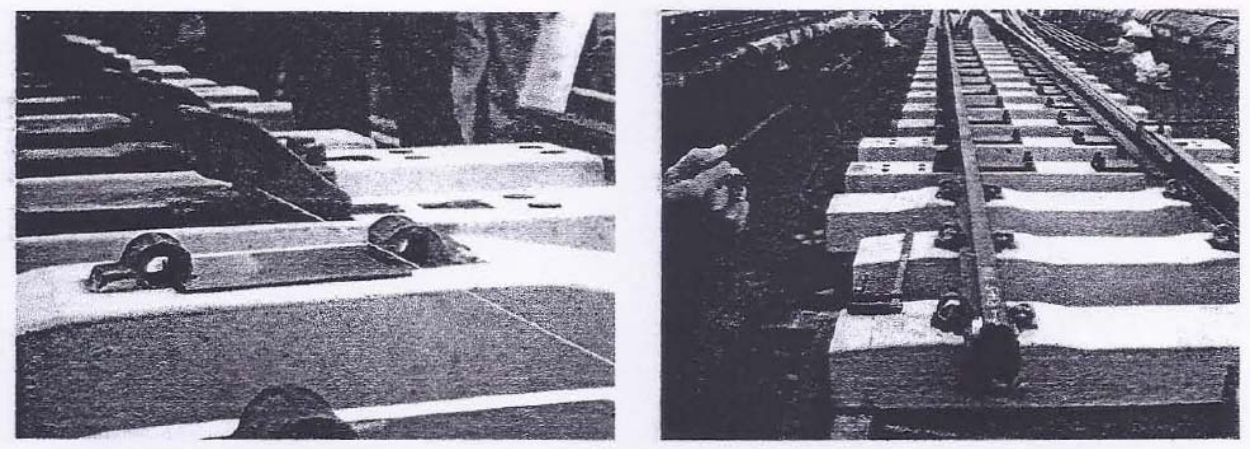
ในปัจจุบันนิยมทำการประกอบประแจให้สำเร็จบางส่วนมาจากโรงงานเนื่องจากการควบคุมคุณภาพระหว่างประกอบจะทำได้ง่าย รวมทั้งยังช่วยประหยัดเวลาในการทำงานซึ่งสำคัญอย่างยิ่งในสายทางที่มีการจราจรอยู่ตลอดเวลา โดยคู่มือฉบับนี้จะมีรายละเอียดของการประกอบประแจนอกพื้นที่ก่อสร้าง (ในโรงงาน) รวมไปถึงการวางประแจในจุดก่อสร้าง โดยมีขั้นตอนดังนี้

- เตรียมพื้นที่บริเวณที่จะดำเนินการประกอบประแจ โดยปรับพื้นที่ให้ได้ระดับ หรือจัดทำเป็นโครงเหล็ก และบล็อกระยะหมอนให้ได้ตามแบบ ซึ่งการทำโครงเหล็กจะทำให้การประกอบประแจง่ายและรวดเร็ว
- นำแบบประแจชุดนั้น ๆมาศึกษาดูให้เข้าใจรายละเอียดสัดส่วน และระยะต่าง ๆของประแจนั้น ๆ และให้ศึกษาแบบฟอร์มตารางต่าง ๆที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประกอบประแจ
- ทำการตรวจสอบชิ้นส่วนความยาวของรางและอุปกรณ์ว่าครบตามจำนวน และมีสภาพเรียบร้อยและมีขนาดถูกต้องตามแบบ
- ในกรณีที่มีข้อจำกัดเรื่องการบรรทุกขนส่ง การประกอบประแจในโรงงานนั้นอาจจะดำเนินการเพียง 2 ส่วนเท่านั้น คือ ชุดลิ้นกับชุดตะเฆ่ ส่วนชุดหมอนยาวจะขนวัสดุไปประกอบหน้างานใกล้กับจุดที่จะติดตั้ง แต่หากไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการขนส่ง ก็อาจทำการประกอบประแจให้เสร็จทุกๆส่วน ทั้งชุดลิ้น ชุดตะเฆ่และชุดหมอนยาว จากนั้นจึงนำส่วนประกอบสำเร็จรูปไปติดตั้งลงที่จุดก่อสร้างต่อไป
- นำหมอนคอนกรีตมาวางเรียงกันตามลำดับหมอนซึ่งปั้มเลขไว้ที่หัวหมอนและหันด้านหัวหมอนให้ถูกต้องตามลักษณะของประแจที่เลี้ยวขวาหรือซ้าย จัดระยะหมอนให้ได้ตามแบบ โดยดูจากตารางวิธีการติดตั้ง
- นำแผ่นพลาสติก หรือยางวางลงบนหมอน ตามด้วย Base Plate และปูทับด้วยแผ่นยาง ตามเบอร์ที่ระบุไว้ในตารางวิธีการติดตั้งแล้วยึดด้วยสกรู ยกเว้น Slide Base Plate และเหล็กยันรางลิ้นให้ใส่ติดกับรางประคองลิ้นให้เรียนร้อยก่อนยึดติดกับหมอน
- นำชิ้นส่วนของประแจขึ้นวางบน Base Plate ตามตำแหน่งในแบบ โดยวางให้ต่อกันให้เป็นรูปประแจอย่างหยาบๆก่อน แล้วขีดตำแหน่งหมอนที่ตีนรางประคองลิ้น โดยวัดระยะตามที่ระบุไว้ในตารางที่จัดทำไว้ และให้สังเกตความยาวของรางด้วยว่าใช้ความยาวรางวางถูกตำแหน่งหรือไม่

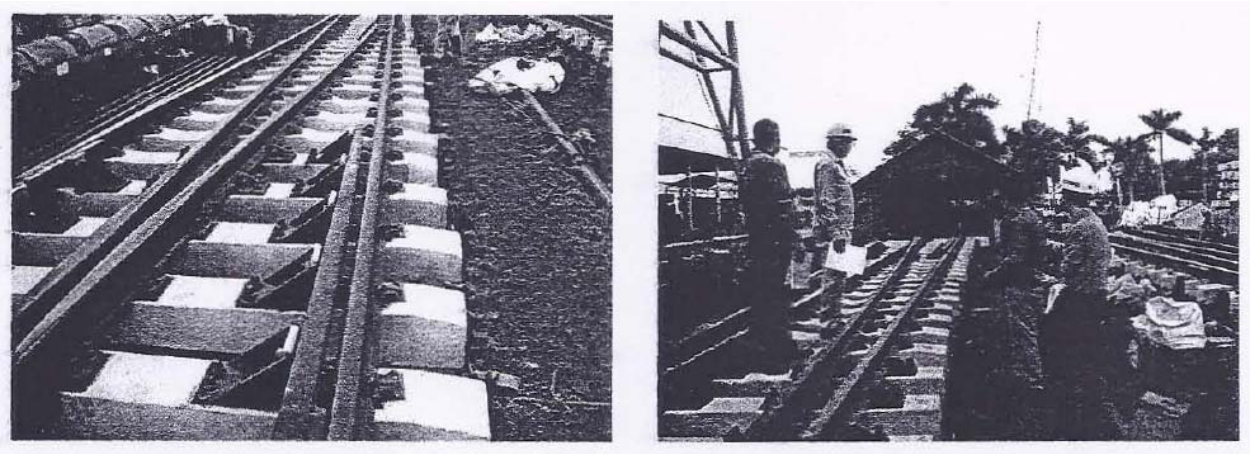
- เลื่อนหมอนคอนกรีตให้เข้าจุดที่ขีดไว้ที่ตีนรางตามลำดับตลอดชุดประแจ ใส่คลิปยึดตีนรางประคองลิ้นกับ Slide Base Plate หรือ Base Plate เฉพาะรางประคองลิ้นและ รางเสริมด้านทางตรงตลอดชุดประแจก่อนเป็นอันดับแรก เสร็จแล้วดัดแนวให้ได้แนวตรงโดยใช้เส้นเชือกขึง
- วัดระยะจากต่อปลายลิ้นถึงปลายลิ้นโค้งและช่องว่าง Running Edge ถึง Running Edge ที่ต่อโคนลิ้นให้ได้ตามแบบกำหนดจัดรางลิ้นให้ได้ แล้วใส่คลิปยึดรางลิ้นกับ และใส่เต้าโคนลิ้น Base Plate (บันทึกข้อมูลไว้ในตารางแบบตรวจสอบชุดประแจ)
- วัดระยะจากจุดตัดประแจถึงต่อท้ายตะเฆ่ให้ได้ระยะตามที่กำหนดไว้ในแบบหรือ วัดระยะจากต่อโค้นลิ้นถึงต่อหน้าตะเฆ่ให้ได้ความยาวเท่ากับความยาวรางเสริมลิ้นโค้ง และวัดขนาดทางที่ต่อหน้าและต่อท้ายตะเฆ่ให้ได้ตามแบบที่กำหนดแล้วใส่คลิ๊ปยึดชุดหัวตะเฆ่กับ Base Plate วัดระยะ Running Edge ถึง Running Edge ของรางเสริมรางลิ้นโค้งตามจุดที่กำหนดไว้ในแบบให้ได้ตามที่แบบกำหนดแล้วใส่คลิปยึดรางกับ Base Plate ข้อมูลค่าพิกัดที่กำหนดดูได้จากตารางแบบตรวจสอบชุดประแจ
- จัดต่อปลายลิ้นด้านรางประคองลิ้นโค้งให้ได้ฉากกับด้านรางประคองลิ้นตรง แล้วจัดหมอนให้เข้าจุดที่ขีดไว้ที่ฐานรางอีกครั้ง วัดขนาดทางที่ต่อปลายลิ้นและตามที่จุดบังคับในทางแยกตลอดชุดประแจ โดยใช้ข้อมูลค่าพิกัดที่กำหนดไว้ในตารางแบบตรวจสอบชุดประแจ แล้วใส่คลิปยึดรางประคองลิ้นกับ Slide Base Plate หรือ Base Plate
- วัดระยะจากต่อปลายลิ้นถึงปลายลิ้นตรง วัดช่องว่าง Running Edge ถึง Running Edge และวัดขนาดทางที่ต่อโคนลิ้นให้ได้ตามที่แบบกำหนด โดยดูข้อมูลได้จากตารางแบบตรวจสอบชุดประแจ แล้วใส่คลิปยึดรางลิ้นกับ Base Plate
- ใส่รางเสริมรางลิ้นตรงเพื่อเชื่อมรางลิ้นตรงกับชุดตะเฆ่ ดัดแนวรางเสริมให้ตรงแล้วใส่คลิปยึดรางกับ Base Plate
- ติดรางกันทั้งสอบเส้นให้ได้ตามที่กำหนดไว้ในแบบ โดยดูข้อมูลค่าพิกัดต่าง ๆได้จากแบบและตารางตรวจสอบชุดประแจ



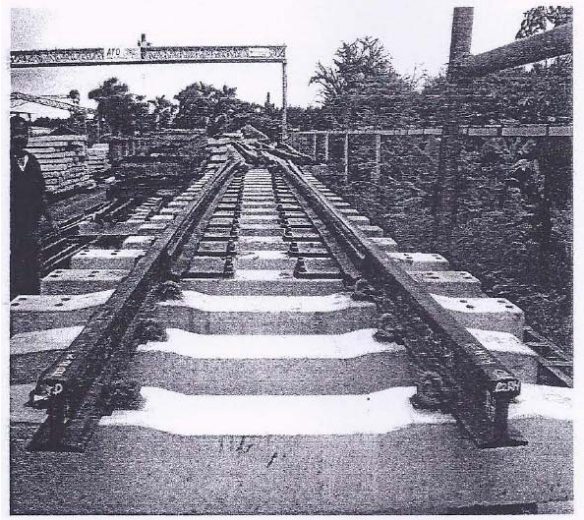
รูปที่ 7-56 การนำหมอนประแจคอนกรีตมาติดตั้งเรียงบนโครงเหล็ก และใส่ Base Plate



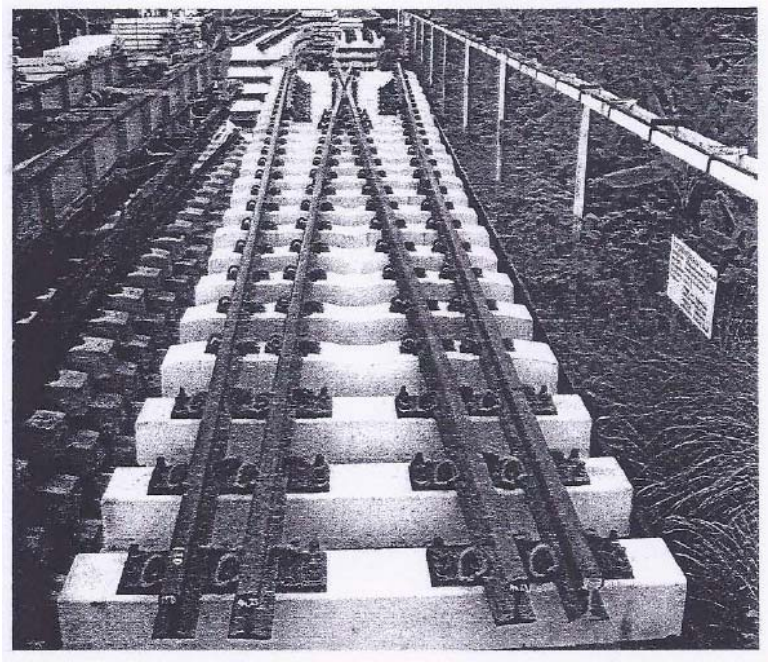
รูปที่ 7-57 (ซ้าย)การปรับแต่งหมอนให้ได้แนวตรง (ขวา)การประกอบรางประคองลิ้น และรางลิ้น



รูปที่ 7-58 การประกอบชุดตะเฆ่ และรางกันบนหมอนคอนกรีต



รูปที่ 7-59 ชุดลิ้นที่ประกอบเสร็จแล้ว



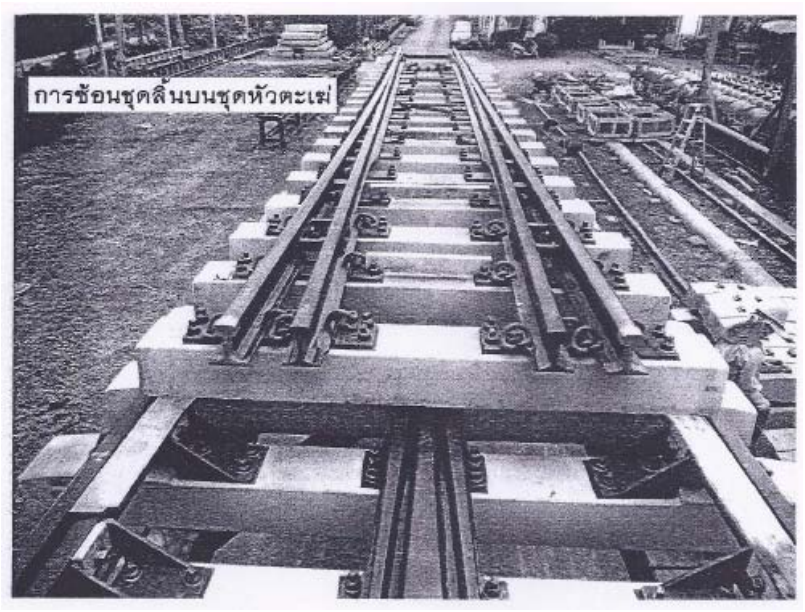
รูปที่ 7-60 ชุดหัวตะเฆ่ที่ประกอบเสร็จแล้ว

3) การตรวจสอบชุดประแจหลังประกอบเสร็จ

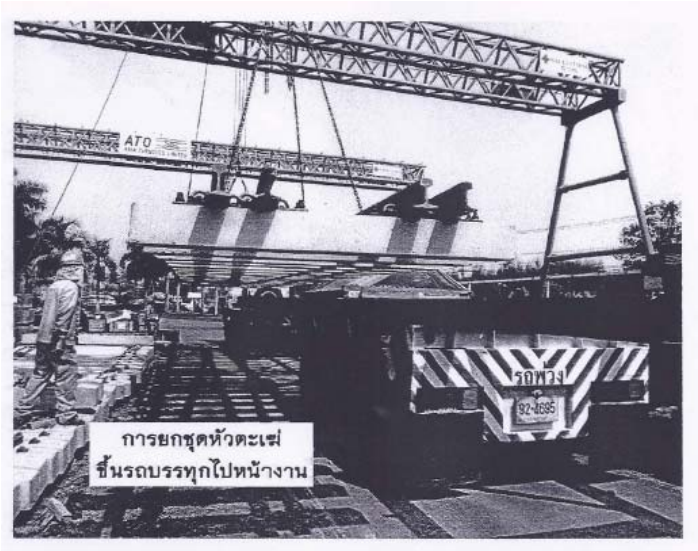
เมื่อประกอบชุดประแจเสร็จสมบูรณ์แล้ว ก่อนที่จะนำชุดประแจไปติดตั้งในทางให้ตรวจสอบความถูกต้องของพิกัดต่าง ๆอีกครั้ง ตามแบบฟอร์มที่จัดทำขึ้น โดยให้ผู้ควบคุมงานตรวจสอบและเซ็นชื่อรับรองทุกชุดประแจที่จะนำไปติดตั้ง ถ้าหากว่ายังไม่นำไปติดตั้งการเก็บกองสต๊อกชุดประแจ ไม่สมควรนำมาตั้งซ้อนกัน โดยเฉพาะชุดลิ้นประแจเนื่องจากจะทำให้ลิ้นประแจคดได้ถ้าพื้นที่รองรับไม่แข็งแรงและได้ระดับ

4) การขนส่งชุดประแจไปติดตั้งที่หน้างาน

การบรรทุกชุดประแจส่งไปหน้างานจะกระทำโดยใช้รถเทลเลอร์ขนาดใหญ่และใช้รถเครนยกชุดประแจขึ้นหรือลง การยกชุดประแจขึ้นบรรทุกให้ยกชุดตะเฆ่ขึ้นก่อนแล้วยกชุดลิ้นซ้อนด้านบน สำหรับชุดลิ้นประแจก่อนยกให้ล็อคลิ้นอยู่ในท่าลิ้นปิดทั้งสองลิ้นป้องกันลิ้นประแจคด เสร็จแล้วยกหมอนยาวขึ้นบรรทุกเพื่อนำไปประกอบเป็นชุดหมอนยาวที่หน้างาน การยกชุดประแจขึ้นหรือลง ห้ามใช้โซ่หรือสลิงเกี่ยวที่รางลิ้นโดยเด็ดขาด



รูปที่ 7-61 การวางซ้อนชุดลิ้นบนชุดหัวตะเฆ่



รูปที่ 7-62 การยกชุดหัวตะเฆ่ที่ประกอบเสร็จแล้วขึ้นรถบรรทุก



รูปที่ 7-63 การวางซ้อนหมอนยาวเพื่อขนไปหน้างาน



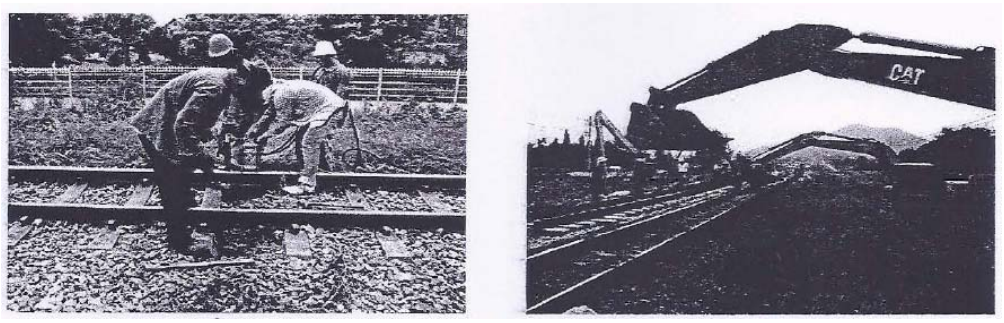
รูปที่ 7-64 การขนชุดประแจไปหน้างาน

5) การเตรียมงานก่อนการติดตั้งชุดประแจ

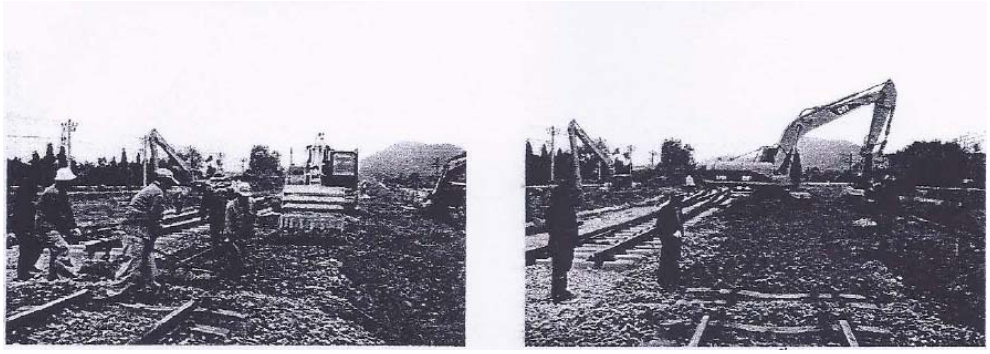
- ต้องไปกำหนดจุดตัดประแจและ จุดหน้า-ท้ายประแจในพื้นที่จริงให้ถูกต้องถ้าหากว่ามีชุดประแจอีกชุดรองรับอยู่หรือเป็นชุดประแจแบบบันไดเดี่ยวต้องใช้กล้องแนวเปิดมุมกำหนดจุดตัดประแจ
- ประกอบชุดหมอนยาวตามแบบที่กำหนดโดยให้ได้ระยะหมอน และหัวต่อรางได้ฉากกัน
- ให้จัดทำรางประสานไว้เพื่อติดตั้งไว้ที่หน้า-ท้ายประแจ และประกอบรางประสานกับหมอนคอนกรีตธรรมดาทั่วไปสำหรับการติดตั้งไว้ที่หน้าชุดประแจ ส่วนที่เลยจากหมอนยาวให้ใช้หมอนธรรมดาทั่วไป

<u>จัดเตรียมวัสดุทาง</u>

- ถ้ามีข้อกำหนดให้เปลี่ยนดิน Sub Base ก็ให้เตรียมดิน Sub Base ที่ได้ผ่านการตรวจสอบและได้ทำการทดสอบในสนามได้ความแน่น 95โดยบันทึกจำนวนรอบในการใช้รถบดชนิดสั่นสะเทือนวิ่งบด % ทับ
- หินโรยทางที่ผ่านการตรวจสอบตามข้อกำหนดเรียบร้อยแล้ว
- เตรียมเครื่องประกอบราง เครื่องมือเครื่องใช้ แรงงานและเครื่องจักรกล ให้พร้อมก่อนเวลาปิดทางไม่น้อยกว่า 2 ชม.



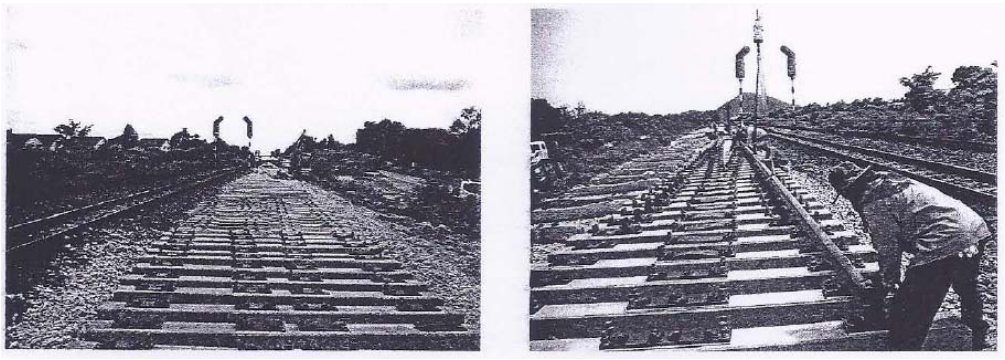
รูปที่ 7-65 (ซ้าย) การตัดรางเพื่อวางชุดประแจ (ขวา) การยกรางเดิมออก



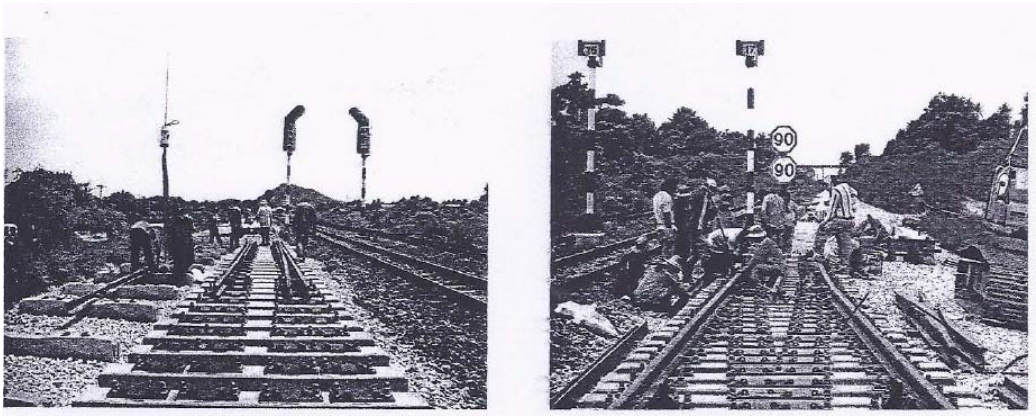
รูปที่ 7-66 (ซ้าย) การขุดหินเดิมออก (ขวา) การปรับแต่งพื้นทาง



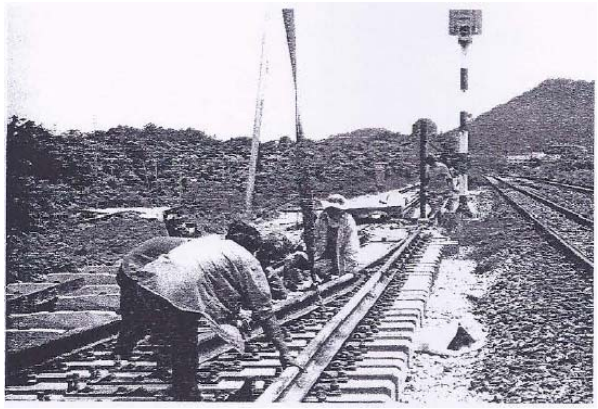
รูปที่ 7-67 การนำหมอนคอนกรีตมาเรียงในตำแหน่งที่จะวางประแจ



รูปที่ 7-68 (ซ้าย) การเรียงหมอนพร้อมใส่ Base Plate (ขวา) การใส่ และการวางรางประคองลิ้น Base Plate



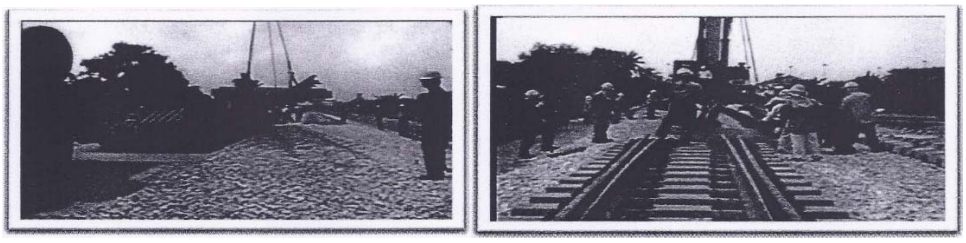
รูปที่ 7-69 การใส่ Base Plate และการวางรางประคองลิ้นตรง



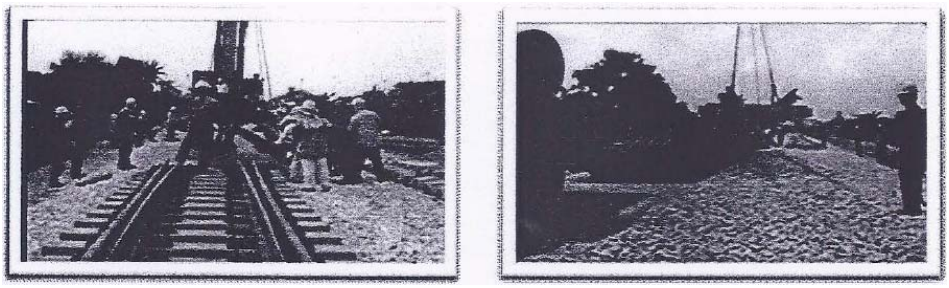
รูปที่ 7-70 การวางรางเสริมลิ้นโค้ง

6) การติดตั้งชุดประแจที่ประกอบมาจากโรงงานมาวางในตำแหน่งที่กำหนดไว้ในแบบ

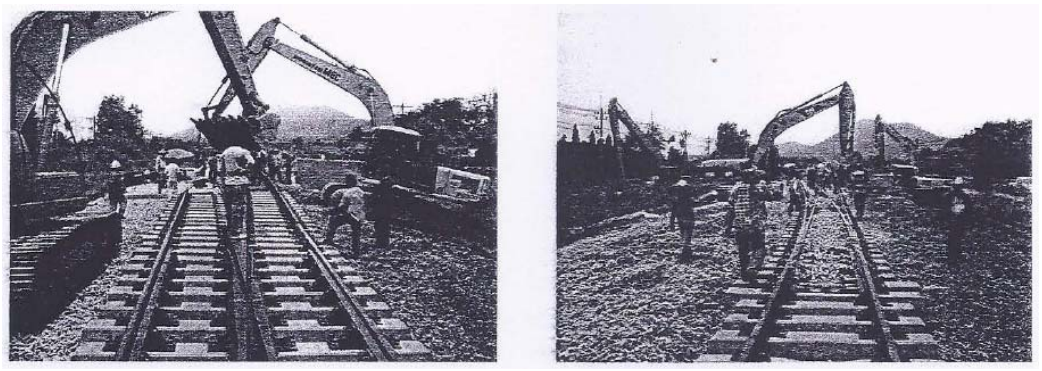
- ใช้เครนยกชุดประแจจากรถเทลเลอร์ลงมาวางบนพื้นที่ที่เตรียมไว้ โดยวางให้จุดตัดประแจได้ตามตำแหน่งที่ปักไว้ ตามด้วยชุดหัวตะเฆ่ และยกหมอนยาวลงมาเรียงตามลำดับหมอนแล้วจัดระยะหมอนให้ได้ตามแบบ ใส่แผ่นพลาสติก Base Plate แผ่นยาง และนำรางมาวางต่อท้ายตามตำแหน่งหมอนที่ต่อรางโดยวัดระยะตามที่กำหนดไว้ในแบบ เลื่อนหมอนคอนกรีตให้เข้าจุดที่ขีดไว้ที่ฐานราง ใส่คลิปยึดรางกับหมอนคอนกรีต
- ดึงแนวศูนย์กลางทางจากหมุดที่ปักไว้หน้าชุดประแจไปที่หมุดท้ายประแจด้วยเชือก แล้วดัดแนวชุดประแจให้ได้ตามแนวที่ขึงด้วยเส้นเชือก



รูปที่ 7-71 การยกชุดประแจที่ประกอบในโรงงานมาวางในตำแหน่งที่กำหนดไว้



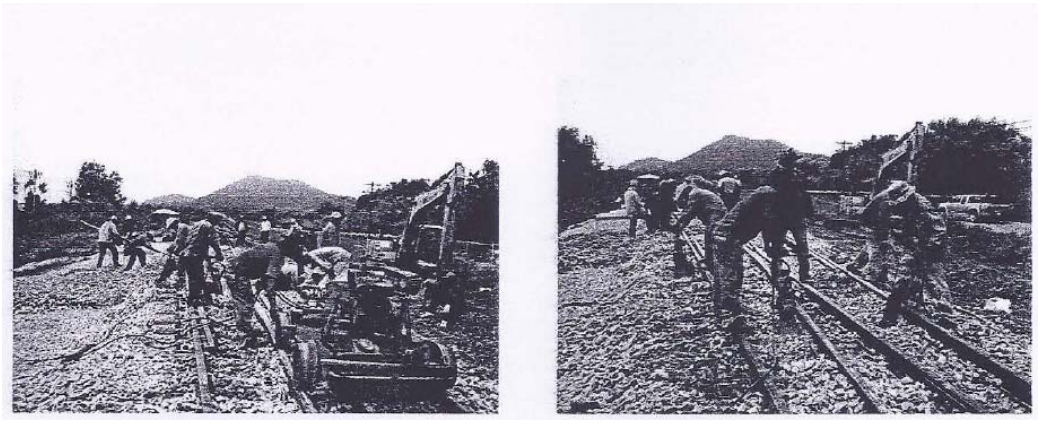
รูปที่ 7-72 การลงหินพร้อมวางชุดลิ้น และชุดตะเฆ่



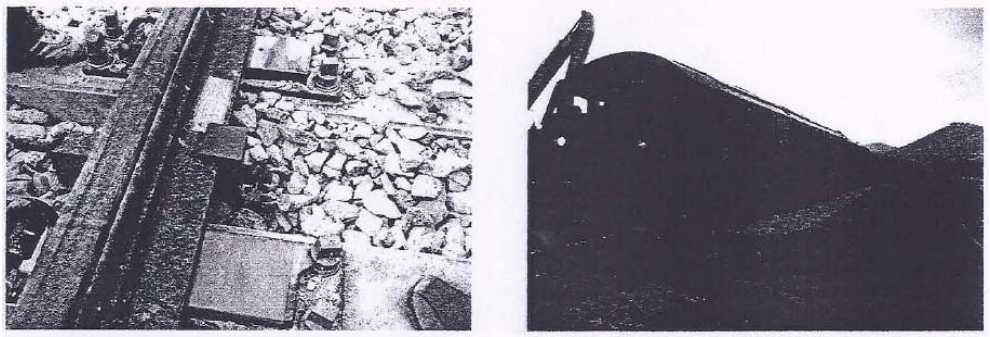
รูปที่ 7-73 (ซ้าย) การวางชุดหมอนยาว (ขวา) การใส่หินในชุดประแจ

7) การลงหินโรยทาง และการยกรางอัดหินในประแจ

ขั้นตอนนี้จะดำเนินการเมื่อการวางรางเชื่อมยาววางมาชนโดยลงหินโรยทางด้วยรถโรยหิน และอัดหินด้วยรถอัดหินในประแจ 2 รอบ ในรอบแรกยกรางขึ้น 5 ซม. แล้วอัดเที่ยวที่สอง ยกรางอัดหินให้ได้ระดับตามที่กำหนดไว้ในแบบลงหินโรยทางและแต่งหินให้ได้รูปตามแบบที่กำหนดไว้ แล้วเชื่อมเทอร์มิทหัวต่อราง



รูปที่ 7-74 การอัดหินด้วยเครื่องอัดหิน



รูปที่ 7-75 (ซ้าย) การล็อคคลิ้นประแจ (ขวา) การเปิดให้ขบวนรถวิ่งผ่าน



รูปที่ 7-76 ประแจที่ที่ประกอบในพื้นที่ก่อสร้างเสร็จแล้ว



รูปที่ 7-77 การตรวจสอบประแจเมื่อประกอบเสร็จ



7.7.4 การตรวจสอบและความคลาดเลื่อนที่ยอมให้ของประแจและจุดตัด

ตารางที่ 7-25 พิกัดการใช้งานของส่วนประกอบประแจแบบเชื่อม (welded turnout) ที่ยอมให้

S/N	inspection item		Allowable deviation (mm)
1	Direction of turnout	Straight line (10m chord measurement)	4
		Offset of lead curve	+2, -2
2	Gauge	Actual point of switch rail	+1, -1
		Heel of switch rail	+1, -1
		Other parts	+3, -2
3	The close contact with the stock rail from the actual point of switch rail to the primary traction point		Gap at joint < 0.2
4	The close contact of other parts of switch rail with stock rail		Gap at joint < 1
5	The close contact of the actual point of frog within the range of 460mm with wing rail		Gap at joint < 0.5
6	The close contact of other parts of frog with wing rail		Gap at joint < 1
7	The gap between the distance block and switch rail or between two movable-point frog rail webs		<0.5
8	The opening distance between the non-working side of heel of switch rail and working side of stock rail		+1, -1
9	Point-toe distance		+10, -10
10	Throat width of movable point frog		+3, -3
11	Flange-way width		+1, -0.5
12	Throw of switch (switch rail, movable frog)		+3, -3
13	Staggered length of turnout head and tail joints		<15
14	Space and declination of turnout ties		+20, -20
15	Staggered length of actual point of switch rail		<10



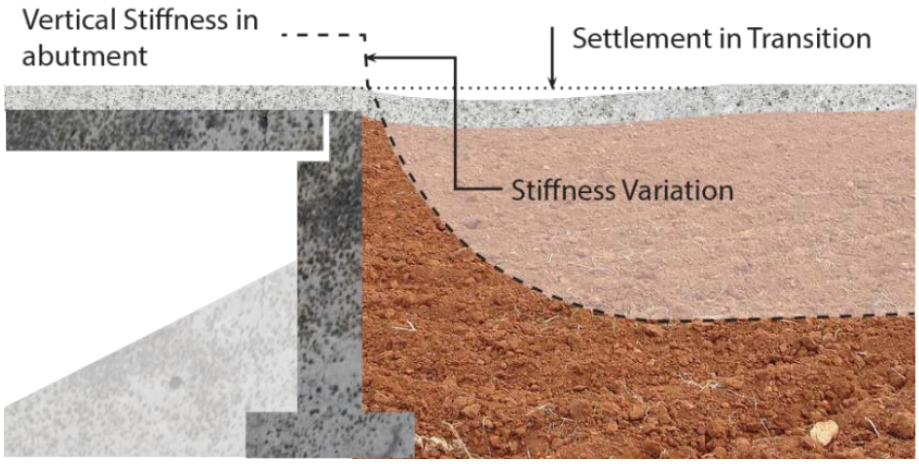
ตารางที่ 7-26 พิกัดการใช้งานของส่วนประกอบประแจแบบต่อ (jointed turnout) ที่ยอมให้ [80]

S/N	inspection item		Allowable deviation (mm)
1	Direction of turnout	Straight line (10m chord measurement)	4
		Offset of lead curve	+2, -2
2	Gauge	Actual point of switch rail	+1, -1
		Other parts	+3, -2
3	Smallest flange-way of non-working surface of switch rail		-2
4	The gap between the distance block and switch rail or between two movable-point frog rail webs		<1
5	The opening distance between the non-working side of heel of switch rail and working side of stock rail		+1, -1
6	Flange-way width		+3, -1
7	Joint	Rail ends unevenness in line and on surface	<1
		Staggered length of the head and tail joints	<15
		The different between the actually measured average value and design value of rail gap	+2, -2
8	Space and declination of turnout ties		+20, -20
9	Staggered length of actual point of switch rail		<10

บทที่ 8 การออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน (Transition Zone)

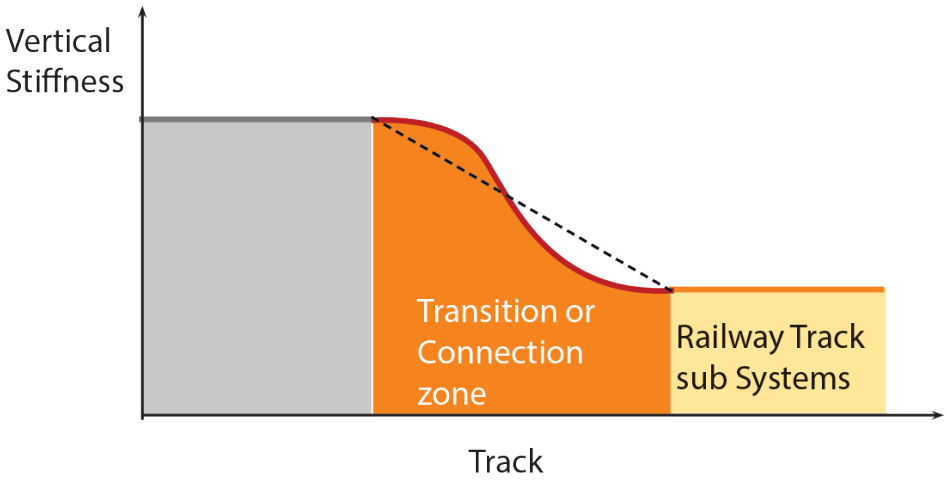
8.1 บทนำ

บริเวณที่มีการเชื่อมต่อระหว่างทางรถไฟบนโครงสร้างต่างชนิดกัน เช่น จุดต่อระหว่างทางรถไฟบนหินโรยทางและทางรถไฟบนพื้นคอนกรีต รวมไปถึงทางรถไฟเข้าสู่สะพานนั้น จะถูกพิจารณาให้เป็นบริเวณจุดเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ (Transition Zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเกร็ง (Track Stiffness) ของทางรถไฟแบบทันทีทันใด โดยคุณสมบัติดังกล่าว จะส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของรถไฟ และจะทำให้เกิดแรงกระแทกจากล้อที่เพิ่มขึ้นยังผลให้เกิดความเสียหายอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป ถึงแม้บริเวณดังกล่าวนั้น จะครอบคลุมระยะทางไม่มาก เมื่อเทียบกับความยาวของสายทางทั้งหมด แต่ก็นับได้ว่าเป็นสาเหตุอันดับต้น ๆ ที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบทาง และยังส่งผลต่อความรู้สึกสบายของผู้โดยสารอีกด้วย แสดงดังรูปที่ 8-1 แสดงตัวอย่างการทรุดตัวของดินบริเวณคอสะพานเนื่องจากความแตกต่างของค่าความแข็งเกร็งระหว่างสะพานและคันดินบริเวณจุดเชื่อมต่อ



รูปที่ 8-1 ปัญหาการทรุดตัวของดินบริเวณคอสะพาน

ดังนั้น หลักการสำหรับการออกแบบบริเวณดังกล่าวคือมีการจัดการค่าความแข็งเกร็งบริเวณจุดเปลี่ยนผ่านให้แปรเปลี่ยนอย่างค่อยเป็นค่อยไปรวมไปถึงตรวจสอบและควบคุมการสั่นสะเทือนของรถไฟไม่ให้เกิดการกระแทกที่รุนแรงเกินไป ทั้งนี้ ก็เพื่อลดอัตราความเสียหายและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงทาง



รูปที่ 8-2 ค่าความแข็งเกร็งของทางรถไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน

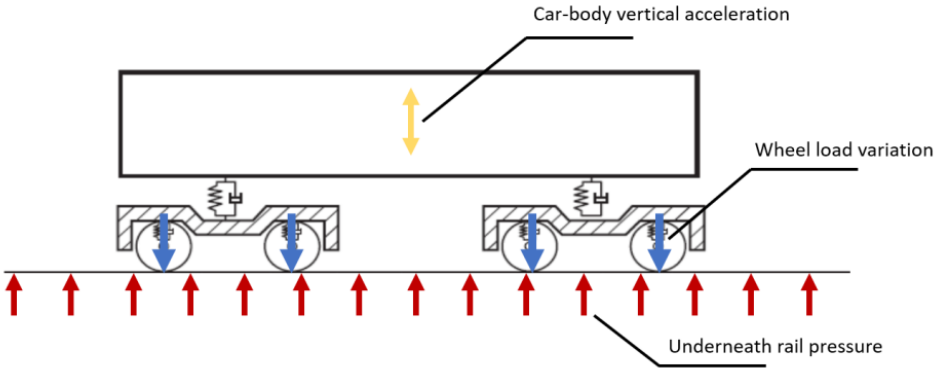
8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างทางรถไฟและโครงสร้างอื่น ๆ

ในการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน (Transition Zone) ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปแบบของโครงสร้าง เช่น ทางรถไฟบนพื้นดินไปสู่สะพาน ทางรถไฟบนพื้นดินอุโมงค์ ทางรถไฟบนหินโรยทางไปสู่ทางรถไฟบนพื้นคอนกรีต จะต้องคำนึงถึงการสั่นสะเทือนของรถไฟที่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความแข็งเกร็งโดยรวม (Total Stiffness) ของระบบโครงสร้างทาง ซึ่งหลักการในการออกแบบและก่อสร้างคือ จัดการค่าความแข็งเกร็งให้เปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป (Gradual Variation Of Track Stiffness) เพื่อลดการกระแทกของล้อรถไฟให้น้อยที่สุด โดยมีรายละเอียดของหลักการวิเคราะห์และออกแบบดังนี้

8.3 หลักการวิเคราะห์และออกแบบ

จากมาตรฐาน มขร S-T-008 “มาตรฐานตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ” ได้กำหนดค่าตัวแปรที่ต้องควบคุมในการออกแบบทางบริเวณจุดเปลี่ยนผ่านไว้ดังนี้ และแสดงดังรูปที่ 8-3

- ค่าความเร่งแนวดิ่งสูงสุดของตัวรถไม่เกิน 1.3 เมตร/วินาที^{2}
- การเปลี่ยนแปลงสูงสุดของแรงแนวดิ่งที่ล้อไม่เกิน 60 เปอร์เซ็นต์
- แรงกดขั้นต่ำใต้ราง ไม่ต่ำกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

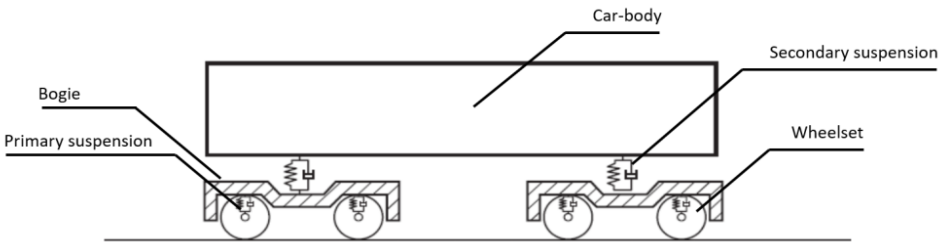


รูปที่ 8-3 ตัวแปรที่ต้องควบคุมในการออกแบบทางรถไฟบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน

โดยการวิเคราะห์จะต้องสามารถจำลองพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของตัวรถและทางรถไฟ (vehicle and track dynamics) ให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง ซึ่งสามารถแบ่งระบบออกเป็นส่วนของรถไฟและทางรถไฟได้ดังนี้

8.3.1 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ (Railway vehicle dynamic model)

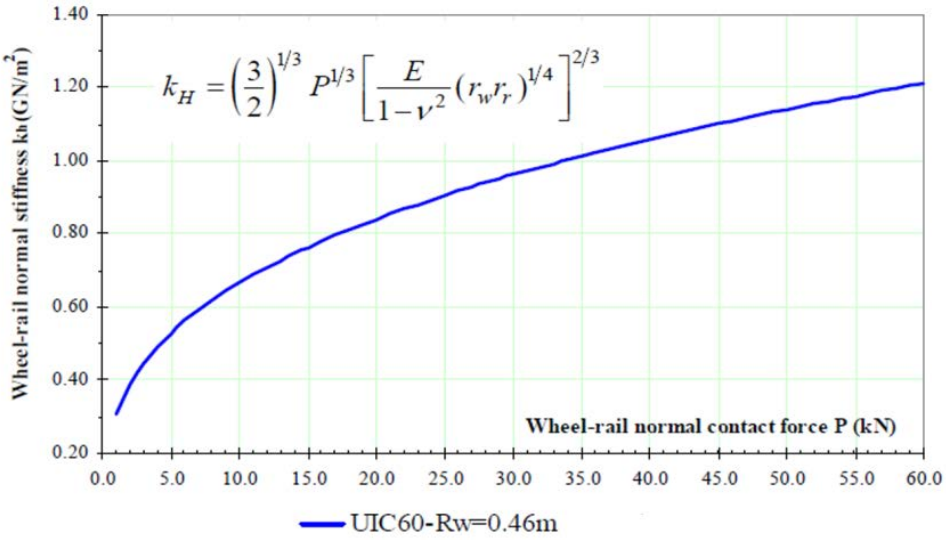
ตัวรถไฟสามารถจำลองให้อยู่ในรูปของระบบมวลสปริงและแดมเปอร์ (mass & spring& damper system) สำหรับรถไฟทั่วไปในปัจจุบันนั้นระบบมวลจะแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักคือ 1) ตัวรถ (car-body) 2) โบกี้ (bogie) และ 3) ชุดล้อ (wheelset) โดยในส่วนของระบบสปริงจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1) ระบบรองรับระหว่างชุดล้อกับโบกี้ (primary suspension) และ 2) ระบบรองรับระหว่างโบกี้และตัวรถ (secondary suspension) ดังรูปที่ 8-4



รูปที่ 8-4 องค์ประกอบของแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ

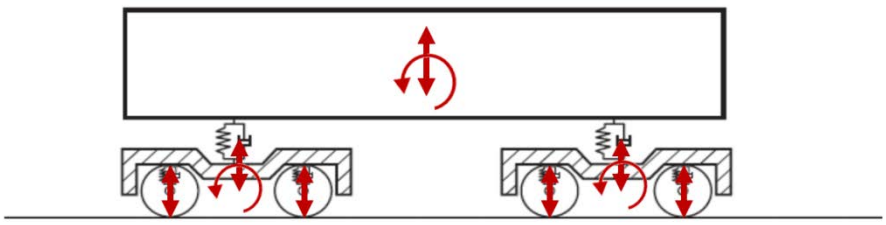
ทั้งนี้ ในการวิเคราะห์อาจต้องคำนึงถึงรายละเอียดของการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง (Wheel-Rail Interaction) ซึ่งเป็นจุดที่มีความซับซ้อนสูง โดยในบริเวณจุดสัมผัสจะเกิดทั้งแรงในแนวดิ่ง แรงในแนวราบ รวมทั้งการบิดบนผิวสัมผัส นอกจากนี้ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างหน้าสัมผัสของล้อและรางจะทำให้เกิดการเลื่อนไถล (Creepage) ซึ่งส่งผลต่อแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าวด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์ที่เน้นถึงการคำนวณความเร่งบนตัวรถเป็นหลักนั้น อาจใช้สมมุติฐานอย่างง่าย (Simplified Assumption) เช่น สมมุติให้การสัมผัสกันของล้อและรางเป็นระบบสปริงเชิงเส้น (Linear Spring) ตามทฤษฎีของ Hertz เป็นต้น ทั้งนี้ การใช้สมมุติฐานดังกล่าว จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ (Validation) เพื่อให้ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเกร็งและแรงกดที่ล้อบริเวณจุดสัมผัส ตามทฤษฎีของ Hertz ดังรูปที่ 8-5



รูปที่ 8-5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเกร็งและแรงกดที่ล้อบริเวณจุดสัมผัส ตามทฤษฎีของ Hertz

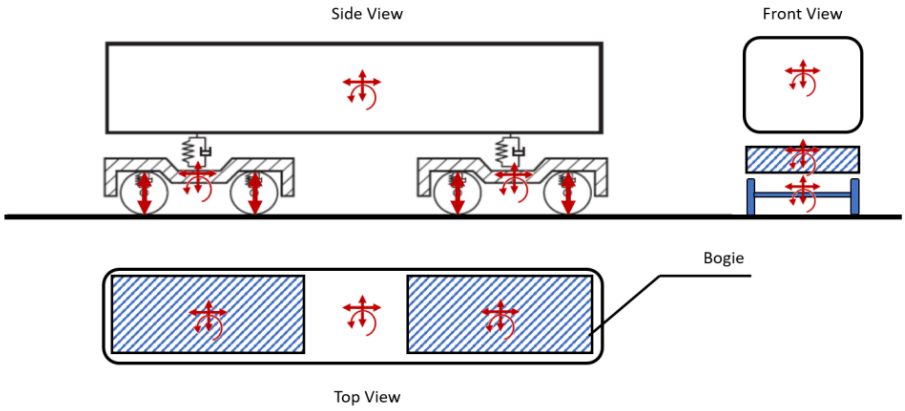
สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนบริเวณทางตรง ซึ่งการสั่นสะเทือนหลักจะมาจากการเคลื่อนที่แนวดิ่งนั้น จะสามารถสร้างแบบจำลองให้เป็นลักษณะสองมิติ โดยมวลของรถไฟจะมีการเคลื่อนที่หลักคือ การขยับขึ้นลง (Bounce) และการกระดก (Pitch) ดังรูปที่ 8-6



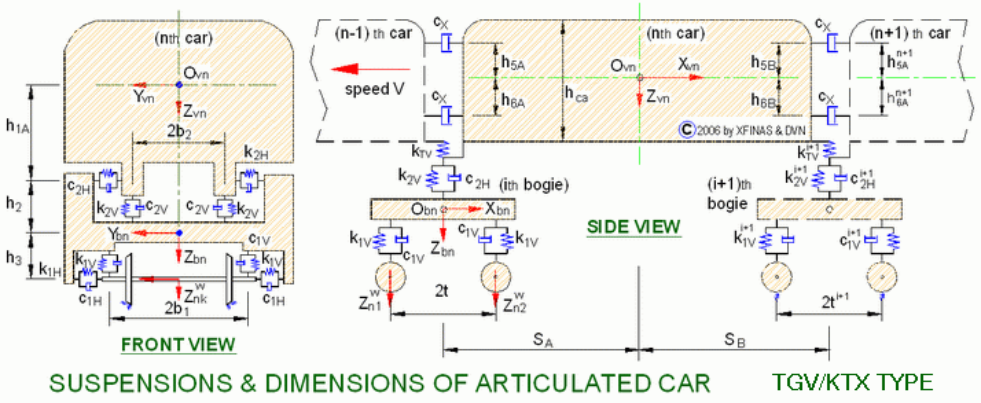
รูปที่ 8-6 การเคลื่อนที่ (Degree Of Freedom) ของแบบจำลองรถไฟในระนาบสองมิติ

ในบางกรณีที่การสั่นสะเทือนทางด้านข้างมีความรุนแรงกว่าปกติ เช่น บริเวณทางโค้ง หรือเส้นทางที่มีความขรุขระสูง อาจจำเป็นต้องใช้แบบจำลองแบบสามมิติ ซึ่งการเคลื่อนที่ของตัวรถในทิศทางต่าง ๆจะมีมากขึ้น โดยมีการขยับขึ้นลง (Bounce) การขยับด้านข้าง (Lateral) การเอียง (Roll) การกระดก (Pitch) และการเลี้ยว (Yaw)

นอกจากนี้ ในกรณีที่แรงในแนวยาว (Longitudinal Forces) มีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของรถไฟ อาจจำเป็นต้องเพิ่มการเคลื่อนที่ในแนวยาว (Longitudinal Movement) เข้าไปในแบบจำลองด้วยเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 8-7 และ รูปที่ 8-8 แสดงตัวอย่างแบบจำลองรถไฟ TGV ในระนาบสามมิติ



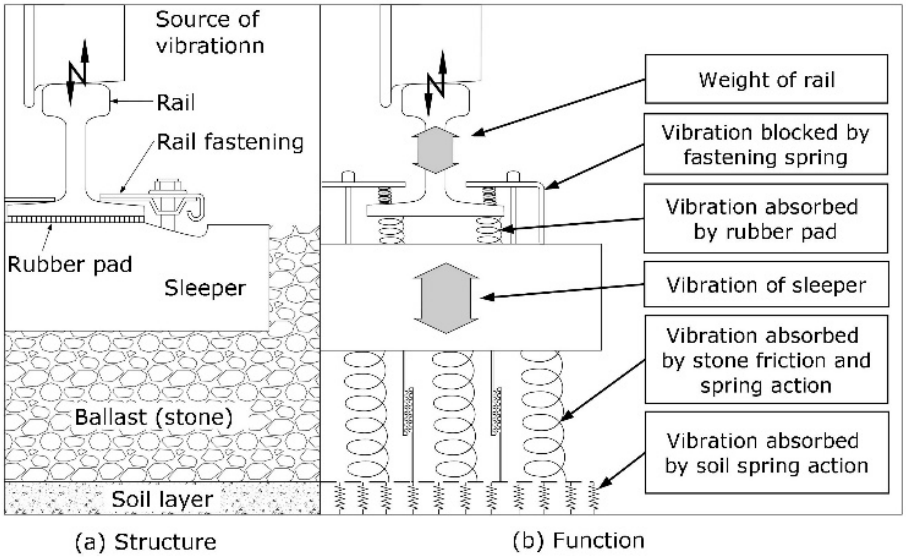
รูปที่ 8-7 การเคลื่อนที่ (Degree Of Freedom) ของแบบจำลองรถไฟในระนาบสามมิติ



รูปที่ 8-8 ตัวอย่างแบบจำลองรถไฟ TGV ในระนาบสามมิติ

8.3.2 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของทางรถไฟ (Track dynamic model)

ทางรถไฟประกอบด้วยองค์ประกอบหลายส่วน โดยพฤติกรรมการรับน้ำหนักจะเริ่มจากล้อรถไฟกดลงสู่ราง จากนั้นแรงจะกระจายลงหมอนแต่ละท่อนรอบ ๆ ตำแหน่งของแรงที่กระทำผ่านทางอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง หมอนจะทำหน้าที่กระจายแรงอีกชั้นผ่านทางพื้นผิวสัมผัสใต้หมอนลงสู่ชั้นหินโรยทางและลงสู่พื้นดินในที่สุด แสดงดังรูปที่ 8-9

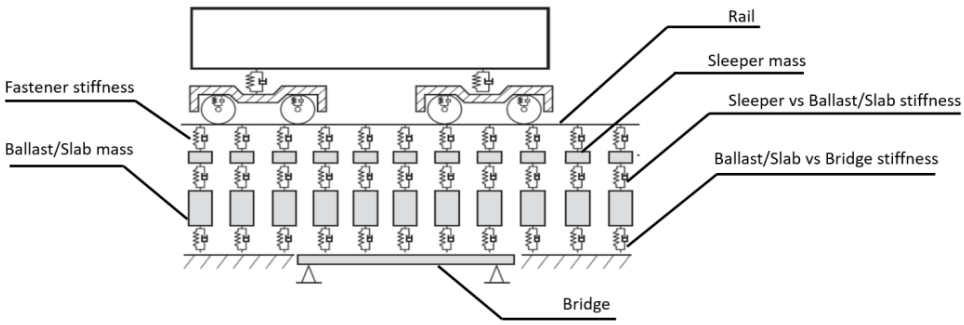


รูปที่ 8-9 แบบจำลองการรับน้ำหนักของทางรถไฟ

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์อย่างง่ายนั้น องค์ประกอบต่าง ๆ บนทางรถไฟจะสามารถจำลองให้อยู่ในรูปแบบของระบบมวลและสปริงได้ดังต่อไปนี้

- ราง (Rails) สามารถจำลองให้มีพฤติกรรมเป็นชิ้นส่วนคาน (beam) เพื่อรับแรงดัดในทางยาว โดยปกติสามารถใช้แบบจำลองแบบ Euler beam ซึ่งคำนึงถึงการดัดเพียงอย่างเดียว แต่ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในย่านความถี่สูงๆ อาจจำเป็นต้องคำนึงถึงพฤติกรรมการเฉือนบนหน้าตัดราง ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองแบบ Timoshenko beam
- อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวและแผ่นรองราง (Fastener & Rail pad) สามารถจำลองให้เป็นชิ้นส่วนสปริงและแดมเปอร์
- หมอนรองราง (Sleeper) สามารถจำลองให้เป็นมวลคั่นระหว่างรางและชั้นหินโรยทางในบางกรณีที่ต้องคำนึงถึงการยืดหยุ่นของหมอน เช่น หมอนที่ทำจากวัสดุยืดหยุ่น อาจจำเป็นต้องจำลองถึงพฤติกรรมการดัดในแนวยาว และการยืดหยุ่นตัวในแนวดิ่งด้วยเช่นกัน
- ชั้นหินโรยทาง (Ballast)สามารถจำลองให้มีพฤติกรรมเป็นระบบสปริง และแดมเปอร์ โดยในบางกรณีอาจต้องคำนึงถึงมวลของชั้นหินโรยทางที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบด้วยเช่นกัน

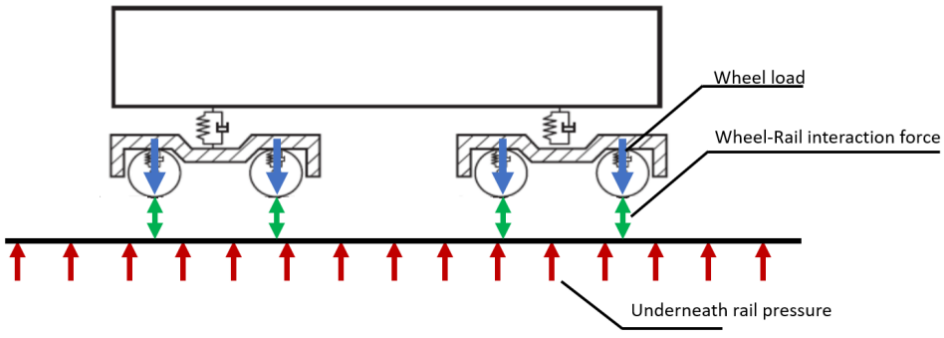
- ชั้นพื้นทาง (Formation) สามารถจำลองให้มีพฤติกรรมเป็นระบบสปริงและแดมเปอร์ โดยในบางกรณีอาจต้องคำนึงถึงมวลของดินในชั้นพื้นทางที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบด้วยเช่นกัน
- โครงสร้างอื่น ๆ เช่น สะพาน แผ่นพื้นคอนกรีต สามารถใช้วิธีวิเคราะห์โครงสร้างอย่างง่าย (Simplified Model) หรือแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) หรือเพื่อสร้างระบบ มวลสปริงและแดมเปอร์ได้โดยต้องมีการตรวจสอบความถี่ (Vibration Frequency) และรูปแบบโมด (Vibration Mode Shape) ของการสั่นสะเทือนให้สอดคล้องกับสภาวะจริง โดยแสดงแบบจำลองทางพลศาสตร์ของทางรถไฟ ดังรูปที่ 8-10



รูปที่ 8-10 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของทางรถไฟ

8.3.3 การสัมผัสกันระหว่างล้อและราง (Wheel-Rail Interface)

การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนรถไฟนั้นมีผลมาจากการสั่นสะเทือนของทางรถไฟผนวกด้วยการสั่นสะเทือนบนตัวรถไฟเอง ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์จะต้องจำลองการส่งถ่ายแรงผ่านล้อไปสู่ราง และรางกลับไปสู่ล้อได้สอดคล้องกับสภาวะสมดุลทางพลศาสตร์ (Dynamic Equilibrium) แสดงดังรูปที่ 8-11



รูปที่ 8-11 แรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง

8.3.4 ความขรุขระของทางรถไฟ (Track Irregularities)

โดยปกติแล้วทางรถไฟจะมีความไม่สม่ำเสมอหรือความขรุขระ (Irregularities) ซึ่งจะมีขนาดมากน้อยไปตามคุณภาพของการก่อสร้างและบำรุงรักษา โดยการเสื่อมสภาพของทางจะมีผลให้ขนาดของความขรุขระเพิ่มมากขึ้นตามกาลเวลา

ทั้งนี้ ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์จะสามารถจำลองผลของความขรุขระเข้าไปได้โดยสร้างรูปร่างของความขรุขระ (Track Irregularities Profile) ไปตามความยาวของทาง ซึ่งตามปกติจะมีอยู่ 4 ชนิด คือ

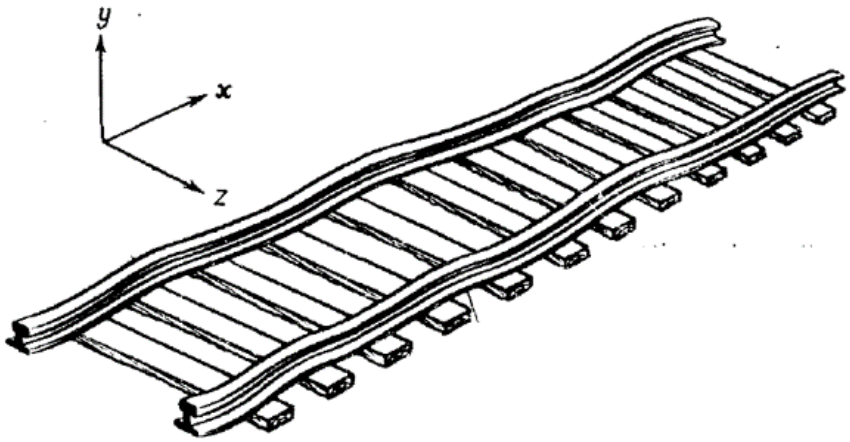
1) ความขรุขระในแนวดิ่ง (Elevation)

2) ความขรุขระในแนวราบ (Alignment)

3) ความขรุขระในความต่างระดับของสันราง (Cross Elevation)

4) ความขรุขระในความกว้างทาง (Gauge)

โดยตัวอย่างความขรุขระบนทางรถไฟ แสดงดังรูปที่ 8-12



รูปที่ 8-12 ความขรุขระบนทางรถไฟ

รูปร่างหรือโปรไฟล์ของความขรุขระนั้น อาจสร้างได้โดยใช้ความสัมพันธ์แบบสุ่ม (Random Profile Function) ประยุกต์ใช้ร่วมกับสเปกตรัมของความขรุขระ (Track Irregularities Spectrum) ตามสมการที่ 8-1 ถึง สมการที่ 8-2 และแสดงคุณสมบัติของสเปกตรัมความขรุขระของทางรถไฟตามชั้นมาตรฐาน FRA ดังตารางที่ 8-1

$$S_{e,a}(\Omega)=\frac{A\Omega_2^2\left(\Omega^2+\Omega_1^2\right)}{\Omega^4\left(\Omega^2+\Omega_2^2\right)}\ \left(m^3\right) \qquad \text{สมการที่ 8-1}$$

$$S_{c,g}(\Omega)=\frac{A\Omega_2^2}{\left(\Omega^2+\Omega_1^2\right)\left(\Omega^2+\Omega_2^2\right)}\ \left(m^3\right) \qquad \text{สมการที่ 8-2}$$



โดยที่ e คือ ความขรุขระในแนวดิ่ง (Elevation)

a คือ ความขรุขระในแนวราบ (Alignment)

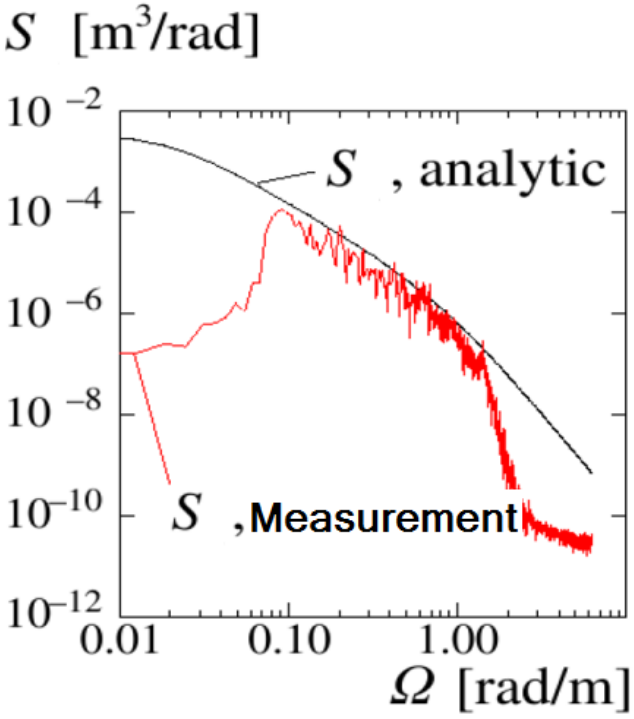
c คือ ความขรุขระในความต่างระดับของสันราง (Cross elevation)

g คือ ความขรุขระในความกว้างทาง (Gauge)

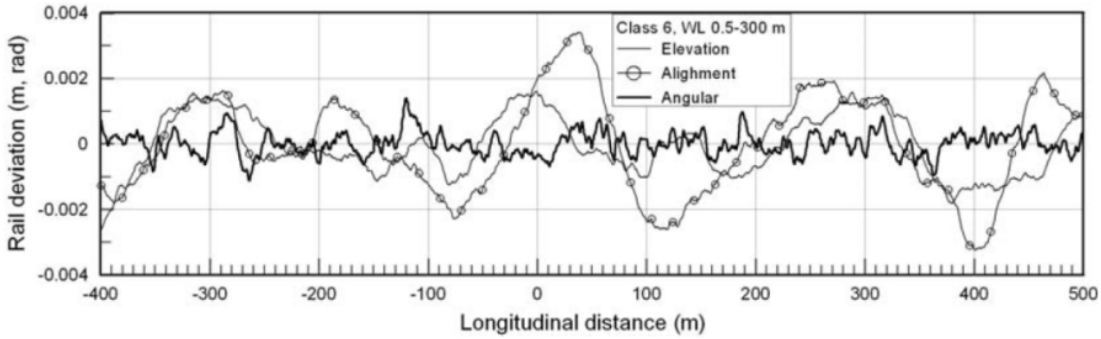
ตารางที่ 8-1 คุณสมบัติของสเปกตรัมความขรุขระของทางรถไฟตามชั้นมาตรฐาน FRA

Irregularity	Constant		Constants for each rail class					
	Notation	Unit	1	2	3	4	5	6
Elevation	A	$10^8\ m^3$	15.53	8.85	4.92	2.75	1.57	0.98
	Ω_1	$10^3\ m^{-1}$	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30
	Ω_2	$10^2\ m^{-1}$	13.10	13.10	13.10	13.10	13.10	13.10
Alignment	A	$10^8\ m^3$	9.83	5.51	3.15	1.77	0.98	0.59
	Ω_1	$10^3\ m^{-1}$	32.80	32.80	32.80	32.80	32.80	32.80
	Ω_2	$10^2\ m^{-1}$	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40
Cross	A	$10^8\ m^3$	4.52	3.15	2.16	1.38	0.98	0.59
	Ω_1	$10^3\ m^{-1}$	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30
	Ω_2	$10^2\ m^{-1}$	13.10	13.10	13.10	13.10	13.10	13.10
Gauge	A	$10^8\ m^3$	9.83	5.51	3.15	1.77	0.98	0.59
	Ω_1	$10^3\ m^{-1}$	29.20	29.20	29.20	29.20	29.20	29.20
	Ω_2	$10^2\ m^{-1}$	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30

รูปที่ 8-13 และ รูปที่ 8-14 แสดงตัวอย่างกราฟสเปกตรัมความขรุขระของทางรถไฟ และตัวอย่างโปรไฟล์ของความขรุขระของทางรถไฟ ตามลำดับ



รูปที่ 8-13 ตัวอย่างกราฟสเปกตรัมความขรุขระของทางรถไฟ



รูปที่ 8-14 ตัวอย่างโปรไฟล์ของความขรุขระของทางรถไฟ

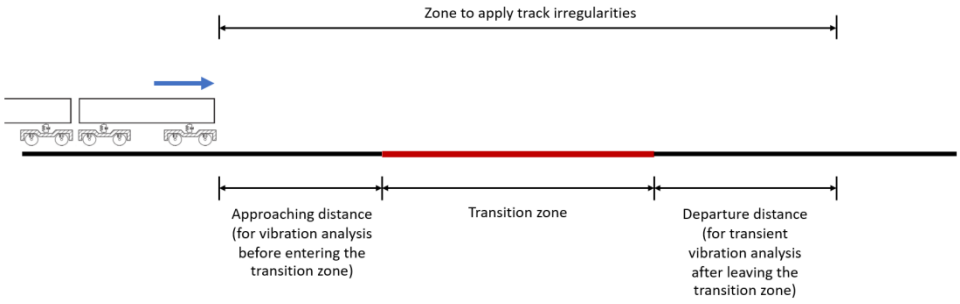
ในการสร้างโปรไฟล์ความขรุขระจะมีตัวแปรที่สำคัญ คือ ขนาดและความยาวคลื่นของความขรุขระ (Amplitude and wavelength of irregularity) โดยตัวแปรดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับความถี่ของแรงที่กระทำต่อรถไฟในความเร็วต่าง ๆ ดังตารางที่ 8-2แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความยาวคลื่นของความขรุขระและย่านความถี่ในการสั่นสะเทือน ทั้งนี้ผู้ทำการวิเคราะห์จะต้องให้ความสำคัญในเลือกย่านของความถี่ที่สอดคล้องกับสภาวะจริง

ตารางที่ 8-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความยาวคลื่นของความขรุขระ (เมตร) และย่านความถี่ของการสั่นสะเทือน

ความยาวคลื่น (Hz)	ความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)			
	40	80	160	300
4 Hz	2.8	5.6	11	21
8 Hz	1.4	2.8	5.6	10
16 Hz	0.69	1.4	2.8	5.2
31.5 Hz	0.35	0.70	1.4	2.6
63 Hz	0.18	0.35	0.71	1.3
125 Hz	0.089	0.18	0.36	0.67
250 Hz	0.044	0.089	0.18	0.33

8.3.5 การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ (Dynamic analysis procedure)

ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน จะวิเคราะห์ตั้งแต่รถไฟเริ่มเคลื่อนเข้าสู่จุดเปลี่ยนผ่านไปจนกระทั่งรถไฟแล่นผ่านบริเวณดังกล่าวไปแล้วจนสิ้นขบวน ซึ่งจะต้องทำการเก็บค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดที่เกิดขึ้นกับรถไฟและทางรถไฟในตำแหน่ง ต่าง ๆ ตามเวลาไว้ เพื่อใช้ในการตรวจสอบกับค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน มขร S-T-008-256x “มาตรฐานตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ” และแสดงบริเวณที่ทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนบนทางรถไฟบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน ดังรูปที่ 8-15

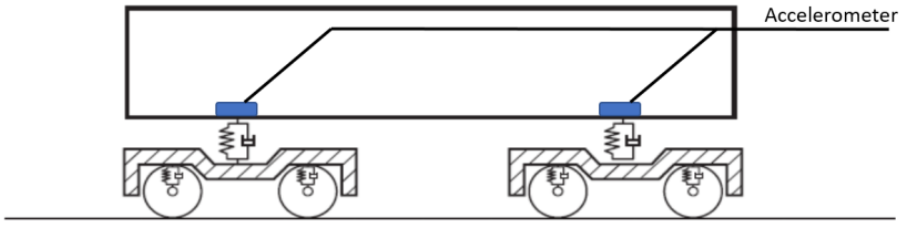


รูปที่ 8-15 บริเวณที่ทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนบนทางรถไฟบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน

8.3.6 การทดสอบด้วยการตรวจวัดจริง (Field experiment)

การประเมินค่าตามมาตรฐาน มขร S-T-008 สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ดังหัวข้อที่ 8.3.5 หรืออาจทำการทดสอบด้วยการติดตั้งเครื่องมือ เพื่อวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงบนรถไฟและทางรถไฟ

สำหรับการสั่นสะเทือนบนตัวรถไฟนั้น สามารถดำเนินการได้ตามมาตรฐาน UIC-518 (Simplified Acceleration Method) ดังแสดงดังรูปที่ 8-16 เพื่อตรวจสอบค่าความเร่งที่เกิดขึ้นบนรถไฟรวมไปถึงประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงแนวดิ่งที่ชุดล้อ



รูปที่ 8-16 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งบนตัวรถตามมาตรฐาน UIC-518 [86]

สำหรับการตรวจวัดแรงกดบริเวณใต้ราง อาจใช้เครื่องมือในการวัดค่าแรงใต้รางโดยตรง (Pressure Pad) หรืออาจใช้วิธีการตรวจวัดแบบอื่นเช่น Indirect-Method ที่มีความน่าเชื่อถือได้ ดังแสดงดังรูปที่ 8-17



รูปที่ 8-17 หลักการตรวจวัดแรงบริเวณใต้ราง



8.4 การก่อสร้างทางรถไฟบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน

หลักการเบื้องต้นในการออกแบบจุดเปลี่ยนผ่าน คือ การทำให้ค่าความแข็งเกร็งมีความราบเรียบมากที่สุด หรือในกรณีที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ จะต้องมีการจัดการให้ค่าความแข็งเกร็งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป ค่าความแข็งเกร็งของทางรถไฟนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างสองส่วนคือ โครงสร้างทางรถไฟและโครงสร้างที่รองรับทางรถไฟ ซึ่งในการออกแบบไม่ควรให้การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทั้งสองส่วนอยู่บริเวณเดียวกัน หลีกเลี่ยงการวางจุดเชื่อมรางบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน

การปรับปรุงค่าความแข็งเกร็งโดยการติดตั้งรางเสริม การเสริมแผ่นรองแบบยืดหยุ่น การปรับปรุงชั้นรองพื้นทาง/คันดิน หรือวิธีอื่น ๆ ซึ่งช่วยให้ค่าความแข็งเกร็งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปสามารถทำได้ โดยต้องมีผลการวิเคราะห์และทดสอบการสั่นสะเทือนตามวิธีการที่ได้ให้รายละเอียดไว้ข้างต้น เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องบนทางรถไฟ (Track Discontinuity) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งเกร็งและจะก่อให้เกิดแรงกระแทกระหว่างล้อและรางที่เพิ่มขึ้นดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ช่วยจัดการค่าความแข็งเกร็งใด ๆ จะต้องกำหนดให้ตำแหน่งสิ้นสุดของการติดตั้งอยู่คนละตำแหน่งกัน

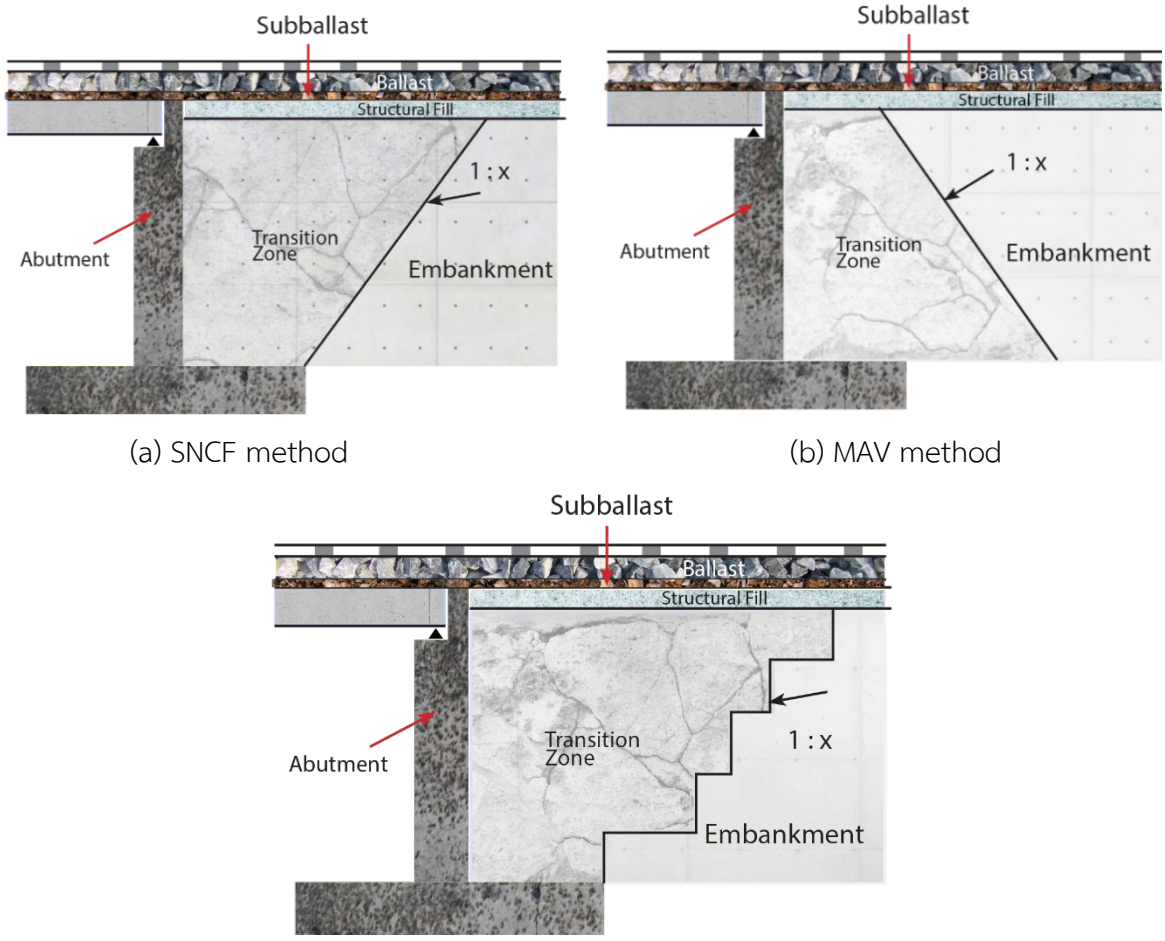
8.5 ตัวอย่างการก่อสร้างเพื่อแก้ปัญหาในบริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน

ในต่างประเทศได้มีการพยายามแก้ปัญหาการก่อสร้างบริเวณจุดเปลี่ยนผ่านแม้กระทั่งในปัจจุบันยังมีการวิจัยเพื่อจะนำเทคโนโลยีใหม่ๆเข้ามาแก้ปัญหาในเรื่องนี้ อย่างไรก็ตาม ในประเทศไทยไม่ปรากฏถึงวิธีการแก้ปัญหาบริเวณจุดเปลี่ยนผ่านไว้อย่างชัดเจน รวมทั้งวิธีการที่นำมาใช้ในโครงการต่าง ๆก็จะอิงกับมาตรฐานของต่างประเทศเป็นหลัก ทั้งนี้มาตรฐาน UIC 719R ได้แนะนำวิธีการก่อสร้างพื้นทางฯในบริเวณบริเวณจุดเปลี่ยนผ่านระหว่างคันดินและสะพาน โดยมี 3 วิธีที่แนะนำคือ

1) SNCF method (France's national state-owned railway company, ประเทศฝรั่งเศส)

2) MAV method (Hungarian railway, ประเทศฮังการี)

3) DB method (German national railway, ประเทศเยอรมัน)



(a) SNCF method

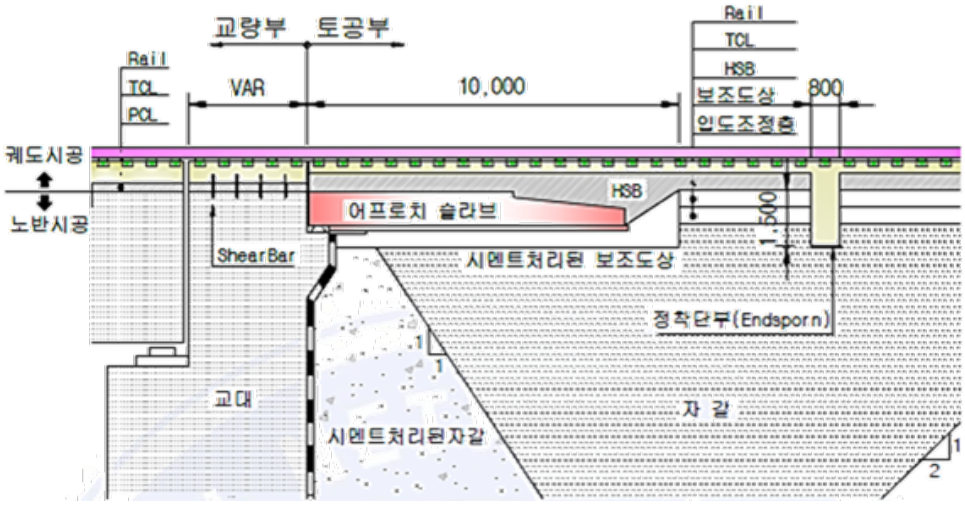
(b) MAV method

(c) DB method

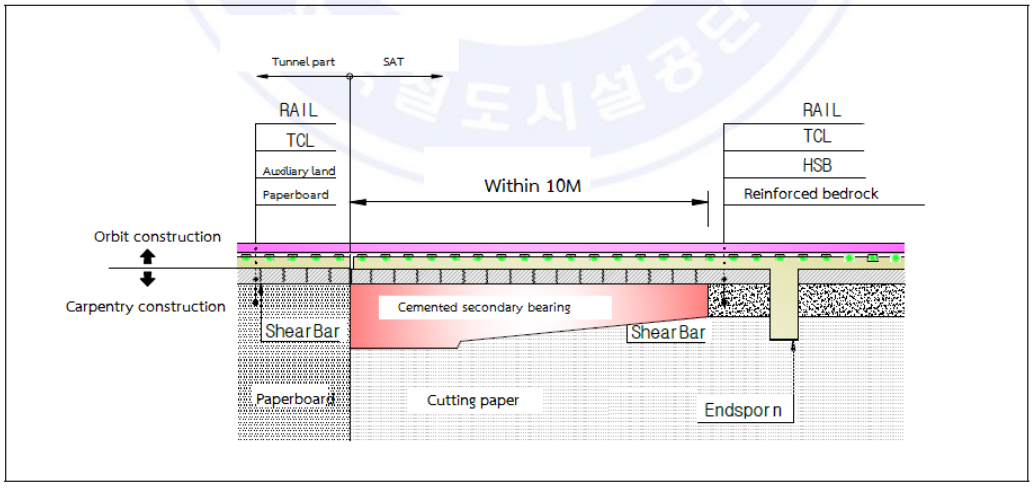
รูปที่ 8-18 แนวทางการก่อสร้างทางรถไฟบริเวณจุดเปลี่ยนผ่านตามข้อแนะนำของมาตรฐาน UIC 719R

ซึ่งจะสังเกตได้ว่าทั้ง 3 วิธี มีรูปแบบการก่อสร้างบริเวณจุดเปลี่ยนผ่านระหว่างสะพานและงานดินที่แตกต่างกัน แต่ตั้งอยู่ในหลักการเดียวกันคือปรับค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของบริเวณเชื่อมต่ออย่างค่อยเป็นค่อยไป ทั้งนี้ อาจร่วมด้วยการปรับปรุงคุณภาพดิน หรือ ใช้มวลรวมที่มีคุณสมบัติในการรับแรงบากทานที่สูงในบริเวณดังกล่าว โดยวิธี SNCF (ประเทศฝรั่งเศส) และ MAV (ประเทศฮังการี) นั้น ใช้ความชัน 1 : X ในการค่อย ๆ ปรับค่าความแข็งเกร็ง แต่มีทิศทางที่ตรงกันข้าม ในขณะที่ วิธี DB (ประเทศเยอรมัน) นั้น เลือกใช้วิธีการทำเป็นขั้นบันไดสำหรับการปรับค่า

นอกจากนี้ ในส่วนของมาตรฐาน KR C-14080 Track / Vehicle /Structure / Electrical /Signal Interaction ของประเทศสาธารณรัฐเกาหลี ได้มีการกล่าวถึงบริเวณเชื่อมต่อระหว่างงานดินกับสะพานรวมไปถึงทางรถไฟบริเวณปากอุโมงค์ โดยได้กำหนดเป็นรูปแบบมาตรฐานสำหรับการก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 8-19 และ รูปที่ 8-20

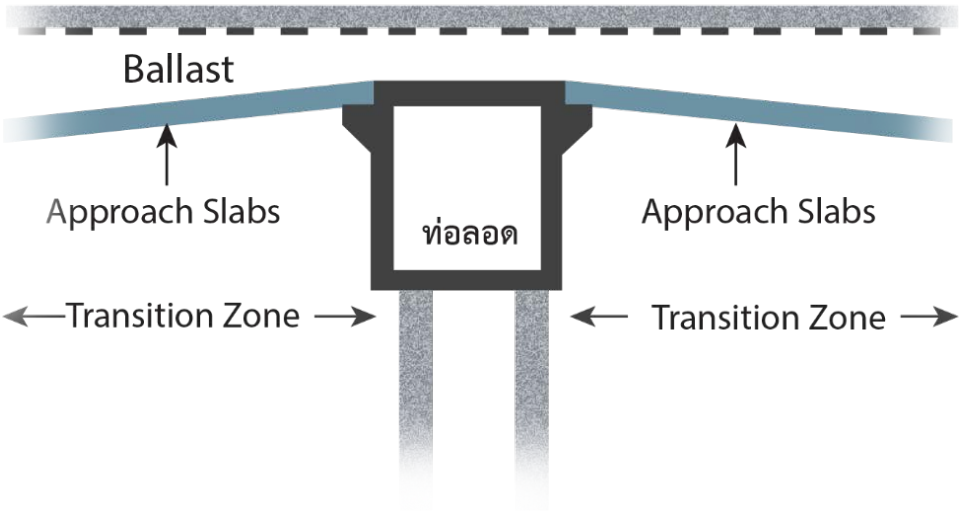


รูปที่ 8-19 แบบมาตรฐานของประเทศเกาหลีบริเวณจุดเปลี่ยนผ่านระหว่างสะพานและคันดิน



รูปที่ 8-20 แบบมาตรฐานของประเทศเกาหลีบริเวณจุดเปลี่ยนผ่านปากอุโมงค์

สำหรับบริเวณที่ทางรถไฟตัดผ่านกับท่อลอดนั้นถือว่าเป็นอีกหนึ่งบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเกร็งอย่างฉับพลันจึงเป็นอีกหนึ่งบริเวณที่ต้องดูแลเรื่องการก่อสร้างเป็นพิเศษเช่นเดียวกับบริเวณเชื่อมต่อระหว่างสะพานและทางรถไฟ



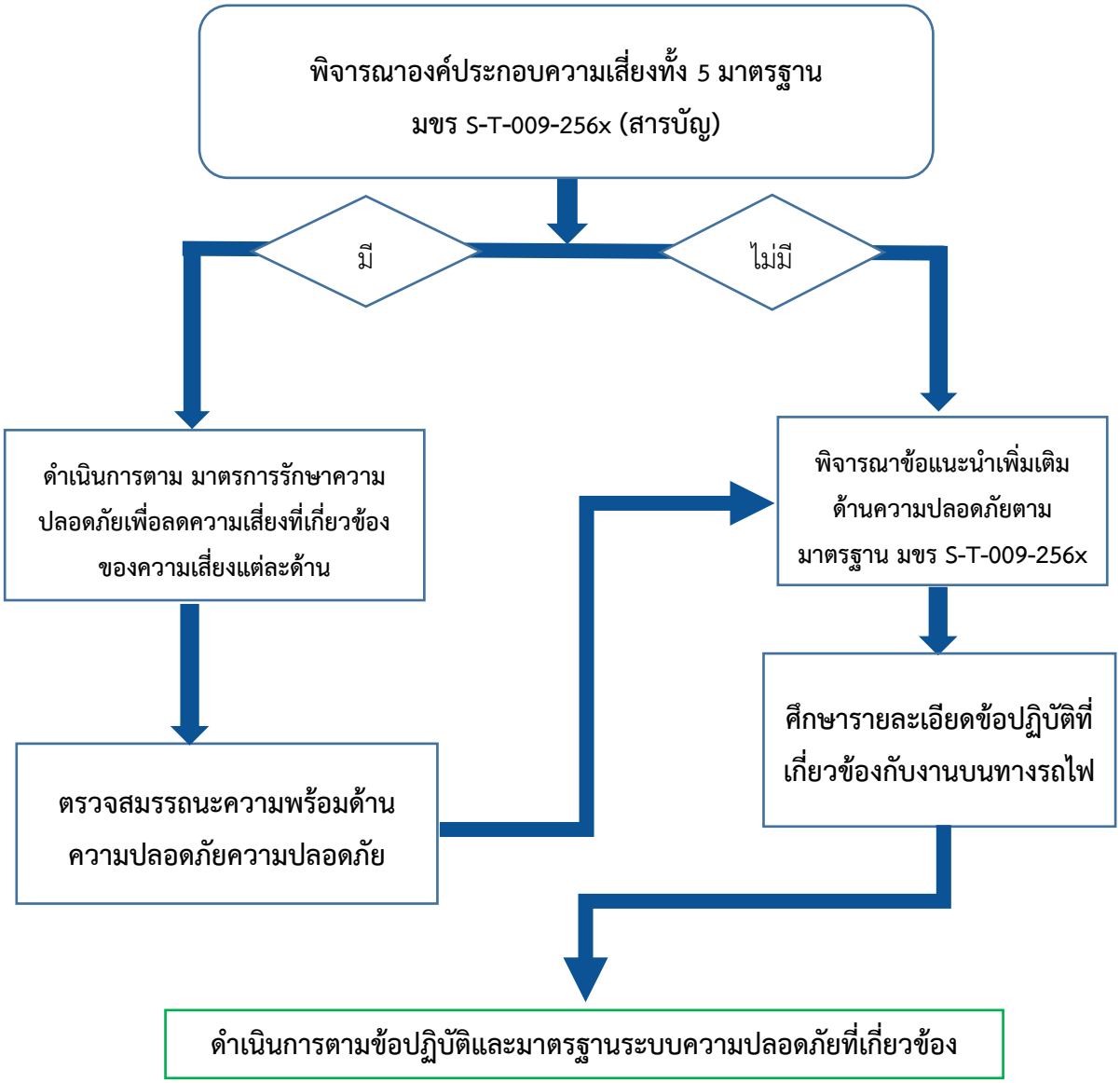
รูปที่ 8-21 แนวทางการก่อสร้างทางรถไฟเมื่อผ่านท่อลอด

จากรูปที่ 8-21 จะสามารถสังเกตได้ว่าท่อลอดนั้นควรนั่งอยู่บนเสาเข็มเพื่อป้องกันการทรุดตัว รวมทั้งยังมีการติดตั้ง Approach slabs ได้ทั้งสองข้างของท่อลอด เพื่อลดความแตกต่างระหว่างความแข็งเกร็งของคันดินและท่อลอดในเป็นจุดเปลี่ยนผ่าน

บทที่ 9 ความปลอดภัยในการทำงานบนทางรถไฟ

9.1 ขั้นตอนการใช้คู่มือระบบความปลอดภัยในการทำงานบนทางรถไฟ

ในส่วนของการทำงานบนรถไฟให้เกิดความปลอดภัยนั้นจะพิจารณาทั้งในส่วนของความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นในการเข้าปฏิบัติงาน มาตรการรักษาความปลอดภัยเพื่อลดความเสี่ยงเหล่านั้น และนอกจากนั้นยังต้องดำเนินการตามข้อปฏิบัติด้านความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงในรูปที่ 9-1



รูปที่ 9-1 ขั้นตอนในการใช้คู่มือระบบรักษาความปลอดภัยในการทำงานบนทางรถไฟ



9.2 มาตรการรักษาความปลอดภัยบนทางรถไฟ

จากมาตรฐานระบบความปลอดภัยบนทางรถไฟ มขร S-T-009-256x ความเสี่ยงเฉพาะด้านการทำงานบนทางรถไฟจะถูกจำแนกออกเป็น 5 ด้านดังนี้

ความเสี่ยงที่ 1 พนักงานถูกรถไฟชน หรือ ถูกลมกระแทกบนทางรถไฟที่ทำการซ่อมแซม

ความเสี่ยงที่ 2 พนักงานถูกรถไฟชน หรือ เครื่องจักรกระแทกบนทางรถไฟติดกัน

ความเสี่ยงที่ 3 พนักงานถูกรถไฟชน หรือ เครื่องจักรทำงานบนทางรถไฟที่ถูกกั้น

ความเสี่ยงที่ 4 เครื่องจักร วัตถุ หรือเครื่องมือ ถูกรถไฟชนบนทางรถไฟติดกัน

ความเสี่ยงที่ 5 พนักงานถูกไฟดูดหรือไฟช็อตโดยเครื่องมือทางไฟฟ้า

โดยการจำแนกความเสี่ยงต่อพนักงาน ใน**ความเสี่ยงที่ 1 2 3** และ **5** จะถูกจัดให้อยู่ในระดับความเสียหายรุนแรงจากอันตราย (Hazard Severity Level) ในระดับวิกฤต (Critical) หรือ ระดับภัยพิบัติ (Catastrophic) และมีความถี่ของโอกาสในการเกิดเหตุการณ์อยู่ในระดับมีความน่าจะเป็นในการเกิดบ้าง (Probable) ถึง เกิดขึ้นบ่อยครั้ง (Frequent) โดยผลลัพธ์การเกิดความเสี่ยงจะอยู่ในระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้ (Intolerable) ส่วนความเสี่ยงในการจราจรเดินรถไฟ**ความเสี่ยงที่ 4** มีระดับความรุนแรงจากอันตราย (Hazard Severity Level) ในระดับภัยพิบัติ (Catastrophic) โดยมีความน่าจะเป็นในการเกิดได้ไม่บ่อยครั้ง (Occasional) จนถึง บ่อยครั้ง (Frequent) โดยผลลัพธ์จากความเสี่ยงจะอยู่ในระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้ (Intolerable)

เมื่อพิจารณาตามความเสี่ยงที่เกิดขึ้นบนทางรถไฟสามารถระบุมาตรการออกแบบระบบความปลอดภัยเพื่อลดความเสี่ยงได้ดังนี้

9.2.1 มาตรการออกแบบระบบความปลอดภัยตามความเสี่ยงที่ 1

(พนักงานถูกรถไฟชน หรือ ถูกลมกระแทกบนทางรถไฟที่ทำการซ่อมแซม) จะใช้การกำหนดมาตรการสำหรับการใช้เครื่องกั้นตามตารางที่ 9-1 มาตรการตัดสินใจกั้นเส้นทางรถไฟ

ตารางที่ 9-1 มาตรการตัดสินใจกั้นเส้นทางรถไฟ

หัวข้อ	มาตรการการกั้นเส้นทาง
1. มีรถไฟแล่นผ่านได้	- ให้มีการกั้นเส้นทาง
2. การก่อสร้างบนทางรถไฟ	- กรณีที่การรื้อถอนรางรถไฟ
3. การมีพื้นที่ปลอดภัย	- ไม่มีพื้นที่ปลอดภัยภัยเพียงพอ - เข้าถึงพื้นปลอดภัยได้ยาก - ต้องใช้พื้นที่ทำงานเป็นพื้นที่ปลอดภัย
4. การใช้อุปกรณ์เครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้	- ถ้าน้ำหนักของอุปกรณ์มีมากกว่า 25 กิโลกรัม - ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ด้วยพนักงานคนเดียว - ใช้เครื่องมืออุปกรณ์ที่ยึดติดบนทางรถไฟ
5. ระยะทำงานบนทางรถไฟ	- ระบุระยะเวลาตั้งแต่เข้าทำงานจนงานเสร็จสิ้น



ส่วนมาตรการใช้สัญญาณเตือนจะเป็นไปตามตารางที่ 9-2 ดังนี้

ตารางที่ 9-2 มาตรการตัดสินใจใช้สัญญาณเตือนบนทางรถไฟ

หัวข้อ	มาตรการสำหรับการใช้สัญญาณเตือน
1. ระยะเวลาแจ้งเตือนรถไฟ และ ระยะทางแจ้งเตือนรถไฟ	- กำหนดตามระยะเวลาและระยะทางที่มีการทำงานบนทางรถไฟ
2. ระยะเวลาการเฝ้าระวัง	- กำหนดตามระยะเวลาที่มีการทำงานบนทางรถไฟ
3. จำนวนของรถไฟแล่นผ่าน	- ให้มีการทำงานในช่วงที่มีรถไฟวิ่งผ่านน้อยที่สุด
4. ระดับเสียงดังในการงาน	- เกินระดับความดังของสัญญาณเตือนไม่เกิน 118 *dB*
5. ระยะเวลาในการติดตั้งและรื้อถอน	- กำหนดเป็นระยะเวลาก่อนและหลังการทำงาน

9.2.2 มาตรการรักษาความปลอดภัยตาม ความเสี่ยงที่ 2

(พนักงานถูกรถไฟชน หรือ เครื่องจักรกระแทก บนทางรถไฟติดกัน) จะใช้การกำหนดมาตรการสำหรับการใช้เครื่องกั้นระหว่างทางรถไฟตามตารางที่ 9-3

ตารางที่ 9-3 มาตรการตัดสินใจใช้เครื่องกั้นระหว่างทางรถไฟ

หัวข้อ	มาตรการการกั้นระหว่างทางรถไฟ
1. กระบวนการทำงานบนทางรถไฟ	- กระบวนการทำงานอาจทำให้พนักงานเผลอเข้าไปในเขตอันตรายของทางรถไฟที่ติดกัน และไม่มีสัญญาณเตือนระหว่างทางรถไฟที่เหมาะสม
2. พื้นที่ปลอดภัย	- ไม่มีพื้นที่ปลอดภัยภัยเพียงพอ - เข้าถึงพื้นปลอดภัยได้ยาก - ต้องใช้พื้นที่ทำงานเป็นพื้นที่ปลอดภัย
3. มีทางรถไฟขนานทั้งสองด้าน	- ไม่มีพื้นที่ปลอดภัยและไม่มีเครื่องกั้นระหว่างทางรถไฟ
4. ระดับเสียงดังในการทำงาน	- ดังเกินที่กว่าจะใช้สัญญาณเตือนให้ใช้เครื่องกั้น
5. ระยะทางระหว่างทางรถไฟที่มีการทำงานและระยะทางรถไฟถัดไป หรือ ระหว่างบริเวณทำงานที่ติดกัน	- ต้องประมาณระยะทางที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องจักร หรือ อุปกรณ์ที่มีการใช้งาน
6. ชนิดของงาน	- ควรใช้เครื่องกั้นแม้ในระยะเวลาทำงานที่สั้น
7. การใช้ทางรถไฟถัดไป	- ควรกำหนดให้ลดความเร็วของรถไฟที่วิ่งผ่าน ถ้าไม่มีการใช้เครื่องกั้น



9.2.3 มาตรการรักษาความปลอดภัยตาม ความเสี่ยงที่ 3

(พนักงานถูกรถไฟชน หรือ เครื่องจักรทำงาน บนทางรถไฟที่ถูกกั้น) จะใช้การกำหนดเกณฑ์สำหรับการใช้สัญญานเตือนบนทางรถไฟตามตารางที่ 9-3

9.2.4 มาตรการรักษาความปลอดภัยตาม ความเสี่ยงที่ 4

(เครื่องจักร วัตถุ หรือเครื่องมือ ถูกรถไฟชนบนทางรถไฟติดกัน) จะใช้การกำหนดมาตรการสำหรับการใช้การกั้นทางรถไฟที่ติดกันตามตารางที่ 9-4

ตารางที่ 9-4 มาตรการตัดสินใจใช้การกั้นระหว่างทางรถไฟติดกันกรณีมีเครื่องจักรทำงาน

หัวข้อ	มาตรการการกั้นระหว่างทางรถไฟ
1. ชนิดของเครื่องจักร หรือ เครื่องมือในการทำงาน	- ถ้ามีอุปกรณ์ที่สามารถแกว่งหรือเคลื่อนไปเข้าเขตอันตรายของทางรถไฟถัดกันได้ หรือไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้อุปกรณ์ดังกล่าวได้ รวมถึงเครื่องจักรมีเสียงกังเกินกว่าจะใช้ระบบสัญญาณเตือนได้
2. การมีรถไฟวิ่งผ่าน	- ควรกั้นถ้าไม่สามารถลดความเร็วของรถไฟลงได้

9.2.5 มาตรการรักษาความปลอดภัยตาม ความเสี่ยงที่ 5

- (พนักงานถูกไฟดูดเนื่องจากไฟฟ้าลัดวงจรโดยเครื่องมือทางไฟฟ้า)

กำหนดให้มีมาตรการการตัดไฟในบริเวณก่อนที่มีการเข้าทำงาน หรือตัดไฟฉุกเฉินที่มีการเข้าไปในเขตอันตราย โดยควรจะสามารถตัดไฟในส่วนสถานีไฟฟ้าย่อยได้ทันทีรวมถึงกระบวนการตรวจสอบว่า

1. การตัดไฟสมบูรณ์ ไม่มีกระแสลัดวงจร
2. มีการป้องกันการต่อกระแสไฟฟ้าโดยบังเอิญ
3. ตรวจสอบว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าค้างเครื่องจักรในบริเวณ
4. มีการต่อสายลงดิน (Earthing) และ การป้องกันการลัดวงจร
5. ป้องกันเหตุจากบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าข้างเคียง
6. มีอุปกรณ์คลุมรางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน (Third Rail) หรือกั้นการตกหล่นของส่วน จ่ายไฟฟ้าเหนือศีรษะ (Overhead Line) ระหว่างการเข้าทำงาน

ตารางสมรรถนะด้านความปลอดภัยของพนักงานจำแนกตามกิจกรรมการทำงานบนทางรถไฟได้ก่อนการเข้าทำงานในแต่ละกิจกรรมบนทางรถไฟสามารถใช้ตาราง ก. ในภาคผนวก เพื่อพิจารณาความพร้อมด้านสมรรถนะด้านความปลอดภัยของพนักงานจำแนกตามกิจกรรมการทำงานบนทางรถไฟได้



9.3 ข้อปฏิบัติในการทำงานบนทางรถไฟ

ให้มีการปฏิบัติซึ่งเป็นไปตาม ข้อกำหนดดังนี้

9.3.1 สาระสำคัญของการบำรุงทาง

ในการบำรุงรักษาทางและสถานที่ พนักงานบำรุงทางต้องปฏิบัติงานซึ่งเกี่ยวกับความปลอดภัยของขบวนรถก่อนงานอื่น และต้องพยายามอย่าให้ขบวนรถเสียเวลาเกินกว่าจำเป็น

9.3.2 การปักป้ายลดความเร็วในการซ่อมทางธรรมดา

ในการซ่อมทางตามธรรมดา ต้องกระทำโดยพยายามที่จะไม่ต้องใช้ป้ายลดความเร็วปักกำกับในขณะทำงานทั้งนี้เพื่อให้ขบวนรถผ่านไปมาตามความเร็วที่ได้กำหนดไว้สำหรับทางนั้นเสมอ

9.3.3 งานบำรุงทางนอกเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องปิดทาง

เมื่อจำเป็นต้องปิดทางเพื่อทำงานบำรุงทางนอกเขตสถานีทางสะดวกซึ่งไม่ใช่เป็นการฉุกเฉินสามารถจะเตรียมการล่วงหน้าไว้ได้เจ้าหน้าที่บำรุงทางตั้งแต่สารวัตรขึ้นไปต้องแจ้งให้พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงทราบ และถ้าไม่มีการขัดข้องอย่างใด พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงต้องจัดการประกาศปิดทางตอนนั้น และแจ้งให้ผู้เกี่ยวข้องทราบก่อนที่เจ้าหน้าที่บำรุงทางจะลงมือทำงานนั้นจะต้องได้รับหลักฐานจากนายสถานีทางสะดวกข้างใดข้างหนึ่งของทางตอนนั้นว่าได้ปิดทางเรียบร้อยแล้วและทั้งต้องจัดการปักป้ายแดง ก่อนที่จะประกาศเปิดทางตอนนี้ผู้ประกาศต้องได้รับหลักฐานจากเจ้าหน้าที่บำรุงทางตั้งแต่ชั้นนายตรวจทางขึ้นได้อนุญาตให้ขบวนรถเดินผ่านได้แล้ว

9.3.4 งานบำรุงทางนอกเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องปิดทางและต้องทำโดยฉุกเฉิน

งานบำรุงทางนอกเขตสถานีทางสะดวก ซึ่งต้องปิดทางและต้องกระทำโดยฉุกเฉิน ไม่สามารถจะประกาศล่วงหน้าได้ เจ้าหน้าที่บำรุงทางต้องจัดพนักงานไปคอยแสดงสัญญาณ“ห้าม” ให้แก่ขบวนรถที่จะเข้าสู่ทางนั้นเป็นระยะไม่น้อยกว่า 1,000 เมตร จากที่ซึ่งทำางานนั้นอยู่ตลอดเวลาและถ้ามีป้ายแดงก็ให้จัดปักกำกับไว้อีกด้วยกับทั้งต้องรีบแจ้งเหตุให้นายสถานีทางสะดวกซึ่งอยู่ใกล้ที่สุดทราบโดยเร็วทั้งนี้ให้นายสถานีทางสะดวกนั้นประกาศปิดทางตอนนั้นทันที และจะประกาศเปิดทางได้ก็ต่อเมื่อได้รับหลักฐานจากเจ้าหน้าที่บำรุงทางที่ทำงานนั้น ตั้งแต่ชั้นนายตรวจทางขึ้นไปอนุญาตให้ขบวนรถเดินผ่านที่นั้นได้ และทราบแน่ชัดว่าไม่มีขบวนรถกีดขวางอยในทางตอนนั้นเมื่อนายสถานีทางสะดวกได้ประกาศปิดหรือเปิดทางแล้วให้รีบแจ้งพนักงานควบคุมการเดินรถแขวงทราบโดยเร็วอีกด้วย

9.3.5 งานบำรุงทางในเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องปิดทาง

เมื่อจำเป็นต้องปิดทางเพื่อทางานบำรุงทางภายในเขตสถานีทางสะดวกซึ่งไม่ใช่เป็นการฉุกเฉินสามารถจะเตรียมการล่วงหน้าไว้ได้เจ้าหน้าที่บำรุงทางตั้งแต่สารวัตรขึ้นไปต้องแจ้งให้พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงทราบ และถ้าไม่มีการขัดข้องอย่างใดผู้เกี่ยวข้องต้องปฏิบัติดังนี้



ในกรณีซึ่งไม่มีทางอื่นที่ขบวนรถจะเดินผ่านสถานีทางสะดวกไปมาได้

ถ้าที่ซึ่งทำงานนั้นอยู่ในตอนใด ให้พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงจัดการประกาศปิดทางตอนนั้นและถ้าที่ซึ่งจะทำงานนั้นไม่อยู่ในตอน ก็ไม่ต้องประกาศปิดทาง แต่จะต้องประกาศให้ผู้ที่เกี่ยวข้องทราบ เพื่อให้ขบวนรถที่เดินเข้ามาสู่สถานีทางสะดวกนั้นหยุดอยู่นอกเขตสถานี

ก่อนที่เจ้าหน้าที่บำรุงทางจะลงมือทำงานนั้นจะต้องได้รับหลักฐานจากนายสถานีทางสะดวกนั้นว่าได้มีการประกาศแล้ว และทั้งต้องจัดการปักป้ายแดงอีกด้วย

ก่อนที่จะประกาศยกเลิกข้อความที่ได้ประกาศไว้ ตามก.ผู้ประกาศจะต้องได้รับหลักฐานจากเจ้าหน้าที่บำรุงทางตั้งแต่ชั้นนายตรวจทางขึ้นไปอนุญาตให้ขบวนรถเดินผ่านได้แล้ว

ในกรณีซึ่งมีทางอื่นที่ขบวนรถจะเดินผ่านสถานีทางสะดวกไปมาได้

พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงต้องประกาศปิดทางที่จะทำงานนั้นให้ผู้ที่เกี่ยวข้องทราบ เพื่อใช้ความระมัดระวังตามความจำเป็นในการให้ขบวนรถเดินผ่านสถานีทางสะดวกไปมา

ก่อนที่เจ้าหน้าที่บำรุงทางจะลงมือทำงานนั้นจะต้องได้รับหลักฐานจากนายสถานีทางสะดวกนั้นว่า ได้มีการประกาศแล้ว

ในกรณีนี้เจ้าหน้าที่บำรุงทางต้องจัดการป้องกันอันตรายโดยปักป้ายแดงกำกับระหว่างรางก่อนถึงที่ทำงานนั้นทุกๆทาง และต้องระวังมิให้ป้ายแดงที่ปักกีดขวางล้ำเข้าไปในเขตโครงสร้างทางอื่น ซึ่งเปิดใช้ให้เดินรถผ่านไปมาในขณะทำงานนั้นอยู่ การปักป้ายแดงนี้ให้ปักห่างจากที่ทำงานตามระยะซึ่งเห็นสมควรโดยให้เป็นการกีดขวางการเดินรถน้อยที่สุด

ก่อนที่จะประกาศยกเลิกข้อความที่ได้ประกาศไว้ตามผู้ประกาศจะต้องได้รับหลักฐานจากเจ้าหน้าที่บำรุงทางผู้ควบคุมงานตั้งแต่ชั้นนายตรวจทางขึ้นไปอนุญาตให้ขบวนรถเดินผ่านที่นั้นได้แล้ว

งานบำรุงทางในเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องปิดทางและต้องทำโดยฉุกเฉิน

งานบำรุงทางในเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องปิดทาง และต้องกระทำโดยฉุกเฉินไม่สามารถจะประกาศล่วงหน้าได้ เจ้าหน้าที่บำรุงทางต้องจัดพนักงานแสดงสัญญาณ“ห้าม”ให้แก่ขบวนรถที่จะเข้ามาสู่ทางนั้น เป็นระยะไม่น้อยกว่า 1,000 เมตรจากที่ซึ่งจะทำงานนั้น และถามีป้ายแดงก็ให้จัดปักกำกับไว้อีกด้วยกับทั้งต้องรีบแจ้งเหตุให้นายสถานีทางสะดวกนั้นทราบโดยเร็ว

ในกรณีซึ่งไม่มีทางอื่นที่ขบวนรถจะเดินผ่านสถานีทางสะดวกไปมาได้ ถ้าที่ซึ่งทำงานนั้นอยู่ในตอนใดให้นายสถานีทางสะดวกจัดการประกาศปิดทางตอนนั้นทันทีและถ้าที่ซึ่งทำงานนั้นไม่อยู่ในตอนก็ไม่ต้องประกาศปิดทาง แต่จะต้องประกาศให้ผู้ที่เกี่ยวข้องทราบเพื่อให้ขบวนรถที่เดินเขามาสู่สถานีทางสะดวกนั้นหยุดอยู่นอกเขตสถานีก่อนที่จะประกาศยกเลิกข้อความที่ได้ประกาศไว้นั้น นายสถานีทางสะดวกจะต้องได้รับหลักฐานจากเจ้าหน้าที่บำรุงทางที่ทำงานนั้นตั้งแต่ชั้นนายตรวจทางขึ้นไปอนุญาตให้ขบวนรถผ่านที่นั้นได้และทราบแน่ชัดว่าไม่มีสิ่งกีดขวางอยู่ในตอนที่ทำงานนั้น



ในกรณีซึ่งมีทางอื่นที่ขบวนรถจะเดินผ่านสถานีทางสะดวกไปมาได้ นายสถานีทางสะดวกต้องประกาศปิดทางที่ทำงานนั้นให้ผู้เกี่ยวข้องทราบทันที เพื่อใช้ความระมัดระวังตามความจำเป็นในการให้ขบวนรถเดินผ่านสถานีทางสะดวกไปมาในกรณีนี้ให้เจ้าหน้าที่บำรุงทางปักป้ายแดงก. ก่อนที่จะประกาศยกเลิกข้อความที่ได้ประกาศไว้นั้นนายสถานีทางสะดวกจะต้องได้รับหลักฐานจากเจ้าหน้าที่บำรุงทางผู้ควบคุมงานตั้งแต่ชั้นนายตรวจทางขึ้นไปอนุญาตให้ขบวนรถเดินผานที่นั้นได้แล้วเมื่อนายสถานีทางสะดวกได้ประกาศปิดหรือเปิดทางแล้วให้รีบแจ้งพนักงานควบคุมการเดินรถแขวงทราบโดยเร็วอีกด้วย

งานบำรุงทางนอกเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องลดความเร็วของขบวนรถเหลือตั้งแต่ 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงลงมา

งานบำรุงทางนอกเขตสถานีทางสะดวกซึ่งไม่ใช่เป็นการฉุกเฉินสามารถจะเตรียมการล่วงหน้าไว้ได้ และขบวนรถยังคงเดินผ่านได้แต่จำเป็นตองลดความเร็วเหลือตั้งแต่ 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงลงมาให้ผู้ที่เกี่ยวข้องปฏิบัติดังนี้

เจ้าหน้าที่บำรุงทางตั้งแต่ชั้นสารวัตรขึ้นไป ต้องแจ้งล่วงหน้าให้พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงทราบเพื่อประกาศให้ผู้ที่เกี่ยวข้องทราบ ก่อนลงมือทำงานเจ้าหน้าที่บำรุงทางจะต้องได้รับทราบจากนายสถานีทางสะดวกข้างใดข้างหนึ่งของทางตอนนั้นว่าได้มีการประกาศให้ขบวนรถลดความเร็วแล้วเจ้าหน้าที่บำรุงทางจึงจดการปักป้ายสัญญาณ และต้องจัดให้มีพนักงานบำรุงทางเฝ้าอยู่ตลอดเวลาเพื่อแสดงสัญญาณมือให้ขบวนรถทุกขบวนไปได้โดยระมัดระวัง ณ ที่ทำงานนั้นจนกว่าท้ายขบวนรถจะได้ผ่านพื้นที่นั้นไปแล้วจึงให้เปลี่ยนสัญญาณมือเป็นท่า “อนุญาต”แต่ถ้ามีเหตุจำเป็นจะให้ขบวนรถหยุด หรือจะต้องให้ขบวนรถเดินช้ากว่าความเร็วที่ได้กำหนดไว้ ด้วยป้ายลดความเร็ว ให้แสดงสัญญาณมือให้ขบวนรถหยุด แล้วแจ้งให้พนกงานขับรถทราบเพื่อปฏิบัติต่อไปสำหรับงานซ่อมหรือสร้างสะพานซึ่งดำเนินการโดยกองผลิตและซ่อมสร้างสะพาน ให้ผู้ควบคุมหน่วยงานจัดเจ้าหน้าที่แสดงสัญญาณมือ

เมื่อได้ทำงานเสร็จเรียบร้อยให้ขบวนรถเดินผ่านได้ตามปกติแล้วเจ้าหน้าที่บำรุงทางผู้ควบคุมงานตั้งแต่ชั้นนายตรวจทางขึ้นไป ต้องแจ้งให้นายสถานีทางสะดวกทราบโดยมีหลักฐานแล้วให้นายสถานีทางสะดวกนั้นประกาศให้ผู้เกี่ยวข้องทราบ

งานบำรุงทางนอกเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องทำโดยฉุกเฉินและต้องลดความเร็วของขบวนรถเหลือตั้งแต่ 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงลงมา

งานบำรุงทางโดยฉุกเฉินนอกเขตสถานี ทางสะดวก ซึ่งขบวนรถยังคงเดินผ่านได้ แต่จำเป็นต้องลดความเร็วของขบวนรถเหลือตั้งแต่ 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงลงมาและไม่สามารถจะแจ้งล่วงหน้าได้ก่อนลงมือทำงานให้เจ้าหน้าที่บำรุงทางจัดพนักงานไปคอยแสดงสัญญาณ “ห้าม” ห่างจากที่ทำงานในทางที่ขบวนรถจะเดินเข้ามาสู่ทุกด้าน ๆ ละอย่างน้อย 1,000 เมตรตลอดเวลา เพื่อให้ขบวนรถหยุดแล้วแจ้งให้พนักงานขับรถทราบเพื่อนำขบวนรถเดินผ่านทางตอนที่ทำงานนั้นโดยระมัดระวังและใช้ความเร็วตามแต่เจ้าหน้าที่บำรุงทางจะได้จำกัดให้ นอกจากนี้ยังต้องจัดให้มีพนักงานบำรุงทางเฝ้าอยู่ตลอดเวลาเพื่อแสดงสัญญาณมือให้ขบวนรถหยุด



เมื่อจำเป็นหรือไปได้โดยระมัดระวัง ณ ที่ทำงานนั้นจนกว่าท้ายขบวนรถจะได้ผ่านพ้นที่นั้นไปแล้วจึงให้เปลี่ยนสัญญาณมือเป็นท่า “อนุญาต”ทั้งนี้พนักงานขับรถพนักงานรักษารถ และเจ้าหน้าที่บำรุงทางผู้เกี่ยวข้องต้องรายงานเหตุการณ์ต่อผู้บังคับบัญชาของตนโดยเร็วถ้างานนี้จะเป็นเหตุให้ขบวนรถต้องล่าช้าหลายขบวน เจ้าหน้าที่บำรุงทางต้องรีบแจงให้นายสถานีทางสะดวกซึ่งอยู่ใกล้ที่สุดทราบ เพื่อประกาศให้ผู้เกี่ยวข้องทราบ เมื่อได้มีการประกาศและเจ้าหน้าที่บำรุงทางได้จัดการปักป้ายสัญญาณ

งานบำรุงทางในเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องลดความเร็วของขบวนรถเหลือตั้งแต่ 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงลงมา

งานบำรุงทางนอกเขตสถานีทางสะดวก ซึ่งขบวนรถยังคงเดินผ่านได้โดยลดความเร็วเหลือมากกว่า 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไปก่อนลงมือทำงานเจ้าหน้าที่บำรุงทางต้องจัดการปักป้ายสัญญาณเตือนให้เรียบร้อย

งานบำรุงทางในเขตสถานีทางสะดวกซึ่งต้องลดความเร็วของขบวนรถเหลือ มากกว่า 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป

งานบำรุงทางภายในเขตสถานีทางสะดวกซึ่งขบวนรถยังคงเดินผ่านได้แต่จำเป็นต้องลดความเร็วเหลือมากกว่า 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป ก่อนลงมือทำงานเจ้าหน้าที่บำรุงทางต้องจัดการแจ้งให้นายสถานีทางสะดวกนั้นทราบ และต้องปักป้ายสัญญาณตามที่กำหนดไว้

งานบำรุงทางซึ่งอาจเป็นเหตุให้เกิดอันตรายแก่ขบวนรถต้องได้รับอนุญาติจากวิศวกรบำรุงทางก่อนจึงจะทำได้

- งานบำรุงทางซึ่งอาจจะเป็นเหตุให้เกิดอันตรายแก่ขบวนรถได้ต้องได้รับอนุญาติจากวิศวกรบำรุงทางก่อนจึงจะทำได้ในการทำงานนั้นเจ้าหน้าที่บำรุงทางชั้นสารวัตรต้องพยายามควบคุมด้วยตนเองและต้องรับผิดชอบจัดให้มีป้ายสัญญาณตามที่กาหนดไว้และสัญญาณมือตามความจำเป็น
- ถ้าเป็นงานฉุกเฉินซึ่งจำเป็นต้องรีบทำโดยด่วนให้เจ้าหน้าที่บำรุงทางชั้นสารวัตรหรือชั้นนายตรวจ จัดทำไปก่อนได้รับอนุญาติจากวิศวกรบำรุงทางได้ โดยต้องรับผิดชอบจัดให้มีป้ายสัญญาณตามที่กำหนดไว้และสัญญาณมือตามความจำเป็น

งานบำรุงทางซึ่งต้องมีสัญญาณ “ห้าม” กำกับ

งานบำรุงทางซึ่งขบวนรถจะเดินผ่านไม่ได้ในขณะที่กระทำอยู่นั้น เจ้าหน้าที่บำรุงทางต้องจัดให้มีสัญญาณ“ห้าม” แสดงตามที่ได้กำหนดไว้ตลอดเวลาจนกว่าขบวนรถจะเดินผ่านได้

การป้องกันทางที่ไม่ปลอดภัย

เมื่อเจ้าหน้าที่บำรุงทางชั้นนายตรวจหรือหัวหน้าคนงานเห็นว่าทางตอนใดอยู่ในลักษณะไม่ปลอดภัย ต้องรีบจัดการ ให้มีป้ายสัญญาณแสดงตามที่กาหนดไว้กับต้องแสดงสัญญาณมือ



ห้ามใช้สัญญาณประจำที่แทนป้ายสัญญาณ

ในการทำงานบำรุงทาง ห้ามมิให้ใช้สัญญาณประจำที่เป็นเครื่องหมายแสดง เพื่อป้องกันอันตรายแทนป้ายสัญญาณเป็นอันขาด

การป้องกันรักษาทางเมื่อน้ำท่วม

ถ้าเกิดน้ำท่วมผิดปกติ เจ้าหน้าที่บำรุงทางชั้นนายตรวจและหัวหน้าคนงาน ตองตรวจดูอาการของน้ำที่ไหลตามช่องระบายน้ำต่าง ๆ ถ้าเห็นว่าน้ำที่ไหลอาจจะทำอันตรายแก่ทางได้ต้องปักป้ายสัญญาณ หรือแสดงสัญญาณมือตามที่กาหนดไว้ณที่นั้นทันที และต้องจัดให้มีพนักงานเฝ้าระวังเพื่อความปลอดภัยแก่ขบวนรถ แล้วให้จัดการแจ้งเหตุแก่นายสถานีทางสะดวกทราบเพื่อแจ้งให้พนักงานขับรถที่เกี่ยวข้องใช้ความระมัดระวังเพื่อนำขบวนรถมาในทางตอนนั้น ถ้าแม้ต้องการขอความช่วยเหลืออย่างใดก็ให้เจ้าหน้าที่บำรุงทางชั้นนายตรวจติดต่อผู้เกี่ยวข้องเพื่อแจ้งไปยังเจ้าหน้าที่บำรุงทางชั้นสารวัตรทราบ

การตรวจทางเวลาฝนตกหนักและอากาศร้อนผิดปกติ

เมื่อมีฝนตกหนักผิดปกติหรือน้ำไหลบ่ามามากจะเป็นอันตรายต่อทางหรืออากาศร้อนผิดปกติเป็นที่น่ากลัวว่ารางในทางจะคด เจ้าหน้าที่ต้องจัดพนักงานออกตรวจทางตามความจำเป็น

การวางและถอนทางหรือประแจ

- ห้ามมิให้วางทาง หรือประแจขึ้นใหม่ หรือถอนของเดิมที่มีอยู่ออกจากทางโดยมิได้รับอนุญาตจากวิศวกรใหญ่ฝ่ายการช่างโยธาเป็นลายลักษณ์อักษร
- เมื่อได้จัดการวางทางหรือประแจเสร็จเรียบร้อยแล้วต้องแจ้งให้ผู้อำนวยการฝ่ายการเดินรถทราบโดยเร็วเพื่อจดการประกาศใช้ต่อไปส่วนการถอนทางหรือประแจของเดิมที่มีอยู่ออกจากทางนั้นก่อนลงมือทำการเจ้าหน้าที่บำรุงทางต้องได้รับประกาศของเจ้าหน้าที่เดินรถให้เลิกใช้ทางหรือประแจนั้นแล้ว
- ในกรณีฉุกเฉินหากจำเป็นจะต้องวางทางหรือประแจหรือถอนของเดิมออกชั่วคราวให้สารวัตรบำรุงทางจัดทำไปก่อนได้ แล้วรายงานให้ผู้บังคับบัญชาทราบโดยเร็ว

ห้ามทำงานในเวลาอากาศวิปริต

ในขณะที่อากาศวิปริต เช่น มีหมอก พายุหรือฝนตกผิดปกติแล้วห้ามมิให้ทำงานบำรุงทางที่จำเป็นจะต้องลดความเร็วของขบวนรถหรือจะต้องหยุดขบวนรถเว้นไว้แต่จะเป็นงานด่วนซึ่งจำเป็นต้องรีบทำในทันทีทันใด

การรุกล้ำที่ดินรถไฟ

เจ้าหน้าที่บำรุงทางต้องระมัดระวังดูแลไม่ให้ผู้หนึ่งผู้ใดมาปลูกสร้างโรงเรือนและสิ่งต่าง ๆ รุกล้ำในเขตที่ดินรถไฟ ถ้าพบต้องจัดการห้ามและว่ากล่าวให้รื้อถอนออกไปเมื่อขัดขืนก็ให้รายงานต่อผู้บังคับบัญชาทราบ



เขตโครงสร้าง

ห้ามมิให้ปลูกต้นไม้บนบ่าทางที่จะบังสัญญาณหรือกองสิ่งของ หรือปลูกสร้างล้ำเข้าไปในเขตโครงสร้าง

ห้ามทำการระเบิดซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อการเดินรถ

ห้ามมิให้ทำการระเบิดภายในเขตรถไฟซึ่งอาจจะเป็นอันตรายต่อการเดินรถนอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากวิศวกรบำรุงทางก่อน และเมื่อเห็นจำเป็นวิศวกรบำรุงทางจะต้องจัดการให้ ปิดทางในขณะที่ทำการระเบิดนั้น

การระงับอัคคีภัย

เมื่อเกิดเพลิงไหม้ขึ้นในเขตรถไฟหรือนอกเขตรถไฟซึ่งอาจจะลุกลามเขามาในเขตรถไฟได้พนักงานบำรุงทางซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับที่เกิดเหตุนั้น และไม่มีกิจสำคัญกว่าที่ต้องปฏิบัติอยู่ต้องช่วยกันจัดการดับเพลิงทันทีและให้สืบสวนถึงสาเหตุที่เพลิงเกิดขึ้น แล้วรายงานให้ผู้บังคับบัญชาทราบตามลำดับโดยเร็ว

หน้าที่นายตรวจทางและนายตรวจสะพานและอาคาร

นายตรวจทาง มีหน้าที่ดังต่อไปนี้

1) ต้องจัดบำรุงรักษาทางรถไฟ และสถานีที่ อื่น ๆโดยทั่วไปซึ่งอยู่ในเขตที่ ได้กำหนดให้และต้องตรวจรักษาให้เป็นการเรียบร้อยและปลอดภัยแก่ขบวนรถ
2) เมื่อเวลาไปตรวจทางต้องมี
   (2.1) นาฬิกา
   (2.2) สมุดกำหนดเวลาเดินรถพร้อมใบแทรก
   (2.3) คำสั่งประกาศเดินรถพิเศษที่เกี่ยวข้อง
   (2.4) สมุดรับคำสั่ง
   (2.5) ธงเขียว ธงแดงหรือโคมสัญญาณ
   (2.6) เครื่องมืออื่น ๆ ที่ฝ่ายการช่างโยธากำหนด
3) โดยปกติต้องพยายามเดิน หรือใช้จักรยานตรวจการณ์เพื่อตรวจทางและงานอื่น ๆ ตลอดเขตของตนทุก ๆ วัน
4) เมื่อมีงานพิเศษใด ๆ หรือการซ่อมทางหรือการซ่อมอื่น ๆ ก็ดี ต้องตรวจตราดูแลป้องกันมิให้มีอันตรายใด ๆ เกิดขึ้นแก่ขบวนรถ
5) ต้องควบคุมดูแลอบรมผู้ที่อยู่ในบังคับบัญชาของตนให้ปฏิบัติการงาน และรักษาหน้าที่ให้ถูกต้องตามข้อบังคับนี้ตลอดจนให้เข้าใจสัญญาณที่ใช้ในการเดินรถและการใช้รถบำรุงทาง ฯลฯตามความจำเป็น
6) ต้องรับผิดชอบดูแลรักษาประแจและส่วนประกอบซึ่งอยู่ในหน้าที่ของตนให้มีสภาพเรียบร้อย
7) ต้องรับผิดชอบเก็บรักษาไม้หมอนราง เครื่องประกอบรางและอื่น ๆ ซึ่งได้จัดให้มีสำรองในเขตของตนไว้ให้ครบถ้วนเพื่อจัดการเปลี่ยนสิ่งที่ชำรุดได้ทันที



8) ต้องจัดให้คนงานบำรุงทางออกตรวจทาง และมีเครื่องมือตรวจทางพร้อมธงเขียว ธงแดง หรือโคมสัญญาณตามที่ฝ่ายการช่างโยธากำหนด

<u>นายตรวจสะพาน</u> และอาคารมีหน้าที่บำรุงรักษาโครงสร้างที่รองรับทางรถไฟดังต่อไปนี้

1) ต้องจัดการบำรุงรักษาโครงสร้างที่รองรับทางรถไฟ เช่นสะพาน ช่องน้ำ และอุโมงค์ ฯลฯ ซึ่งอยู่ในเขตที่ได้กำหนดให้และต้องตรวจรักษาให้เป็นการเรียบร้อยและปลอดภัยแก่ขบวนรถ

2) เมื่อเวลาไปตรวจสะพานต้องมี

(2.1) นาฬิกา

(2.2) สมุดกำหนดเวลาเดินรถพร้อมใบแทรก

(2.3) คำสั่งประกาศเดินรถพิเศษที่เกี่ยวข้อง

(2.4) สมุดรับคำสั่ง

(2.5) ธงเขียว ธงแดงหรือโคมสัญญาณ

(2.6) เครื่องมืออื่น ๆ ที่ฝ่ายการช่างโยธากำหนด

3) เมื่อมีงานพิเศษใด ๆ หรือการซ่อมสร้างโครงสร้างที่รองรับทางรถไฟ ตองตรวจตราดูแลป้องกันมิให้มีอันตรายใด ๆเกิดขึ้นแก่ขบวนรถ

4) ต้องคอยดูแลอบรมผู้ที่อยู่ในบังคับบัญชาของตน ให้ปฏิบัติการงาน และรักษาหน้าที่ให้ถูกต้องตามข้อบังคับนี้ตลอดจนให้เข้าใจสัญญาณที่ใช้ในการเดินรถ และการใช้รถบำรุงทาง ฯลฯ ตามความจำเป็น

5) ต้องระวังอย่าให้หญ้า เถาไม้ ใยแมงมุม และอื่น ๆขึ้นแตะพันและต้นไม้ กิ่งไม้ล้มทับหรือพาดเสาและสายโทรเลขโทรศัพท์ สายของสัญญาณหรือประแจฯลฯ และถ้าพบสายโทรเลข โทรศัพท์ฯลฯ ขาดแตะสายอื่น ต้นไม้ หรือดิน ให้รีบส่งข่าวให้นายตรวจสายทราบ

<u>หน้าที่หัวหน้าคนงาน</u>

ตามหมู่คนงานบำรุงทางทุกๆหมู่ ต้องมีหัวหน้าประจำอยู่คนหนึ่ง หัวหน้านี้อยู่ในความบังคับบัญชาของนายตรวจทางโดยตรง และมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

1) ต้องตรวจและบำรุงรักษาทางในเขตของตนให้ปราศจากสิ่งกีดขวางและ อันตราย เพื่อความปลอดภัยแก่ขบวนรถ

2) เมื่อมีอุบัติเหตุใด ๆ เกิดขึ้นในเขตของตน ต้องรีบรายงานต่อนายตรวจทางทันที

3) บรรดาเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ ที่ได้จ่ายให้สำหรับหมู่ของตน ต้องระวังรักษาให้ใช้การได้ดีอยู่เสมอ เมื่อเลิกงานแล้วต้องนำเก็บไว้ ยังที่พักให้มั่นคงเรียบร้อย

4) ต้องดูแลจัดการให้ราง ไม้หมอน หิน ฯลฯ อยู่พ้นแนวทาง

5) เมื่อพบปศุสัตว์หรือสัตว์พาหนะใด ๆ อยู่บนทางต้องขับไล่ออกไปให้พ้น



6) ต้องจัดให้คนงานพักอาศัย ณ ที่ที่ทางการจัดไว้ให้ หากคนงานไปพักอาศัย ณ ที่อื่นเป็นครั้งคราว หัวหน้าคนงานอนุญาตได้ แต่ตนต้องทราบว่าคนงานผู้นั้นพักอาศัยที่แห่งใด เพื่อสะดวกในการที่จะเรียกตัวได้ในเวลาฉุกเฉิน

7) ต้องแจ้งให้คนงานเข้าใจและระวังว่า เมื่อมีขบวนรถหรือรถอื่น ๆ เดินมาใกล้จะถึงที่ที่คนงานทำงานอยู่คนงานต้องออกไปให้พ้นทางและต้องระวังดูแลอย่าให้มีเครื่องมือเครื่องใช้หรือสิ่งใด ๆ กีดขวางทาง

8) ต้องระวังอย่าให้หญ้า เถาไม้ ใยแมงมุม และอื่น ๆขึ้นพัน และต้นไม้กิ่งไม้ล้มทับหรือพาดสายโทรเลขโทรศัพท์สายของเสาสัญญาณหรือประแจ ฯลฯ และถ้าพบสายโทรเลขโทรศัพท์ ฯลฯ ขาดแตะสายอื่น ต้นไม้หรือดิน ให้จัดการแยกหรือยกสายนั้นให้พ้นแล้วรีบส่งข่าวให้นายตรวจสายทราบ

<u>ข้อปฏิบัติการใช้รถบำรุงทาง</u>

- การใช้รถบำรุงทาง

การใช้รถบำรุงทางให้พึงใช้ได้เฉพาะในงานบนทางรถไฟเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปใช้ในการอื่น ๆหรือให้บุคคลซึ่งไม่ใช่พนักงานโดยสารไปกับรถบำรุงทาง เว้นแต่มีเหตุจำเป็นอย่างยิ่ง และได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากเจ้าหน้าที่บำรุงทางตั้งแต่ชั้นสารวัตรขึ้นไปและเมื่อได้รับอนุญาตแล้ว ต้องรายงานให้วิศวกรบำรุงทางทราบโดยเร็วทุกครั้ง เจ้าหน้าที่ผู้อนุญาตจะต้องแจ้ง ให้ผู้รับอนุญาตทราบโดยมีหลักฐานว่า การรถไฟแห่งประเทศไทยไม่รับผิดในความเสียหายใด ๆ อันพึงเกิดจากการใช้รถบำรุงทางนี้

- ผู้มีสิทธิใช้และอนุญาตให้ใช้รถบำรุงทาง

1) พนักงานผู้มีสิทธิใช้รถบำรุงทางได้นั้น ต้องได้รับอนุมัติจากผู้ว่าการโดยออกเป็นคำสั่งทั่วไปของการรถไฟแห่งประเทศไทย

2) ในกรณี ที่มีกิจจำเป็นพนักงานผู้มีสิทธิใช้รถบำรุงทางตั้งแต่สารวัตรขึ้นไป มีอำนาจที่จะอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรให้พนักงานอื่น ๆ ใช้รถบำรุงทางได้

- หน้าที่ผู้ควบคุมรถบำรุงทาง

ในการใช้รถบำรุงทาง ผู้ควบคุมตองระมัดระวัง ป้องกันมิให้มีอันตรายเกิดขึ้น ทั้งต้องปฏิบัติให้ถูกต้องตามข้อบังคับและคำสั่งพิเศษอื่น ๆ ทุกประการ

- เครื่องใช้สำหรับรถบำรุงทาง

ผู้ควบคุมไปในรถบำรุงทาง ต้องมีเครื่องใช้สำหรับรถบำรุงทางดังนี้

1) นาฬิกา

2) สมุดกำหนดเวลาเดินรถพร้อมใบแทรก

3) คำสั่งประกาศเดินรถพิเศษที่เกี่ยวข้อง

4) ธงแดงหรือโคมไฟแดงประจำรถ

5) โซ่และกุญแจสำหรับล่ามรถ



6) เฉพาะรถบำรุงทางบรรทุกจะตองมีธงแดง 2 ธง หรือโคมสัญญาณ 2 โคมเพิ่มขึ้นอีกด้วย แต่ไม่จำเป็นต้องมีสมุดกำหนดเวลาเดินรถ และคำสั่งประกาศเดินรถพิเศษ

- การควบคุมและเครื่องสัญญาณประจำรถบำรุงทาง

การนำรถบำรุงทางออกใช้ จะต้องมีเจ้าหน้าที่ผู้มีสิทธิใช้ควบคุมไปด้วยแต่ถ้าเจ้าหน้าที่ผู้มีสิทธิ์ใช้จะควบคุมด้วยตนเองไม่ได้ ก็ต้องจัดพนักงานผู้ซึ่งเจ้าหน้าที่ผู้มีสิทธิใช้ตั้งแต่ชั้นสารวัตรขึ้นไปรับรองว่ามีความสามารถที่จะควบคุมการใช้รถบำรุงทางได้ควบคุมแทนอนึ่ง รถบำรุงทางที่จะนำออกใช้ ต้องมีเครื่องสัญญาณที่รถคือ ในเวลากลางวันต้องปักธงแดงให้ยอดธงสูงจากระดับสันรางอย่างน้อย 2.50 เมตร ในเวลากลางคืนต้องมีโคมไฟแดงแสดงให้เห็นได้จากข้างหน้าและข้างหลัง

<u>การใช้รถบำรุงทางบรรทุกต้องได้รับหลักฐานจากนายสถานีทางสะดวก</u>

[1] ก่อนที่จะนำรถบำรุงทางบรรทุกออกใช้ผู้ควบคุมต้องกรอก**แบบกรฟ.12** (รูปที่ 9-2) หนึ่งชุดรวม 3 ฉบับ แล้วนำไปให้นายสถานีทางสะดวกกรอกกำหนดเวลาของขบวนรถที่ออกจากสถานีทางสะดวกทั้ง 2 ข้าง เข้าไปในตอนที่จะใช้รถบำรุงทางบรรทุกทำงานพร้อมทั้งลงชื่อรับรองทั้ง 3 ฉบับแล้วให้นายสถานีทางสะดวกเก็บไว้ 2 ฉบับ ส่วนอีกฉบับหนึ่งตนต้องนำไปกับรถบำรุงทางบรรทุก

[2] เมื่อจัดการตา [1] แล้ว นายสถานีทางสะดวกจะต้องส่ง**แบบกรฟ.12** ที่ได้กรอกกำหนดเวลาไว้ให้กับนายสถานีทางสะดวกอีกขางหนึ่งของทางตอนนั้นทราบล่วงหน้าโดยรถขบวนแรกซึ่งกำหนดให้หยุด ณ สถานีทางสะดวกทั้ง 2 แห่งนั้นแต่ถ้าไม่สามารถส่งแบบ กรฟ.12 ให้กับสถานีทางสะดวกอีกข้างหนึ่งทราบล่วงหน้าได้ก็ให้โทรศัพท์แจ้งวันและเวลาที่รถบำรุงทางบรรทุกที่จะใช้ทำงานและขบวนรถที่ได้กรอกไวในแบบกรฟ.12 ให้ทราบ เมื่อนายสถานีทางสะดวกอีกข้างหนึ่งใดรับแบบกรฟ.12 หรือได้รับแจ้งทางโทรศัพท์ก็ดีจะต้องตรวจสอบดูว่าได้กรอกจำนวนขบวนรถในแบบกรฟ.12 ซึ่งออกจากสถานีทางสะดวกทั้ง 2 ข้างไว้ถูกต้องครบถ้วนหรือไม่ ถ้าขาดตกบกพร่องก็ให้ทักท้วง

[3] ขบวนรถทุกขบวนที่ไม่ได้กรอกลงในแบบกรฟ.12 เมื่อจะเดินเข้าสู่ทางตอนนั้นในระหว่างเวลาที่กำหนดให้ใช้รถบำรุงทางบรรทุกทำงาน นายสถานีทางสะดวกต้นตอนจะต้องแจ้งให้พนักงานขับรถและพนักงานรักษารถทราบโดยมีหลักฐานว่ามีรถบำรุงทางบรรทุกทำงานอยู่ในทางตอนนั้น และผู้ควบคุมไม่ทราบว่าจะมีขบวนรถนั้นเดิน ซึ่งพนักงานขับรถต้องใช้ความระมัดระวังถ้ารถขบวนนั้นกำหนดไม่หยุดที่สถานีของตนและมีเวลาพอก็ให้นายสถานีทางสะดวกต้นตอนโทรศัพท์แจ้งไปยังพนักงานควบคุมการเดินรถแขวงเพื่อแจ้งต่อให้พนักงานขับรถและพนักงานรักษารถที่สถานีที่ขบวนรถนั้นกำหนดให้หยุดก่อนถึงสถานีของตน ถ้าไม่ มีเวลาพอที่จะทำเช่นนี้ได้นายสถานีทางสะดวกต้นตอนต้องหยุดขบวนรถทุกสถานีของตน

[4] ข้อความตาม [1] [2] และ [3] มิให้ใช้บังคับกับการใช้รถบำรุงทางบรรทุกในพื้นที่ควบคุมการเดินรถจากศูนย์กลาง ทั้งนี้ผู้ควบคุมต้องระมัดระวังป้องกันมิให้มีอันตรายเกิดขึ้น

ตัวอย่างใบนำใช้รถบำรุงทาง (แบบ กรฟ.12)

การรถไฟแห่งประเทศไทย

ใบนำใช้รถบำรุงทางบรรทุก (แบบ กรฟ.12)

สถานี .....

ข้าพเจ้า .....

ตำแหน่ง ..... มีความประสงค์

จะนำรถบำรุงทางบรรทุก ออกใช้ระหว่างเสาโทรเลขที่ .....

ถึงเสาโทรเลขที่ ..... ระหว่างสถานี .....

กับสถานี ..... ในวันที่ .....

ตั้งแต่เวลา ..... น. ถึงเวลา ..... น.

ลงชื่อ .....

วันที่ ...../ ...../ .....

สถานี .....

ในระหว่างที่นำรถบำรุงทางบรรทุกออกใช้ในทางตอนนี้มีขบวนรถเดินตามสมุดกำหนดเวลาเดินรถหรือประกาศเดินรถ ดังนี้:-

ขบวนรถ ..... ออกจากสถานี ..... เวลา .....น.

ถึงสถานี .... เวลา ..... น. ขณะนี้ช้า ..... นาที

ขบวนรถ ..... ออกจากสถานี ..... เวลา .....น.

ถึงสถานี .... เวลา ..... น. ขณะนี้ช้า ..... นาที

ขบวนรถ ..... ออกจากสถานี ..... เวลา .....น.

ถึงสถานี .... เวลา ..... น. ขณะนี้ช้า ..... นาที

ขบวนรถ ..... ออกจากสถานี ..... เวลา .....น.

ถึงสถานี .... เวลา ..... น. ขณะนี้ช้า ..... นาที

ลงชื่อ ..... นายสถานี

วันที่ ...../ ...../ ..... เวลา ..... น.

(ให้กรอกข้อความชุดละ 3 ฉบับ โดยใช้กระดาษคาร์บอน ห้ามเขียนทีละฉบับ)

รูปที่ 9-2 ตัวอย่างแบบฟอร์ม กรฟ.12 ใบนำใช้รถบำรุงทาง



การป้องกันรถบำรุงทางบรรทุก

- เมื่อนำรถบำรุงทางบรรทุกออกใช้งานผู้ควบคุมรถบำรุงทางบรรทุกต้องจัดคนที่ไปกับรถบำรุงทางนั้นทำหน้าที่ดูขบวนรถในทิศทางข้างหน้าและข้างหลังด้วย หากมีขบวนรถปรากฏขึ้นผู้ควบคุมจะต้องรีบยกรถบำรุงทางบรรทุกลงจากทาง
- เมื่อปรากฏว่าขบวนรถที่กรอกลงในแบบกรฟ.12 (รูปที่ 9-2) ไม่มาตามที่กำหนดไว้ และมีความจำเป็นต้องใช้ รถบำรุงทางบรรทุกในทางตอนที่มองไปทางข้างใดข้างหนึ่งหรือทั้งสองข้างเห็นไม่ได้ไกลกว่า 1,000 เมตร ให้ผู้ควบคุมรถบำรุงทางบรรทุกใช้โทรศัพท์ฉุกเฉินหรือเครื่องมือสื่อสารอื่น ๆ เช่น เครื่องรับ-ส่งวิทยุโทรศัพท์เคลื่อน ที่ ฯลฯ (ถ้ามี) รับฟังข่าวความเคลื่อนไหวของขบวนรถหรือสอบถามเวลาเดินรถจากพนักงานควบคุมการเดินรถแขวงให้แน่ชัดเสียก่อน หากเห็นว่าเป็นการปลอดขบวนรถแน่นอนแล้วจึงใช้รถบำรุงทางบรรทุกต่อไปได้

การยกรถบำรุงทางออกจากทาง

รถบำรุงทางขนาดเบาและรถบำรุงทางบรรทุกที่ออกไปทำงานตามทางต้องมีจำนวนพนักงานให้พอที่จะยกรถออกจากทางได้ และต้องยกรถออกจากทางให้พ้นเขตโครงสร้างก่อนที่ขบวนรถจะมาถึง

ห้ามพ่วงรถบำรุงทางไปกับขบวนรถ

ห้ามมิให้พ่วงรถบำรุงทางไปกับขบวนรถเป็นอันขาด

การบรรทุกรถบำรุงทางไปกับขบวนรถ

ก่อนที่จะบรรทุกรถบำรุงทางไปกับขบวนรถจะต้องได้รับความตกลงจากพนักงานรักษารถว่าจะบรรทุกที่ใดทั้งนี้ต้องจัดการบรรทุกและตรวจตราให้รถบำรุงทางอยู่มั่นคงตลอดจนการขนลงต้องใช้ความระมัดระวังอย่าให้เกิดความเสียหายแก่สมภาระและหีบห่อวัตถุ

การเก็บรถบำรุงทาง

รถบำรุงทางเมื่อไม่ใช้การ ต้องนำออกจากทางให้พ้นเขตโครงสร้างพร้อมทั้งปลดธงแดงหรือโคมไฟแดงประจำรถออกด้วย และในการเก็บรถบำรุงทางต้องใส่กญแจให้มั่นคง

ความเร็วสูงสุดของรถที่ใช้ในการบำรุงทาง

ห้ามมิให้รถบำรุงทางขนาดหนัก รถกลบำรุงทางและรถยนต์ตรวจการณ์ ขนาดหนักใช้ความเร็วสูงสุดของรถเกินกว่า70 กิโลเมตรต่อชั่วโมงห้ามมิให้รถบำรุงทางขนาดเบา และรถบำรุงทางบรรทุกใช้ความเร็วสูงสุดเกินกว่า 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเว้นแต่จะมีคำสั่งของการรถไฟแห่งประเทศไทยกำหนดไว้เป็นอย่างอื่น

ข้อปฏิบัติกรณีเหตุอันตรายในการทำงานบนทางรถไฟ

ให้มีการปฏิบัติเป็นไปตาม ข้อกำหนดดังนี้



หน้าที่รักษาความปลอดภัย

1) พนักงานทุกคนต้อง ปฏิบัติดังนี้

(1.1) ระมัดระวังให้กิจการเดินรถเป็นไปด้วยความปลอดภัยแก่ประชาชน

(1.2) รายงานเหตุการณ์อันใดซึ่งผิดระเบียบหรืออาจจะเป็นอันตรายแก่การเดินรถต่อผู้บังคับบัญชาทันที

(1.3) จัดการช่วยเหลือเมื่อจำเป็นอย่างเต็มความสามารถในกรณีที่เกิดเหตุอันตรายหรืออุบัติเหตุ

2) พนักงานทุกคนเมื่อได้รับทราบหรือเห็นว่า

(2.1) สัญญาณประจำที่ใด ๆ ชำรุดใช้การไม่ได้

(2.2) ทางชำรุดหรือมีเหตุที่อาจทำให้ทางชำรุด

(2.3) มีสิ่งหนึ่งสิ่งใดบกพร่องในขบวนรถ

(2.4) มีเหตุการณ์ใด ๆ ผิดปกติซึ่งเกรงว่าจะไม่เป็นการปลอดภัยต่อขบวนรถหรือประชาชน จะต้องจัดการป้องกันทันที มิให้เกิดเหตุอันตรายเท่าที่สามารถจะทำได้ ทั้งนี้ ถ้าจำเป็นต้องแจ้งเหตุให้นายสถานีทราบโดยเร็วที่สุดด้วย

<u>ต้องสืบสวนเมื่อขบวนรถช้าตามทาง</u>

ถ้าปรากฏว่า ขบวนรถไปเสียเวลาช้าอยู่ตามทางในตอนใดจนผิดสังเกตนายสถานีทางสะดวกทั้งสองข้างต้องจัดการ สืบสวนโดยวิธีใด ๆ เพื่อให้ได้ความว่าขบวนรถนั้นช้าอยู่ ณ ที่ใดเพราะเหตุอย่างไร ในการทั้งนี้ให้นายสถานีทางสะดวกขอความช่วยเหลือจากพนักงานบำรุงทางซึ่งอยู่ใกล้เคียงได้

<u>ขบวนรถต้องเสียเวลาในตอนไม่ว่ากรณีใด ๆ เกินกว่า 15 นาที</u>

ในกรณีที่ขบวนรถเสียเวลาและต้องหยุดในตอนไม่ว่ากรณีใด ๆ เกินกว่า 15 นาที ให้พนักงานรักษารถใช้โทรศัพท์ฉุกเฉินประจำขบวนรถแจ้งให้พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงทราบถึงสถานที่และเหตุที่เกิดขึ้นเพื่อดำเนินการต่อไปเมื่อได้แจ้งเหตุให้พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงทราบแล้วแต่ภายหลังได้แก้ไขให้ขบวนรถสามารถที่จะเดินไปสู่สถานีทางสะดวกข้างใดข้างหนึ่งได้ก็ให้พนักงานรักษารถติดต่อโดยทางโทรศัพท์ฉุกเฉินแจ้งให้พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงทราบเพื่อสั่งการต่อไปอีกครั้งหนึ่งในกรณีโทรศัพท์ฉุกเฉินใช้การไม่ได้ ให้พนักงานรักษารถใช้ดุลยพินิจแก้ไขเหตุการณ์ในการแจ้งข่าวให้ผู้เกี่ยวข้องทราบ

<u>การปิดทางในตอนที่มีอุบัติเหตุ</u>

เมื่อนายสถานีทางสะดวกได้รับข่าวอุบัติเหตุซึ่งกระทำให้ขบวนรถเดินผ่านไปไม่ได้ในทางตอนที่เกิดเหตุขึ้นต้องปฏิบัติดังต่อไปนี้

1) ถ้าผู้รับข่าวเป็นนายสถานีทางสะดวกต้นตอนหรือปลายตอนนั้นให้ประกาศปิดทางตอนนั้นทันที แต่ถ้าเป็นนายสถานทางสะดวกอีกแล้วจะต้องแจ้งเหตุให้พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงทราบเพื่อสั่งการ

2) แจ้งเหตุอันตรายพร้อมทั้งขอความช่วยเหลือตามที่จำเป็นไปยังเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องโดยเร็วที่สุด



การอนุญาตให้ขบวนรถ

1) การอนุญาตให้ขบวนรถเดินเข้าไปในทางตอนที่เกิดเหตุ ให้ปฏิบัติตามระเบียบการใช้ตั๋วไม้ได้ทางสะดวกโดยอนุโลม และนายสถานีทางสะดวกต้นตอนออกตั๋วไม้ได้ทางสะดวก โดยหมายเหตุให้ชัดเจนว่าทางตอนที่จะให้ขบวนรถเข้าไปนั้นมีเหตุขัดขวางอยู่ที่ใด พนักงานขับรถต้องเปิดหวีดเนือง ๆ และเดินโดยใช้ความระมัดระวังอย่างยิ่ง ถ้าแห่งใดมองไปขางหน้าไม่เห็นทางถนัดก็ให้ใช้ความเร็วไม่เกิน 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมงทั้งนี้ นายสถานีทางสะดวกต้นตอนต้องแจ้งให้นายสถานีทางสะดวกปลายตอนทราบไว้ด้วยทุกครั้งที่ขบวนรถจะเข้าไปหรือได้ออกมาแล้ว ถ้าหากโทรศัพท์หรือเครื่องสื่อสารอื่นใช้การไม่ได้นายสถานีทางสะดวกต้นตอนต้องบันทึกเหตุนี้ไว้ในตั๋วไม้ได้ทางสะดวกด้วยเพื่อให้พนักงานขับรถระวังยิ่งขึ้น

2) เมื่อจำเป็นต้องส่งขบวนรถเข้าไปทั้ง 2 ข้าง นายสถานีทางสะดวกต้นตอนทั้ง 2 ข้าง ต้องแจ้งให้ทราบซึ่งกันและกัน และปฏิบัติตาม (1) โดยอนุโลม

3) ขบวนรถซึ่งเดินถอยกลับจากสถานที่ที่เกิดเหตุเมื่อถึงสถานีทางสะดวกต้นตอน พนักงานขับรถต้องส่งตั๋วไม้ได้ทางสะดวกคืนให้นายสถานีทางสะดวก 1 ฉบับ ในกรณีที่ได้จัดตั้งโทรศัพท์ ณ ที่เกิดเหตุและส่งข่าวติดต่อกับพนักงานควบคุมการเดินรถแขวงได้แล้วก่อนที่จะอนุญาตให้ขบวนรถเดินเข้าไปในทางตอนที่เกิดเหตุ พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงจะต้องได้รับอนุญาตจากเจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมเหตุการณ์ ณ ที่เกิดเหตุก่อนทุกครั้ง แล้วพนักงานควบคุมการเดินรถแขวงจึงสั่งการให้นายสถานีทางสะดวกต้นตอนออกตั๋วไม้ได้ทางสะดวกให้พนักงานขับรถได้และก่อนที่จะอนุญาตให้ขบวนรถออกจากที่ที่เกิดเหตุ เจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมเหตุการณ์ต้องได้รับอนุญาตจากพนักงานควบคุมการเดินรถแขวงก่อนทุกครั้งและพนักงานควบคุมการเดินรถแขวงจะต้องแจ้งให้นายสถานีทางสะดวกด้านนั้นทราบด้วย ในการอนุญาตใหขบวนรถเดินเข้าไปหรือออกจากที่เกิดเหตุ นายสถานีทางสะดวกต้นตอนหรือเจ้าหน้าที่ผู้ควบคุม ณ ที่เกิดเหตุต้องหมายเหตุข้อความที่พนักงานควบคุมการเดินรถแขวงสั่งการลงในตั๋วไม้ได้ทางสะดวกด้วย

การประกาศเปิดทางตอนที่ได้ประกาศปิดไว้เพราะมีอุบัติเหตุ

การประกาศเปิดทางตอนที่มีเหตุเกิดขึ้น ซึ่งได้ประกาศปิดทางไว้แล้วนั้นจะกระทำได้ต่อเมื่อได้รับแจ้งจากเจ้าหน้าที่ว่าได้จัดการแก้ไขเหตุขัดข้องเสร็จเรียบร้อยแล้ว พร้อมทั้งไม่มีขบวนรถหรือสิ่งกีดขวางใด ๆ ในทางตอนนั้น

ผู้มีหน้าที่ควบคุมสั่งการเมื่อมีเหตุอันตราย

เมื่อมีเหตุอันตรายใด ๆ เกิดขึ้น เช่นรถตกรางฯลฯ ให้หัวหน้าหน่วยงานประจำท้องถิ่นในฝ่ายการเดินรถ ฝ่ายการช่างกล และฝ่ายการช่างโยธา ร่วมมือและรับผิดชอบดำเนินงานให้ขบวนรถผ่านไปได้โดยเร็วที่สุด โดยปฏิบัติตการให้เป็นไปตามข้อบังคับและระเบียบการ ในกรณีหัวหนาหน่วยงานประจาท้องถิ่นยังไปไม่ถึง ณ ที่เกิดเหตุ ให้พนักงานในสังกัดฝ่ายหนึ่งฝ่ายใด3 ฝ่ายที่กล่าวข้างต้นซึ่งงมีอาวุโส ณ ที่นั้น เป็นผู้ควบคุมสั่งการและรับผิดชอบดูแลให้พนักงานผู้น้อยปฏิบัติการให้เป็นไปตามข้อบังคับ และระเบียบการจนทุกประการจนกว่าเจ้าหน้าที่ประจาท้องถิ่นนจะไปถึง



การแจ้งเหตุอันตรายแก่นายสถานีทางสะดวก

ถ้ามีเหตุอันตรายประการใด ๆ เกิดขึ้นแก่การเดินรถพนักงานทุกคนที่รู้เห็นต้องรีบจัดการป้องกนอันตรายอันจะพึงเกิดขึ้นอีก และแจ้งให้นายสถานีทางสะดวก ซึ่งอยู่ใกล้ที่สุดทราบโดยวิธีเร็วที่สุด ข้อความที่ต้องแจ้งแก่นายสถานีทางสะดวกมีดังต่อไปนี้

1) สถานที่เกิดเหตุใกล้กับเสาโทรเลขที่เท่าใด ระหว่างสถานีใด

2) วันและเวลาที่เกิดเหตุ

3) สาเหตุที่เกิดขึ้น

4) มีสิ่งใดเสียหายบ้าง

5) ต้องเสียเวลาการเดินรถประมาณเท่าใด

6) ต้องการความช่วยเหลืออย่างใดบ้าง

7) ต้องแจ้งจำนวนบุคคลที่ได้รับบาดเจ็บและแยกประเภทว่าเป็นผู้โดยสารพนักงานหรือบุคคลภายนอก

8) ต้องแจ้งว่าบาดเจ็บนั้นสาหัสเพียงใด และต้องการความช่วยเหลือของนายแพทย์หรือไม่

9) ในกรณีที่รถตกรางต้องแจ้งชนิดรถและจำนวนล้อรถที่ตกรางหรือชำรุดและต้องการความช่วยเหลือเกี่ยวกับรถปั้นจั่นและการขนถ่ายสินค้าหรือไม่

เหตุอันตรายอุกฉกรรจ์ต้องแจ้งเจ้าพนักงานฝ่ายปกครอง

ถ้ามีเหตุอันตรายอุกฉกรรจ์เกิดขึ้นแก่บุคคลหรือทรัพย์สิน หรือมีผู้เจตนาประทุษร้ายเอาสิ่งใดสิ่งหนึ่งวางกีดขวางทาง หรือทำประการใด ๆ เพื่อให้ขบวนรถเป็นอันตรายนอกจากจะต้องแจ้งไปยังเจ้าหน้าที่รถไฟโดยมีหลักฐานแล้วให้นายสถานีทางสะดวกจัดการแจ้งไปให้เจ้าพนักงานฝ่ายปกครองท้องที่เกิดเหตุทราบเรื่องทันทีด้วย

ประเภทของอุบัติเหตุที่นายสถานีต้องแจ้งเหตุโดยมีหลักฐาน

เมื่อมีเหตุอันตรายหรืออุบัติเหตุดังตัวอย่างต่อไปนี้ เกิดขึ้น ให้นายสถานีทางสะดวกแจ้งเหตุไปยังเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้อง โดยมีหลักฐานเหตุอันตรายอุกฉกรรจ์ต้องแจ้งเจ้าพนักงานฝ่ายปกครองประเภทของอุบัติเหตุที่นายสถานีต้องแจ้งเหตุโดยมีหลักฐาน

1) อุบัติเหตุแก่บุคคล

(1.1) อุบัติเหตุซึ่งมีบุคคลได้เสียชีวิตหรือบาดเจ็บสาหัสในเขตรถไฟ

(1.2) อุบัติเหตุซึ่งมีผู้โดยสารได้รับบาดเจ็บ

2) อุบัติเหตุต่อขบวนรถ

(2.1) มีผู้พยายามทำให้ขบวนรถตกราง โดยนำสิ่งกีดขวางมาวางไว้บนทาง

(2.2) รถจักร รถพ่วงชนกันหรือเบียดกัน ทำให้เกิดความเสียหายต่อขบวนรถหรือ ทรัพย์สินอื่น ๆ

(2.3) รถจักรรถพ่วงตกราง



(2.4) รถจักร รถพ่วงหลุดหรือไหลจากสถานีหรือตามทางในตอน

(2.5) ขบวนรถซึ่งเดินออกจากสถานีโดยไม่ได้รับอนุญาตตามระเบียบ

(2.6) รถจักรรถพ่วงหรือรถซึ่งเดินบนถนนชนเครื่องกั้นถนนของการรถไฟแห่งประเทศไทย

(2.7) รถจักร รถพ่วงโดนสิ่งกีดขวางหรือสัตว์มีชีวิตจนเป็นเหตุให้เครื่องประกอบรถหรือทางเสียหาย

3) อุบัติเหตุต่อรถจักร รถพ่วง ทาง สถานที่ โทรเลขโทรศัพท์ และเครื่อง สัญญาณประจำที่

(3.1) ทางชำรุดซึ่งขบวนรถจะเดินผ่านไปไม่ได้ เช่นน้ำท่วม ดินพัง สะพานชำรุด ฯลฯ

(3.2) เครื่องและสายโทรเลข โทรศัพท์ เครื่องทางสะดวก เครื่องสัญญาณประจำที่ และเครื่องประแจชำรุดใช้การไม่ได้

(3.3) รถจักร รถพ่วงของขบวนชำรุด ไม่สามารถจะเดินต่อไปได้

4) อุบัติเหตุอื่น ๆ

(4.1) ไฟไหม้ในเขตรถไฟซึ่งกระทำหรืออาจกระทำให้ทรัพย์สินข้างเคียงเสียหาย

(4.2) ไฟไหม้รถสะพาน หรือสถานที่ของรถไฟ

(4.3) การชิงทรัพย์ ปล้นทรัพย์ การพยายามจะปล้นทรัพย์บนขบวนรถหรือสถานที่รถไฟ

(4.4) คนตายในขบวนรถ

(4.5) พบศพในเขตของการรถไฟแห่งประเทศไทย

(4.6) เหตุการณ์อื่น ๆ ซึ่งได้ระบุไว้ว่าต้องแจ้งโดยมีหลักฐานตามข้อบังคับ

<u>บุคคลที่ต้องอันตราย</u>

1) บุคคลที่ได้รับบาดเจ็บ พนักงานประจำขบวนรถต้องทำการปฐมพยาบาลก่อน ถ้าหากมีอาการสาหัสซึ่งต้องการความช่วยเหลือจากนายแพทย์ทันทีก็ให้รีบจัดการส่งโดยยานใด ๆสุดแต่จะจัดได้สะดวกไปยังสถานที่พยาบาล

2) บุคคลที่ได้รับอันตรายถึงแก่ชีวิตให้พนักงานรักษารถบันทึกเหตุการณ์ร่วมกับพนักงานขับรถแล้วแจ้งให้นายสถานีแรกถึงข้างหน้าทราบ เพื่อแจ้งต่อเจ้าพนักงานฝ่ายปกครองท้องที่เกิดเหตุไปทำการชันสูตรพลิกศพต่อไป ส่วนศพคงปล่อยไว้ ณ ที่เกิดเหตุโดยไม่ต้องนำไปกับขบวนรถสำหรับขบวนรถที่ไปพบศพขวางทางอยู่ถ้าขบวนรถพอจะผ่านไปได้โดยไม่ทำให้ศพต้องถูกทำลายหรือเปลี่ยนสภาพไปแล้ว ก็ให้นำขบวนรถผ่านไปโดยไม่แตะต้องศพ นั้นแต่อย่างใดแต่ถ้าศพนั้นกีดขวางทาง ถ้านำขบวนรถผ่านจะต้อง ทับศพนั้นและทำให้สภาพศพเปลี่ยนแปลงไป ก็เพียงแต่ยกศพออกเสียให้พ้นการกีดขวางโดยไม่ต้องนำศพไปกับขบวนรถ ในกรณีดังกล่าวนี้ให้พนักงานรักษารถและพนักงานขับรถบันทึกเหตุการณ์ร่วมกันไว้แล้วแจ้งให้นายสถานีแรกถึงข้างหน้าทราบเพื่อแจ้งต่อเจ้าพนักงานฝ่ายปกครองท้องที่เกิดเหตุไปทำการชันสูตรพลิกศพต่อไป

3) ในรายงานละเอียดต้องแจ้งข้อความต่อไปนี้

ชื่อผู้ถูกบาดเจ็บ เพศ อายุ ตำบลที่อยู่ อาชีพเป็นพนักงานหรือผู้โดยสารหรือบุคคลภายนอก สาเหตุที่เกิดขึ้นบาดแผลมากน้อยเพียงใด



รถพ่วงชำรุดตัดไว้ที่สถานี

1) รถพ่วงคันใดเกิดชำรุด (รวมทั้งเพลาร้อน)ต้องตัดไว้ ณ สถานีที่มีทางหลีก ถ้าสถานีนั้นมีพนักงานตรวจรถประจำอยู่ ก็ให้นายสถานีแจ้งให้พนักงานตรวจรถทราบเพื่อจัดการซ่อม ถ้าเป็นสถานีที่ไม่มีพนักงานตรวจรถประจำอยู่ก็ให้นายสถานีโทรศัพท์ แจ้งพนักงานควบคุมการเดินรถแขวงให้ทราบเพื่อแจ้งไปยังสารวัตรรถจักรหรือสารวัตรรถพ่วงใกล้ที่สุดทราบโดยมีหลักฐานเพื่อจัดการซ่อม

2) ถ้าเป็นรถบรรทุกสัตว์มีชีวิตหรือสินค้าที่เสียหายได้ง่าย นายสถานีต้องจัดหารถพ่วงที่ใช้แทนกันได้มารับช่วงขนถ่ายแล้วจัดส่งต่อไป โดยหมายเหตุในบัญชีสินค้าให้ชัดเจนตลอดจนเหตุที่เกิดชำรุด

การตรวจรถพ่วงที่ตกราง

1) รถพ่วงในขบวนรถที่ได้ตกรางในตอนนอกเขตสถานีและยกขึ้นได้แล้วพนักงานขับรถต้องตรวจดู เมื่อเห็นว่าสมควรจะลากจูงต่อไปได้ ก็ให้ลากจูงไปตัดไว้ ณ สถานีที่มีทางหลีกข้างหน้า

2) ห้ามส่งรถพ่วงที่ได้ตกรางแล้วและตัดไว้ที่สถานีตาม (1) ไปกับขบวนรถจนกว่าเจ้าหน้าที่ชั้นสารวัตรหรือผู้แทนจะได้ตรวจและอนุญาตให้ส่งต่อไป



บทที่ 10 การออกแบบและก่อสร้างทางระบายน้ำ

10.1 ทั่วไป

คู่มือฉบับนี้ได้แสดงรายละเอียดประกอบการออกแบบและการก่อสร้างระบบระบายน้ำบนทางรถไฟตามมาตรฐาน มขร S-T-010-256X “มาตรฐานระบบระบายน้ำบนทางรถไฟ” โดยมีเนื้อหาครอบคลุมการระบายน้ำจากส่วนโครงสร้างรางรถไฟ (Track Formation) ส่วนรองรับคันทางรถไฟ (Supporting Embankments) และทางตัด (Cuttings)

อนึ่ง ปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อการระบายน้ำบนทางรถไฟ จำเป็นจะต้องได้รับการพิจารณาเพื่อเป็นการป้องกัน และบรรเทาปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับการระบายน้ำ ทั้งนี้ เพื่อเป็นการรับประกันว่าทางรถไฟจะสามารถให้บริการและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องตามมาตรฐาน มขร S-T-010-256X ซึ่งการละเลยปัญหาด้านการระบายน้ำ หรือการออกแบบระบบระบายน้ำที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่สำคัญ แล้วอาจนำไปสู่การวิบัติของระบบโครงสร้าง และการให้บริการของทางรถไฟในที่สุด ดังนั้นการทดสอบ ตรวจสอบ และการบำรุงรักษาระบบระบายน้ำอย่างสม่ำเสมอจึงเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่สำคัญสำหรับระบบทางรถไฟ

คู่มือฉบับนี้ครอบคลุมการระบายน้ำของโครงสร้างทางรถไฟ (Track Formation) ทางถม (Embankment) และทางตัด (Cutting) ในขณะที่การออกแบบระบบระบายน้ำจากชานชาลา อาคาร สะพานยกระดับ สะพานทางเดิน พื้นที่ว่าง ถนนทางเข้า-ออก และการระบายน้ำจากพื้นที่ข้างเคียงเข้ามาในเขตทางรถไฟไม่ครอบคลุมในคู่มือนี้ อีกทั้งคู่มือฉบับนี้ยังไม่ครอบคลุมการออกแบบท่อลอด (Culvert) ตลอดจนการเลือกขนาดของท่อลอด สำหรับทางรถไฟที่มีลักษณะพิเศษ เช่น รางวางบน Viaduct สามารถใช้แนวทางในคู่มือการออกแบบและการระบายน้ำบนสะพานและในทางลอด (กรมทางหลวง) ในการออกแบบงานระบายน้ำสำหรับรางรถไฟประเภทอื่นที่จำแนกในมาตรฐาน มขร S-T-001-256x และโครงสร้างส่วนอื่น สามารถประยุกต์ใช้แนวทางของ Southern California Regional Rail Authority (SCRRA Design Criteria Manual) หรือมาตรฐานอื่นหรือเอกสารอื่นที่เกี่ยวข้องเป็นแนวทาง

ทั้งนี้ หากการนำคู่มือฉบับนี้ไปใช้อ้างอิง อาจจำเป็นต้องพิจารณา ปรับปรุงข้อกำหนด หลักเกณฑ์บางประการให้สอดคล้องตามลักษณะหรือข้อจำกัดของงานในพื้นที่ให้มีความเหมาะสม

10.1.1 นิยาม

- **การระบายน้ำ (Drainage)** คือ การดัก (Interception) การรวบรวม (Collection) แล้วท้ายที่สุดเป็นการระบายน้ำ (Drainage หรือ Disposal of Water) ออกจากระบบทางรถไฟ ไม่ว่าจะทางพื้นผิวดิน (Surface Drainage) หรือใต้ผิวดิน (Subsurface Drainage)



- **ความถี่ฝนในการออกแบบ (Design Frequency)** คือ โอกาสความน่าจะเป็น (Probability) ที่ฝนในปีใด ๆ จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า x ที่กำหนดให้ หรือ $P(X \geq x)$

- **ฝนออกแบบ (Design Storm)** คือ การกำหนดรูปแบบของฝนเพื่อใช้ในการออกแบบระบบระบายน้ำโดยเป็นตัวแปรนำเข้า (Input) ของระบบสำหรับประเมินอัตราการไหลสูงสุด และปกติฝนออกแบบมักถูกกำหนดอยู่ในรูปของความลึก (Hyetograph)

- **พื้นที่รับน้ำฝน (Drainage Area หรือ Catchment Area, A)** คือ พื้นที่ทั้งหมดซึ่งน้ำท่าผิวดินที่เกิดจากฝนตกลงบนพื้นที่จะไหลออกสู่ทางออก (Point of Concentration หรือ Outlet) ดังนั้น พื้นที่รับน้ำจึงเกี่ยวข้องกับทางออกอันใดอันหนึ่งโดยเฉพาะระยะเวลาของการไหลรวมตัว (Time of Concentration, T_c) คือ ระยะเวลาตั้งแต่ฝนเริ่มตกบนพื้นที่รับน้ำหรือพื้นที่ระบายน้ำแล้วเกิดน้ำท่าผิวดินไหลไปยังจุดออก ระยะเวลาตั้งแต่เกิดน้ำท่าจนถึงเวลาที่เกิดอัตราการไหลสูงสุด ณ จุดออก เรียกว่าระยะเวลาของการไหลรวมตัว

- **ระยะเวลาที่ฝนตก (Rainfall Duration, D_r)** คือ เวลาที่ฝนเริ่มตกจนถึงเวลาที่ฝนหยุดตก

- **ความเข้มฝน (Rainfall Intensity, I)** คือ ความลึกของน้ำฝนต่อหน่วยเวลา และในกราฟ IDF มักมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร/ชั่วโมง

- **โค้งความสัมพันธ์ของ ความเข้มฝน-ระยะเวลา-ความถี่ (Intensity-Duration-Frequency Curve, IDF-Curve)** คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มฝน ช่วงเวลาการตกของฝน และความถี่ของการเกิดซ้ำ (รอบปีการเกิดซ้ำ)

- **รอบปีการเกิดซ้ำในการออกแบบ (Design Return Period, T_r)** คือ คาบการกลับหรือรอบการกลับของความรุนแรงของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น 1 ครั้งในรอบที่กำหนด เช่น ฝนตกหนักในรอบการเกิดซ้ำ 100 ปี หมายถึงขนาดความรุนแรงของฝนในรอบ 100 ปี โดยในรอบ 100 ปีนั้น อาจเกิดเหตุการณ์ที่ฝนอาจตกและมีความรุนแรงขนาดนั้นมากกว่า 1 ครั้งหรือ 1 เหตุการณ์ก็ได้

- **สัมประสิทธิ์น้ำท่า (Runoff Coefficient, C)** คือ ปัจจัยที่รวมเอาอิทธิพลหลัก ๆ ในพื้นที่รับน้ำฝนที่มีผลต่อกระบวนการเปลี่ยนน้ำฝนให้เป็นน้ำท่า ได้แก่ การดัก การซึม การเก็บกักน้ำผิวดิน ความลาดเทของพื้นที่รับน้ำ รูปร่างของพื้นที่รับน้ำ และพืชปกคลุมดิน

- **เส้นทางรถไฟระหว่างเมือง (Intercity Lines)** คือ เส้นทางรถไฟขนส่งสินค้าและผู้โดยสารที่มีระยะทางวิ่งยาวกว่าขบวนรถไฟฟ้าชานเมือง ได้แก่ ทางรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทยประเภท IPR และ IFR

- **อัตราการไหลสูงสุด (Maximum Discharge, Q_{peak})** คือ เมื่อเกิดฝนตกบนพื้นที่รับน้ำ น้ำบางส่วนจะถูกดูดซับเอาไว้ส่วนที่เหลือจะกลายเป็นน้ำท่าผิวดินไหลออกสู่ทางออกของพื้นที่รับน้ำ หากฝนตกนานเท่ากับระยะเวลาการไหลรวมตัว น้ำฝนที่ตกที่ทุก ๆ จุดบนพื้นที่รับน้ำจะไหลถึงทางออกพร้อม ๆ กันทำให้เกิดอัตราการไหลสูงสุด



สัญลักษณ์	ความหมาย
IPR (Intercity Passenger Rail)	ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งมวลชนระหว่างเมือง
IFR (Intercity Freight Rail)	ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งสินค้าระหว่างเมือง
C	สัมประสิทธิ์น้ำท่า
D_r	ระยะเวลาที่ฝนตก (ชม.)
IDF	โค้งความสัมพันธ์ของ ความเข้มฝน-ระยะเวลา-ความถี่ (Intensity-Duration-Frequency Curve)
K	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านวัสดุมวลรวม (Hydraulic Conductivity)
Q_{peak}	อัตราการไหลสูงสุด (ลบ.ม./วินาที)
T_c	ระยะเวลาของการไหลรวมตัว (ชม.)

10.2 ประเภทของระบบระบายน้ำบนทางรถไฟ

ถ้าระบบระบายน้ำของทางรถไฟไม่เหมาะสมหรือขาดประสิทธิภาพ น้ำส่วนเกินที่ระบายไม่ทันจะเกิดการท่วมขังซึ่งอาจส่งผลให้คันทางรถไฟ (Track Formation) เกิดการอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วสูญเสียกำลังแบกทานและพังทลายได้ การพังทลายหรือการพิบัติของคันทางรถไฟเนื่องจากปัญหาการระบายน้ำอาจจะอยู่ในรูปแบบการไหลของดินโคลนผ่านชั้นหินโรยทางขึ้นมาด้านบนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกของรถไฟที่กระทำซ้ำ ๆ หรือคันทางเสียกำลังแบกทานแล้วเกิดการอูด (Heaving) อย่างช้า ๆ หรือความเร็วของกระแสน้ำเองที่กัดเซาะดินหรือวัสดุคันทางรถไฟ และในท้ายที่สุดคันทางรถไฟก็อาจเกิดความเสียหายมากจนมิอาจรองรับการใช้งานได้อย่างปลอดภัยโดยทั่วไประบบระบายน้ำบนทางรถไฟสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

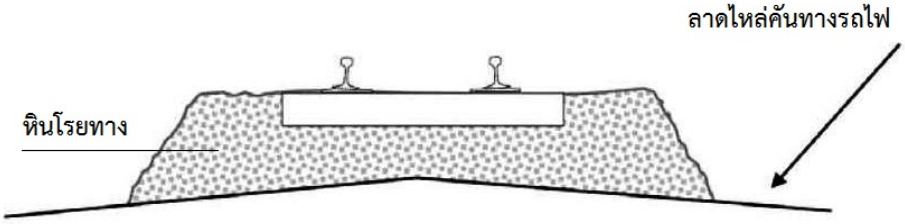
- ระบบระบายน้ำผิวดิน (Surface Drainage) และ
- ระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน (Subsurface Drainage)

10.3 ระบบระบายน้ำผิวดิน

การระบายน้ำผิวดินหมายถึงการรวบรวมน้ำท่าผิวดิน (Surface Runoff หรือ Excess Water) แล้วลำเลียงปริมาณน้ำทั้งหมดออกนอกพื้นที่ก่อนที่น้ำนั้นจะเข้าสู่โครงสร้างทางรถไฟ (Track Structure)

โดยทั่วไปมักออกแบบให้ลาดไหล่ทางของคันทางรถไฟมีความลาดเอียงที่มากพอที่จะทำให้น้ำระบายออกได้อย่างสะดวกทั้งสองด้านดังแสดงในรูปที่ 10-1 แต่ด้วยข้อจำกัดของบางพื้นที่ที่เป็นที่ราบมาก ๆ การ

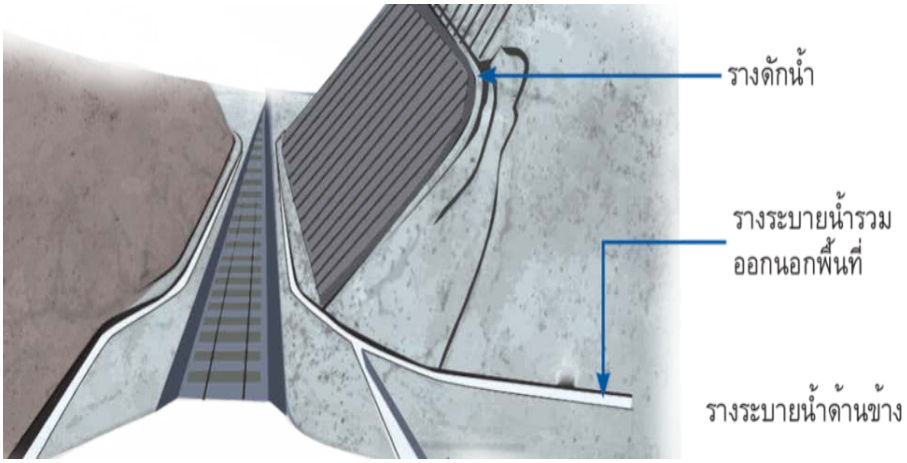
ก่อสร้างก็ไม่เหมาะสมที่จะยกไหล่ของคันทางให้มีความลาดเอียงที่มากพอได้ในแต่ละด้าน การระบายน้ำจึงต้องใช้แนวทางอื่น



รูปที่ 10-1 รูปตัดโดยทั่วไปของคันทางรถไฟ

เมื่อพิจารณาตามพฤติกรรมและลักษณะเฉพาะแล้ว ระบบระบายน้ำผิวดินบนทางรถไฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ดังแสดงในรูปที่ 10-2 นั้นคือ

- รางระบายน้ำด้านข้าง (Cess Drains)
- รางดักน้ำ (Catch Drains)
- รางระบายน้ำรวมออกนอกพื้นที่ (Mitre Drains)

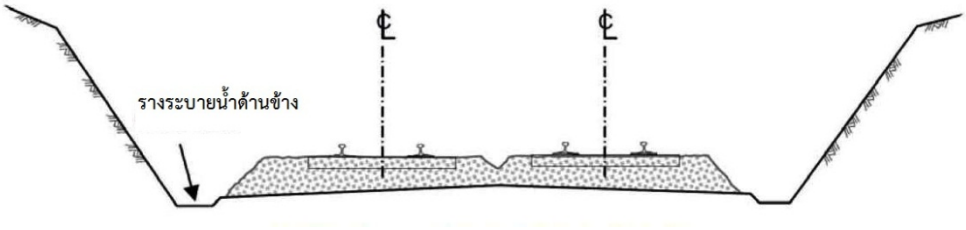


รูปที่ 10-2 ประเภทของระบบระบายน้ำผิวดิน

10.3.1 รางระบายน้ำด้านข้าง

ปกติรางระบายน้ำด้านข้างจะวางแนวขนานกับทางรถไฟดังแสดงในรูปที่ 10-3 รางระบายน้ำด้านข้างนี้จะลำเลียงน้ำที่ซึมผ่านชั้นหินโรยทางและน้ำท่าในเขตทางรถไฟ ซึ่งปริมาณน้ำนี้จะไหลไปสู่รางระบายน้ำรวมออกนอกพื้นที่ หน้าที่หลักของรางระบายน้ำด้านข้างคือลำเลียงน้ำท่าผิวดินออกนอกพื้นที่เขตทางรถไฟโดยเร็วที่สุดและป้องกันไม่ให้วัสดุคันทางรถไฟชื้น รางระบายน้ำด้านข้างจะก่อสร้างขนานตลอดแนวทางรถไฟ

โดยเฉพาะบริเวณทางตัด (Cutting) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวน้ำไม่สามารถระบายอย่างอิสระออกจากคันทางรถไฟได้

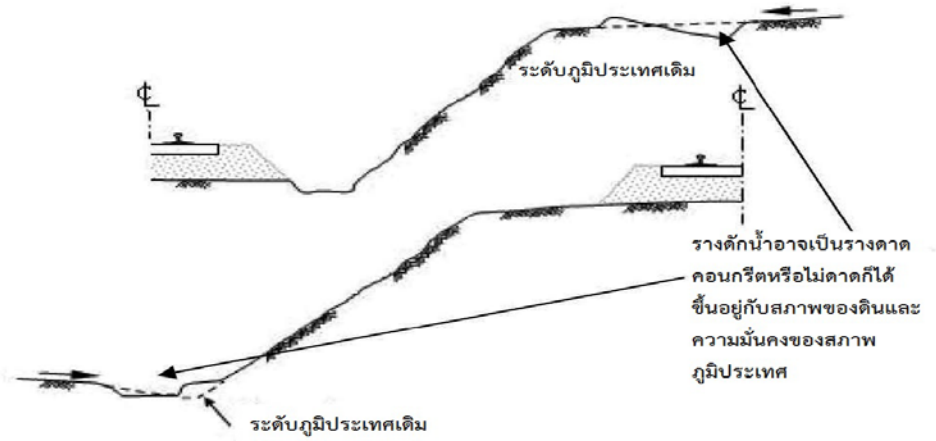


รูปที่ 10-3 ตำแหน่งโดยทั่วไปของรางระบายน้ำด้านข้าง

10.3.2 รางดักน้ำ

หน้าที่หลักของรางดักน้ำคือดักน้ำท่าผิวดินจากลาดทางตัดไม่ให้ไหลไปกระทบคันทางรถไฟ โดยหน้าที่ของรางดักน้ำคือต้องลดโอกาสที่น้ำท่าผิวดินที่อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อคันทางรถไฟและโครงสร้างอื่นที่เกี่ยวข้อง ปริมาณน้ำจากรางดักน้ำนี้จะระบายออกสู่รางระบายน้ำด้านข้าง รูปที่ 10-4 แสดงรูปตัดและตำแหน่งโดยทั่วไปของรางดักน้ำและรางดักน้ำนี้อาจเป็นรางดาดหรือไม่ดาดก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของดิน

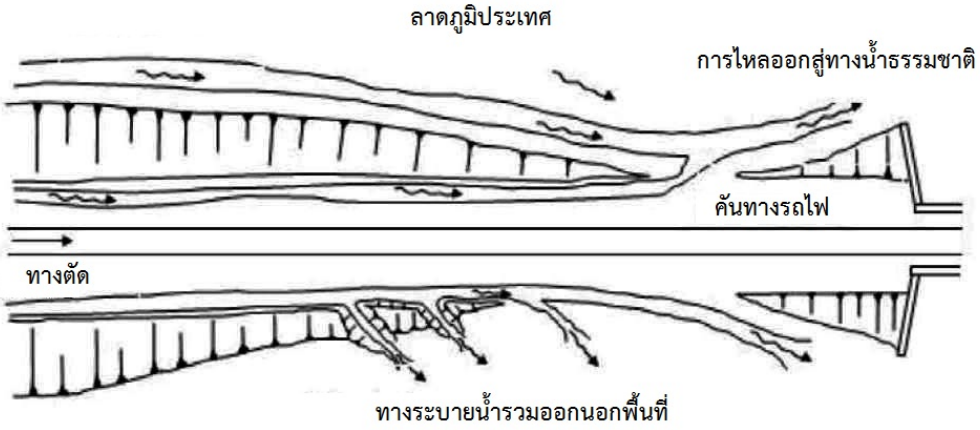
รางดักน้ำมักก่อสร้างบริเวณลาดเขาเพื่อที่จะดักน้ำที่ไหลจากด้านลาดเขาก่อนที่น้ำนั้นจะไหลเข้าสู่ทางตัด หากมีน้ำไหลผ่านทางตัดซึ่งโดยทั่วไปมักมีความลาดชันมาก น้ำจะไหลด้วยความเร็วสูงมากพอที่จะทำให้เกิดการกัดเซาะที่รุนแรงและท้ายที่สุดตะกอนที่เกิดจากการกัดเซาะนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพของรางระบายน้ำด้านข้างลดลง โดยทั่วไปควรพิจารณาก่อสร้างรางดักน้ำในทุก ๆ ความสูงของทางลาด 5 ม.



รูปที่ 10-4 รูปตัดและตำแหน่งโดยทั่วไปของรางดักน้ำ

10.3.3 รางระบายน้ำรวมออกนอกพื้นที่

รางระบายน้ำรวมออกนอกพื้นที่รูปที่ 10-5 คือระบบหรือเป็นจุดรวมน้ำที่รองรับน้ำจากรางดักน้ำและรางระบายน้ำด้านข้างเพื่อระบายน้ำออกสู่พื้นที่นอกเขตทางรถไฟ รางระบายน้ำรวมออกนอกพื้นที่นี้ควรวางอยู่เป็นช่วง ๆ อย่างสม่ำเสมอตลอดทางรถไฟทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ความเร็วของการไหลในรางระบายน้ำด้านข้างช้าเกินไปซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาการตกตะกอนในรางระบายน้ำด้านข้าง



รูปที่ 10-5 รางระบายน้ำรวมออกนอกพื้นที่

10.4 ระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน

การระบายน้ำใต้ผิวดินเหมาะสำหรับบางพื้นที่หรือในบางตำแหน่งนั้นมีความจำเป็นหรือมีข้อจำกัดถ้ามีการก่อสร้างระบบระบายน้ำบนผิวดิน ทั้งนี้เพื่อให้คันทางรถไฟและโครงสร้างที่เกี่ยวข้องทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นการรักษาเสถียรภาพของคันทางรถไฟจากปัญหาการระบายน้ำ ระบบระบายน้ำใต้ผิวดินจะถูกใช้ในกรณีดังต่อไปนี้

- การระบายน้ำจากโครงสร้างรถไฟ (Drainage of Track Structure)
- ควบคุมระดับน้ำบาดาล (Controlling of Groundwater)
- การระบายน้ำของทางลาด (Drainage of Slopes)

อนึ่ง ในตำแหน่งที่การก่อสร้างระบบระบายน้ำผิวดินทำได้ยากลำบาก หรือเป็นอุปสรรคต่อระบบอื่นโครงสร้างอื่น หรือมีข้อจำกัดด้านพื้นที่ หรือไม่มีตำแหน่งระบายน้ำผิวดินทิ้ง (Outlet) ที่เหมาะสมระบบระบายน้ำใต้ดินจะกลายเป็นทางเลือกสำหรับงานระบายน้ำ เช่นตำแหน่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

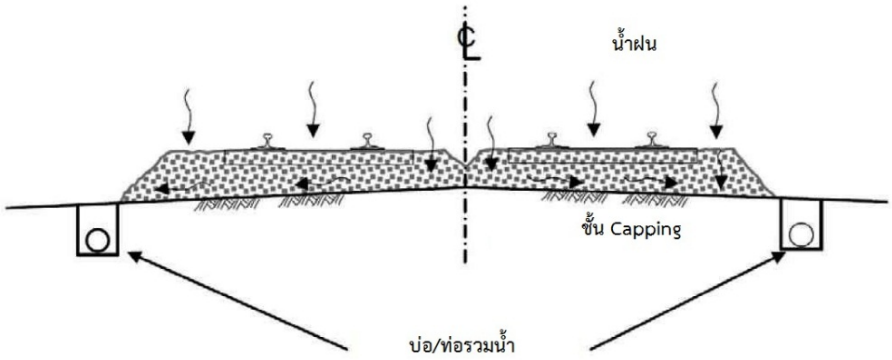
- ชานชาลา (Platforms)
- อุโมงค์ (Tunnels)
- กำแพงกันดิน (Retaining Walls)

- ทางตัด (Cuttings)
- ชุมทาง/ทางหลีก (Junctions)
- รางรถไฟหลายทางวิ่ง (Multiple Tracks)
- สะพาน (Bridges)

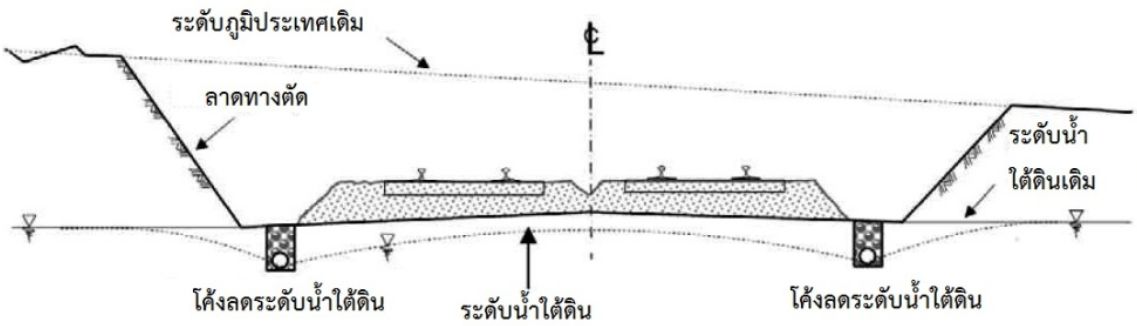
10.4.1 หน้าที่ของระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน

ระบบระบายน้ำใต้ผิวดินจะต้องทำหน้าที่หลักต่าง ๆ ดังนี้

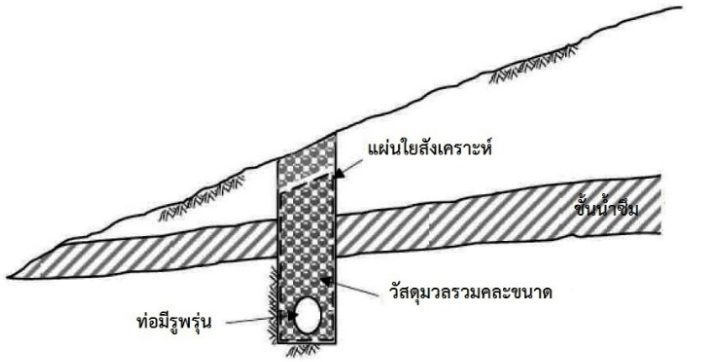
- เพื่อรวมน้ำที่ซึมผ่านชั้นหินโรยทางแล้วระบายออกจากคันทางรถไฟ (รูปที่ 10-6)
- เพื่อลดระดับน้ำบาดาลดังแสดงในรูปที่ 10-7
- เพื่อดักน้ำซึมหรือน้ำซับในชั้นน้ำซึมที่ไหลตามลาดชั้นทึบน้ำดังแสดงรูปที่ 10-8 หรือน้ำซึมเฉพาะที่ เช่น ลาดเขาหรือพื้นที่ให้น้ำ (Spring Inflow) ดังแสดงในรูปที่ 10-9



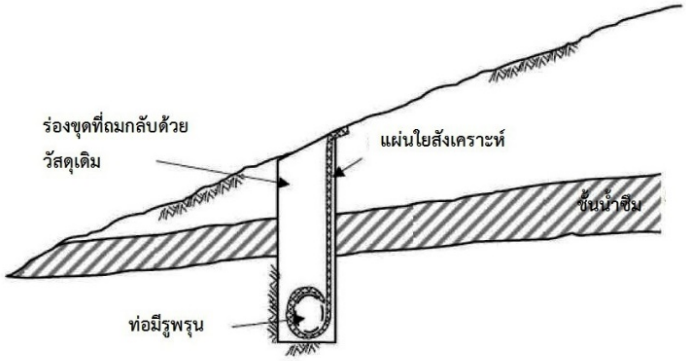
รูปที่ 10-6 การรวบรวมน้ำที่ซึมผ่านโครงสร้างของชั้นหินโรยทาง



รูปที่ 10-7 การลดระดับน้ำใต้ดิน

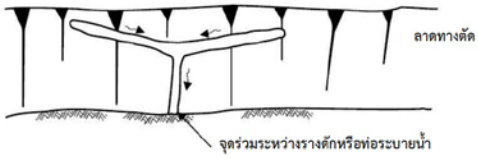


รูปแบบที่ 1: วัสดุมวลรวมคละขนาด แผ่นใยสังเคราะห์และท่อมีรูพรุนระบายน้ำ

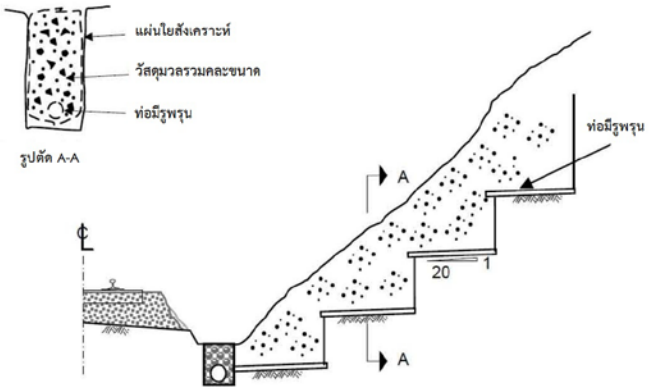


รูปแบบที่ 2: แผ่นใยสังเคราะห์ระบายน้ำ

รูปที่ 10-8 การดักน้ำจากชั้นน้ำซึม



รูปแปลนแสดงตำแหน่งการระบายน้ำซึมเฉพาะที่



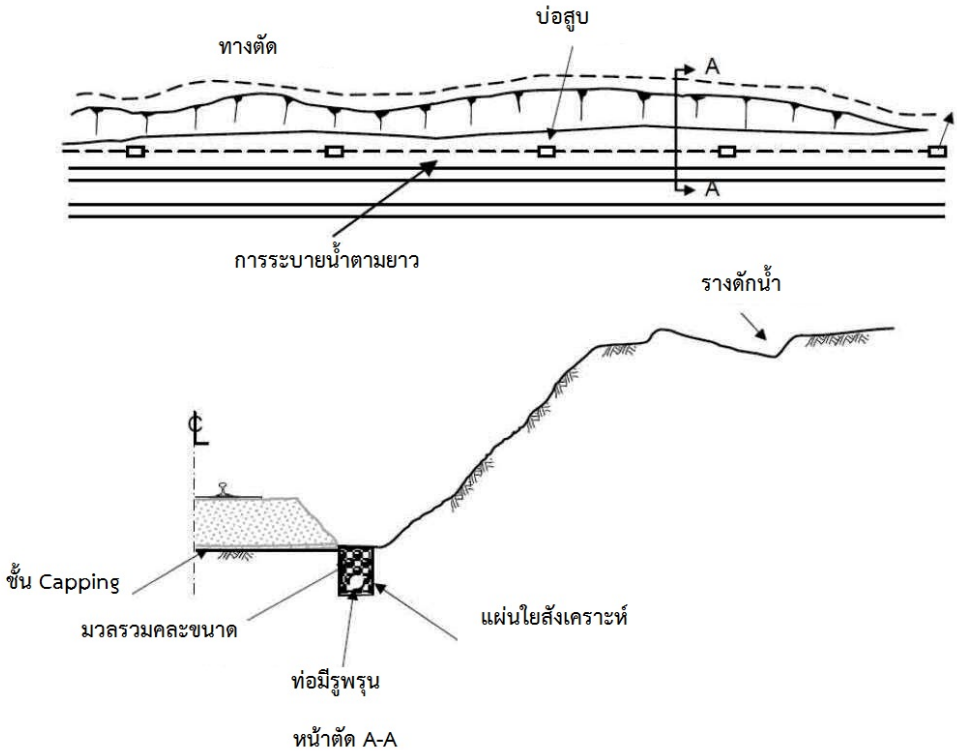
รูปที่ 10-9 การระบายน้ำซึมเฉพาะที่

10.4.2 ประเภทของระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน

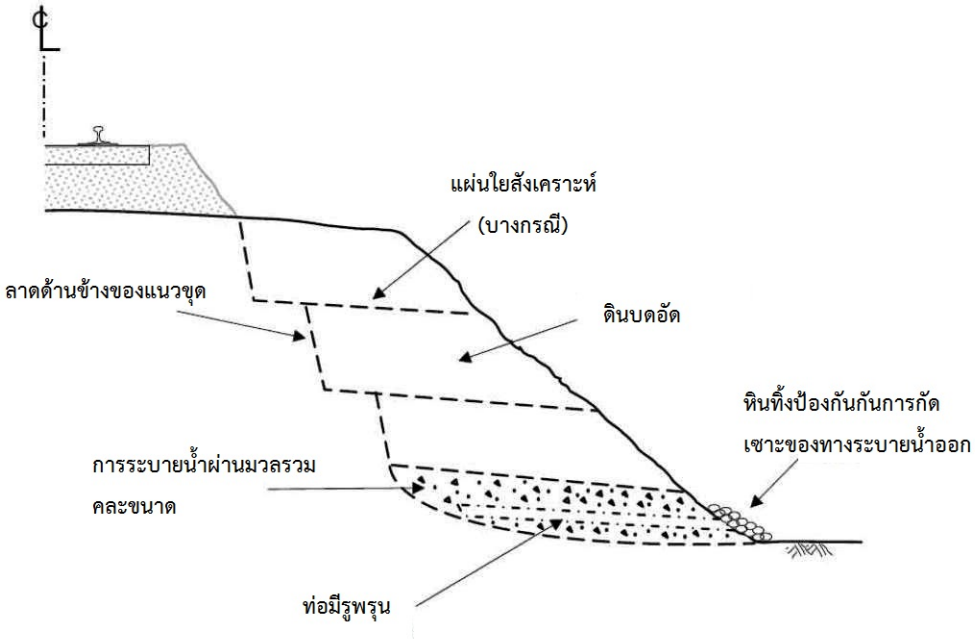
การแบ่งประเภทของระบบระบายน้ำใต้ผิวดินในงานทางรถไฟนั้น สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ โดยใช้ตำแหน่งและลักษณะของรูปร่างเป็นเกณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 10-10 ถึงรูปที่ 10-13 ได้แก่

- การระบายน้ำตามยาว (Longitudinal Drain)
- การระบายน้ำตามขวาง (Transverse Drain)
- การระบายน้ำผ่านผืนกรองระบายน้ำ (Drainage Blankets)
- นอกจากนั้นยังมีการระบายน้ำใต้ผิวดินที่เป็นแบบแนวดิ่งและแนวราบ (Vertical and Horizontal Drains)

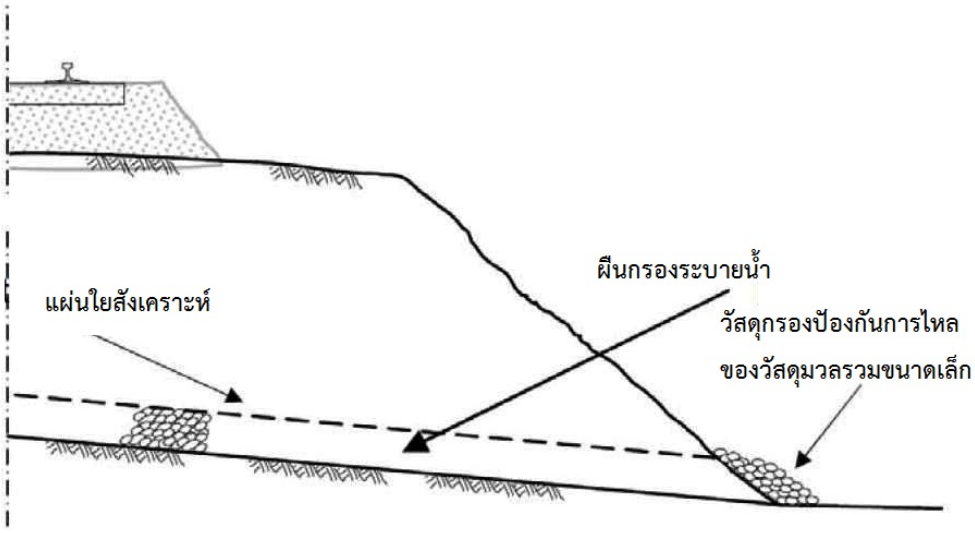
ปกติระบบระบายน้ำใต้ผิวดินที่เป็นแบบแนวดิ่งและแนวราบมักไม่ค่อยนิยมในงานระบายน้ำบนทางรถไฟแต่จะใช้เฉพาะในกรณีพิเศษเท่านั้น ทั้งนี้การระบายน้ำในแนวราบและแนวดิ่งจะใช้เร่งการทรุดตัวของดิน (Speed Consolidation) เพื่อปรับปรุงกำลังรับแรงของดินในขั้นตอนของการก่อสร้าง (กรณีก่อสร้างทางรถไฟผ่านพื้นดินอ่อน) หรือใช้ในการระบายน้ำจากด้านหลังของโครงสร้างหรือกำแพงกันดิน



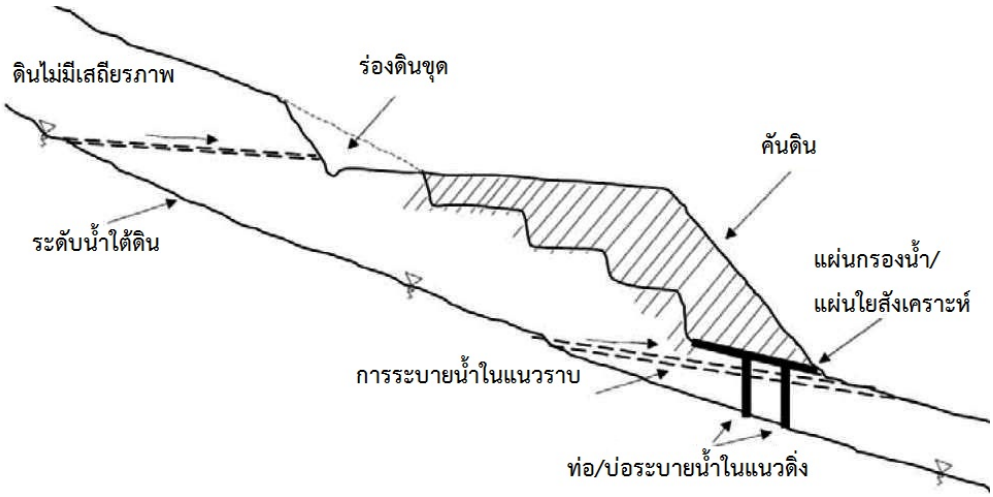
รูปที่ 10-10 ลักษณะทั่วไปของการวางแนวระบายน้ำตามยาว



รูปที่ 10-11 ลักษณะทั่วไปของการระบายน้ำตามขวาง



รูปที่ 10-12 การระบายน้ำผ่านผืนกรองระบายน้ำ



รูปที่ 10-13 การระบายน้ำในแนวดิ่งและแนวราบ

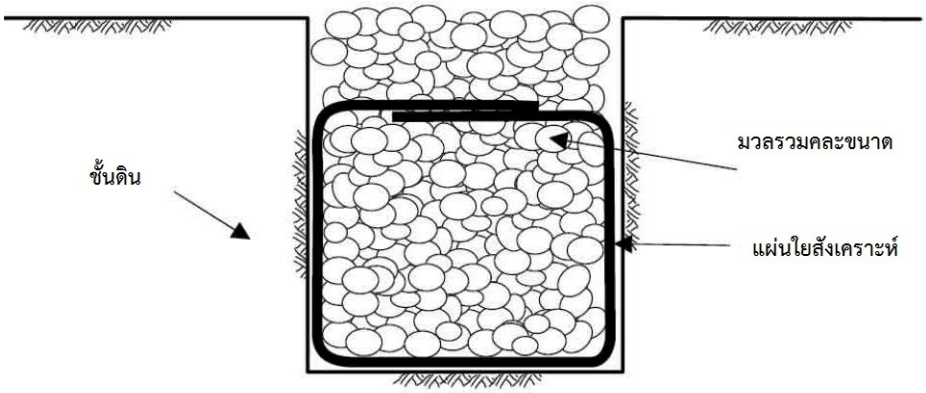
10.4.3 ประเภทของวัสดุในงานระบายน้ำใต้ผิวดิน

การแบ่งประเภทของระบบระบายน้ำใต้ผิวดินยังสามารถที่จะใช้ประเภทของวัสดุเป็นเกณฑ์ในการจัดประเภทได้ เช่น

- การระบายน้ำโดยใช้วัสดุมวลรวม (Aggregate Drains)
- การระบายน้ำโดยใช้ท่อมีรูพรุนหรือท่อพรุน (Slotted Pipe Drains)
- การระบายน้ำโดยใช้แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile Drains)
- ระบบรวมนั้นคือใช้วัสดุต่าง ๆ ดังข้างต้น (Combination Drains)

<u>การระบายน้ำโดยใช้วัสดุมวลรวม</u>

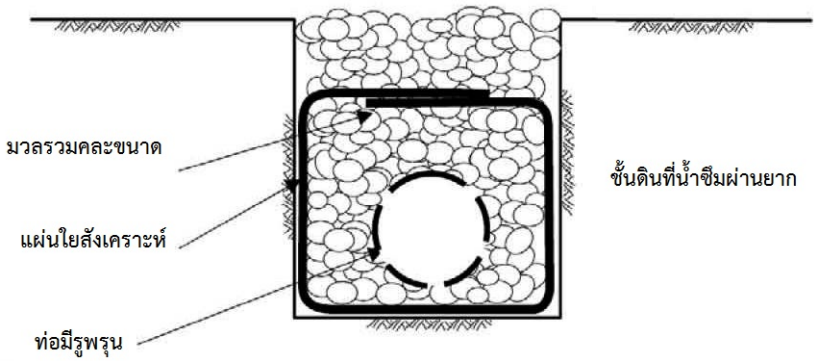
การระบายน้ำรูปแบบนี้จะใช้วัสดุมวลรวมที่มีค่าการซึมผ่านที่ดี วัสดุมวลรวมต้องมีขนาดคละและโตพอที่จะทำให้การไหลซึมได้สะดวกแต่ต้องไม่ใหญ่มากจนทำให้มีช่องว่างระหว่างมวลรวมใหญ่มากจนมวลรวมขนาดเล็กไหลผ่านไปตามช่องว่างของการไหลได้ โดยทั่วไปวัสดุมวลรวมนี้จะบรรจุหรือห่อด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 10-14



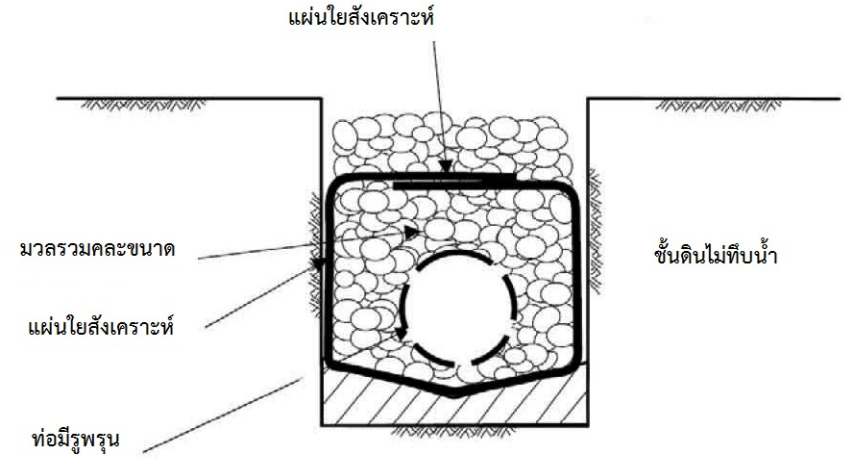
รูปที่ 10-14 การระบายน้ำด้วยวัสดุมวลรวม

การระบายน้ำโดยใช้ท่อมีรูพรุน

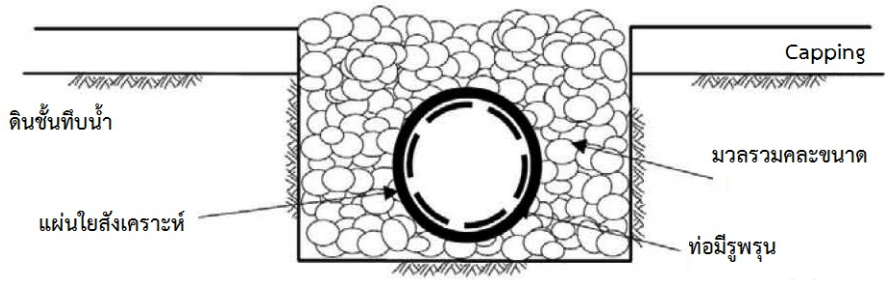
การระบายน้ำประเภทนี้จะประกอบด้วย ท่อที่มีรูพรุนหรือมีร่องให้น้ำไหลซึมเข้ามาในท่อได้ (Slotted Pipe) โดยท่อจะวางอยู่ในร่องที่ถมกลับด้วยมวลรวมคละขนาด จุดที่ต้องพึงระวังเป็นอย่างยิ่งของการระบายน้ำรูปแบบนี้คือการอุดตันของร่องหรือรูพรุนของท่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องมีวัสดุกรองหรือแผ่นใยสั่งเคราะห์เพื่อป้องกันปัญหาการอุดตันรูพรุนโดยมีการติดตั้งอยู่หลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 10-15 ถึง รูปที่ 10-17



รูปที่ 10-15 การระบายน้ำด้วยท่อพรุนในชั้นดินที่ทึบน้ำ (ชั้นดินเหนียว)



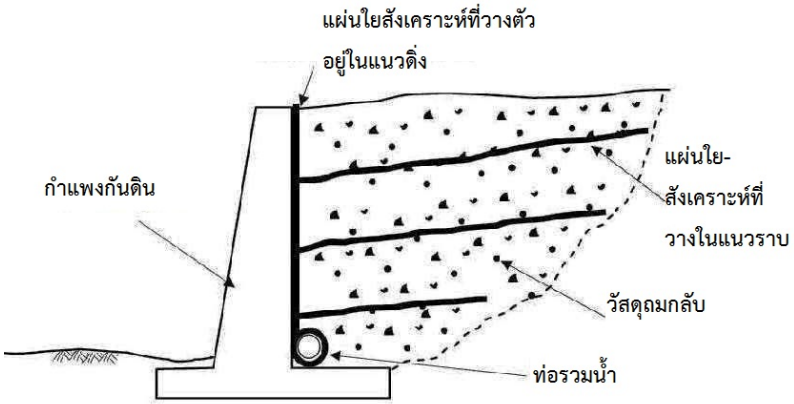
รูปที่ 10-16 การระบายน้ำด้วยท่อพรุนในชั้นดินที่ไม่ทึบน้ำ (ชั้นดินทราย)



รูปที่ 10-17 การระบายน้ำด้วยท่อพรุนที่หุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์

<u>การระบายน้ำโดยใช้แผ่นใยสังเคราะห์</u>

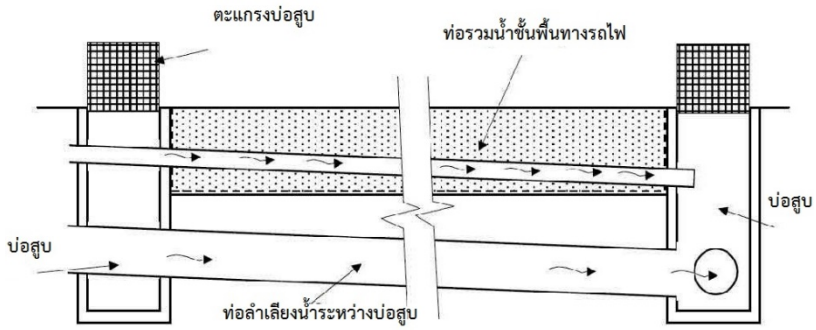
การระบายน้ำโดยแผ่นใยสังเคราะห์นั้นสามารถวางแนวแผ่นใยสังเคราะห์ได้หลายรูปแบบ ทั้งแนวดิ่ง แนวราบ หรือวางในแนวเอียงก็ได้ วัตถุประสงค์หลักก็เพื่อกรองและลำเลียงน้ำใต้ผิวดินให้ไหลไปตามแนวแผ่นแล้วระบายออกสู่จุดออก ลักษณะการทำงานคือจะกรองน้ำและป้องกันไม่ให้เม็ดดินขนาดเล็กอุดตันช่องว่างของแผ่นใยสังเคราะห์ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 10-18



รูปที่ 10-18 การระบายน้ำโดยใช้แผ่นใยสังเคราะห์หลังกำแพงกันดิน

การระบายน้ำใต้ผิวดินโดยรูปแบบอื่น

ในกรณีที่น้ำใต้ผิวดินมีปริมาณมากควรมีการติดตั้งท่อรวมน้ำใต้พื้นทาง (ชั้นหินโรยทาง) ระหว่างบ่อรวมน้ำหรือบ่อตรวจ จุดเด่นของระบบนี้คือน้ำที่ต้องระบายเป็นปริมาณมากจะไม่ไหลซึมลงสู่ชั้นโครงสร้างพื้นคันทางรถไฟ รูปที่ 10-19 เป็นรูปตัดโดยทั่วไปของการวางท่อรวมน้ำชั้นพื้นทางรถไฟกับท่อลำเลียงน้ำระหว่างบ่อตรวจของรางรถไฟ 2 ทางวิ่ง ปริมาณน้ำใต้ผิวดินจะถูกรวมโดยท่อรวมน้ำที่อยู่ระหว่างบ่อสูบ 2 บ่อ โดยปริมาณน้ำนั้นจะถูกระบายลงสู่บ่อตรวจโดยท้ายที่สุดน้ำนั้นจะถูกลำเลียงออกนอกเขตโครงสร้างคันทางรถไฟโดยท่อลำเลียง



รูปที่ 10-19 การระบายน้ำในชั้นพื้นทางและท่อลำเลียงน้ำ

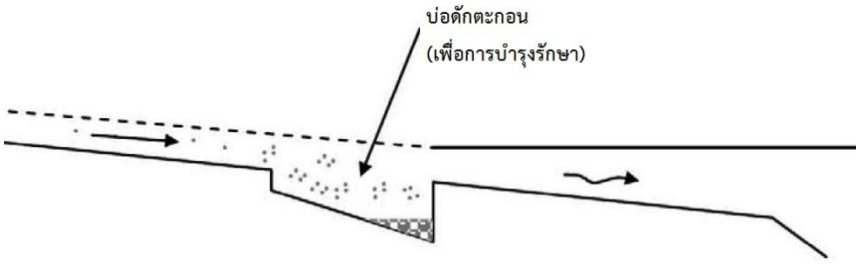
จุดรับน้ำเข้าและระบายน้ำออก

โดยทั่วไปจุดรับน้ำเข้าและระบายน้ำออกสำหรับการระบายน้ำใต้ผิวดินมีอยู่หลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามหน้าที่หลักของจุดรับน้ำเข้าและระบายน้ำออกคือป้องกันหรือลดการกัดเซาะ โดยเฉพาะบริเวณจุดระบายน้ำออกบางที่อาจมีความเร็วของการไหลสูงจึงอาจต้องมีการเพิ่มโครงสร้างหรืออาคารเพื่อสะลายพลังงานของ

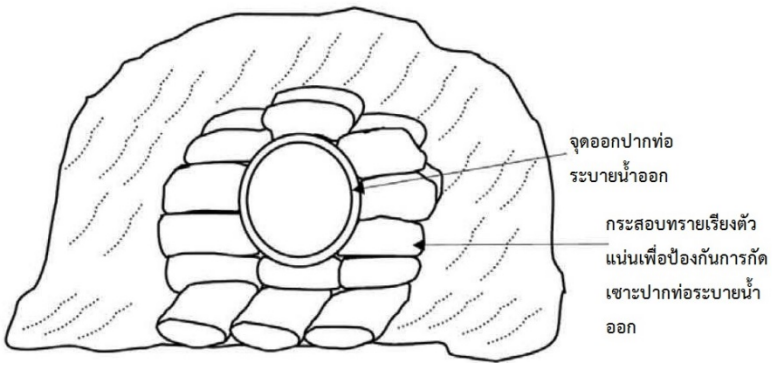
การไหลด้วย สำหรับบางพื้นที่ที่มีอัตราการชะล้างหน้าดินมากน้ำที่ต้องระบายจะมีความเข้มข้นของตะกอนสูง จึงมีความจำเป็นที่ต้องก่อสร้างบ่อดักตะกอนด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10-20

ในงานระบายน้ำทั่วไปมักใช้รูปแบบการป้องกันการกัดเซาะของจุดรับน้ำเข้าและระบายน้ำออกดังนี้

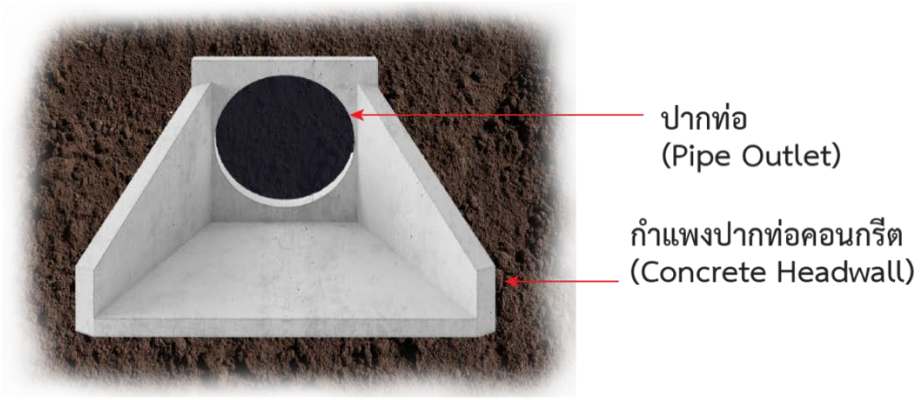
- คอนกรีตหล่อสำเร็จ
- เรียงกระสอบทรายอัดแน่นรอบปากท่อ (Grouted Sand Bags) รูปที่ 10-21
- กำแพงปากท่อคอนกรีต (Concrete Headwall) รูปที่ 10-22
- กำแพงปากท่อแบบ Gabion รูปที่ 10-23
- กำแพงปากท่อเสริมแรงด้วย Revetment mattress รูปที่ 10-24
- ปากท่อเรียงแน่นด้วยหินทิ้ง รูปที่ 10-25



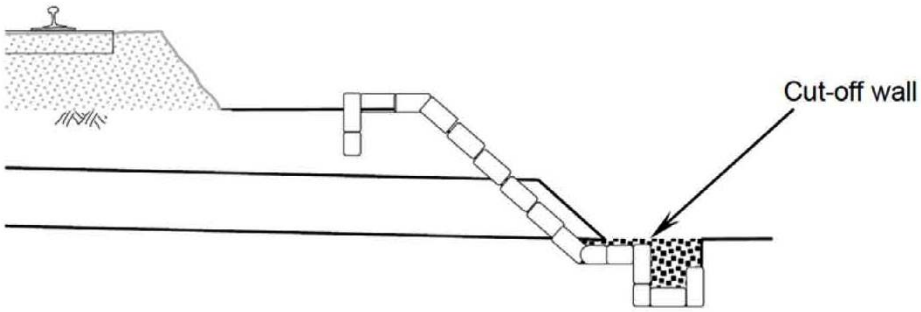
รูปที่ 10-20 รูปแบบโดยทั่วไปของบ่อดักตะกอน



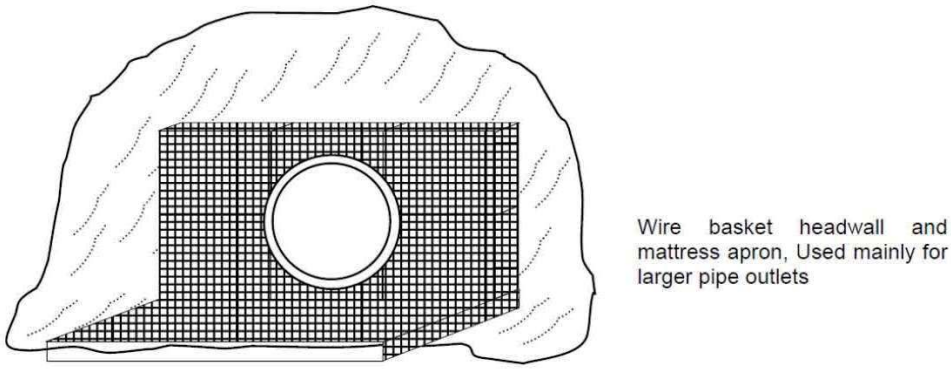
รูปที่ 10-21 เรียงกระสอบทรายอัดแน่นรอบปากท่อ



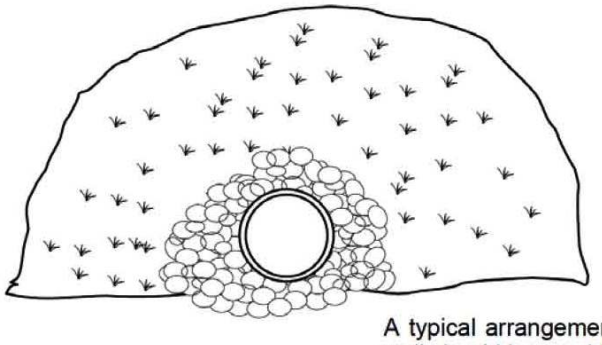
รูปที่ 10-22 กำแพงปากท่อคอนกรีต



รูปที่ 10-23 กำแพงปากท่อแบบ Gabion



รูปที่ 10-24 กำแพงปากท่อเสริมแรงด้วย Revetment mattress



A typical arrangement of hand packed walls. Cut-off wall should be provided at the bottom of the headwall to prevent the wall being scoured out and washed away, particularly on the down stream side.

รูปที่ 10-25 ปากท่อเรียงแน่นด้วยหินทิ้ง

10.5 การออกแบบระบบระบายบนทางรถไฟ (Design of Track Drainage)

เนื้อหาหลักในส่วนนี้ครอบคลุมข้อกำหนดและขั้นตอนของการออกแบบระบบระบายน้ำบนทางรถไฟทั้งสองรูปแบบ คือการระบายน้ำแบบผิวดินและการระบายน้ำแบบใต้ผิวดิน ทั้งนี้เพื่อให้เป็นแนวทางในการออกแบบและระบบระบายน้ำที่ออกแบบสอดคล้องกับระบบโครงสร้างอื่นและมีประสิทธิภาพ

เพื่อให้เกิดความสะดวก มีลำดับขั้นตอนในการออกแบบที่ชัดเจนตั้งแต่แนวคิดเริ่มต้นของการออกแบบจนถึงรายการคำนวณ ตรวจสอบขีดความสามารถในการระบายน้ำของระบบ/องค์อาคาร และองค์ประกอบที่จำเป็น คู่มือเล่มนี้จึงได้จัดทำผังลำดับขั้นตอนของการออกแบบ (แผนผัง) ไว้ในตอนท้ายเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ

10.6 ข้อกำหนดของการออกแบบ (Design Criteria)

10.6.1 การระบายน้ำผิวดิน

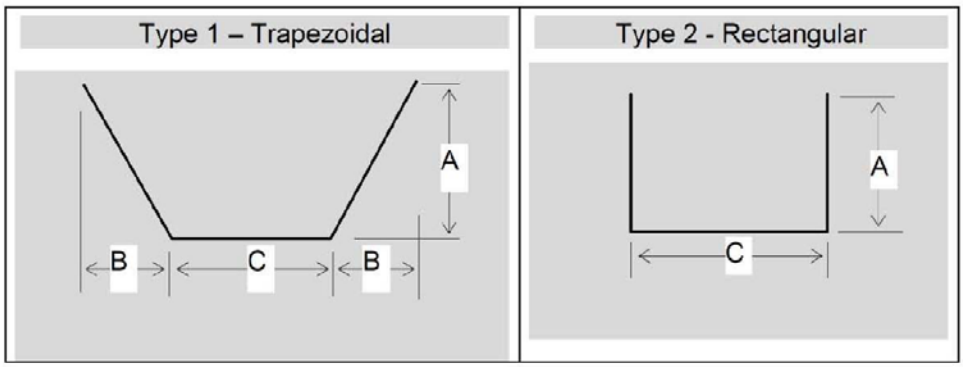
ระบบระบายน้ำผิวดินจะถูกออกแบบให้รองรับและระบายอัตราการไหลสูงสุด (Q_{peak}) ที่คำนวณโดยวิธี Rational Method (พื้นที่กำเนิดน้ำต้องไม่เกิน 25 ตร.กม.) อย่างไรก็ตามถ้าพื้นที่กำเนิดน้ำมากกว่า 25 ตร.กม. อัตราการไหลสูงสุดก็สามารถคำนวณได้จากวิธีอื่น เช่น วิธีกราฟน้ำท่า (Hydrograph) วิธีการวิเคราะห์ด้วยหลักความถี่การเกิดโดยพิจารณาทั้งลุ่มน้ำ (Regional Flood Frequency Analysis) เป็นต้น

รอบปีการเกิดซ้ำเฉลี่ยที่ใช้ออกแบบระบบระบายน้ำทางรถไฟโดยทั่วไปควรใช้เท่ากับ 100 ปี ยกเว้นการระบายน้ำของทางหลีก (Siding Track Drainage) สำหรับการออกแบบการระบายน้ำของทางหลีกของทางรถไฟหลักควรใช้รอบปีการเกิดซ้ำเท่ากับ 50 ปี



รางระบายน้ำด้านข้าง

ศักยภาพการไหลของน้ำในรางน้ำเปิด (Open Channel) จะต้องสูงกว่าอัตราการไหลหลากสูงสุด (Peak Flow Rate) เพื่อความสะดวกในการบำรุงรักษาภายหลังควรเลือกขนาดรางน้ำเปิดที่ใหญ่ ทั้งนี้ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าปัญหาการตกตะกอนในรางน้ำเปิดจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพของการระบายน้ำลดลง ขนาดมิติน้อยที่สุดของรางน้ำเปิด (รูปสี่เหลี่ยมคางหมูและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังแสดงในรูปที่ 10-26 ควรมีค่า A = 200 มม. B = 200 มม. และ C = 300 มม. และความลาดเอียงตามยาวของรางน้ำเปิดควรจะไม่น้อยกว่า 1 : 200



รูปที่ 10-26 รูปแบบของหน้าตัดรางระบายน้ำด้านข้าง

รางดักน้ำ

รางหรือท่อระบายน้ำด้านข้างจะวางอยู่เนินด้านบนเพื่อเบี่ยงน้ำออกจากทางตัด นอกจากนั้นขอบรางระบายน้ำต้องห่างจากทางตัดไม่น้อยกว่า 1,000 มม. หรือตำแหน่งที่เหมาะสม

ในพื้นที่ด้านลาดเขา (Downhill) ควรวางท่อหรือรางระบายน้ำด้านข้างไว้เพื่อระบายน้ำจากทางถมโดยที่ทางระบายน้ำควรต้องมีระยะห่างจากจากคันดินอย่างน้อย 1,000 มม. รางระบายน้ำด้านข้างอาจเป็นรางดาดหรือไม่ดาดก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งและสภาพของดินว่าสามารถทนต่อการกัดเซาะเนื่องจากการไหลได้หรือไม่ ท่อครึ่งวงกลมหรือรางตื้นอาจสามารถใช้แทนรางดาดคอนกรีตได้ โดยทั่วไปทุก ๆ ความสูงของลาดทางตัด 5 ม. ควรมีการก่อสร้างรางดักน้ำ

รางระบายน้ำรวมออกนอกพื้นที่

โดยปกติในทุก ๆ ระยะทาง 100 ม. ควรมีระบบระบายน้ำออกนอกพื้นที่ (เขตทางรถไฟ) และทุก ๆ ทางตัด (Cutting) จะต้องมีรางหรือท่อระบายน้ำรวมออกนอกพื้นที่ ความลาดชันน้อยที่สุดของรางระบายน้ำออกไม่ควรต่ำกว่า 1 : 200 และจุดด้านท้ายของรางระบายน้ำออกนอกพื้นที่จะต้องมีการป้องกันการกัดเซาะด้านปลายท่อระบายน้ำออกเนื่องจากความเร็วของการไหล



10.6.2 การระบายน้ำใต้ผิวดิน

การระบายน้ำใต้ดินควรพิจารณาใช้ระบบระบายน้ำใต้ผิวดินเมื่อระบบระบายน้ำผิวดินไม่สามารถรองรับปริมาณน้ำที่ต้องระบายได้เพียงพอ หรือเนื่องจากข้อจำกัดบางประการของการก่อสร้างระบบระบายน้ำผิวดิน หรือตำแหน่งระบายน้ำทิ้งไม่เหมาะสม

ในพื้นที่ที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ใกล้เคียงกับระดับพื้นทางรถไฟจะต้องมีระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน นอกจากนั้นบางพื้นที่น้ำใต้ดินอาจอยู่ภายใต้แรงดัน จึงจำเป็นต้องมีระบบระบายน้ำใต้ผิวดินเพื่อลดระดับแรงดันน้ำด้วย

ระบบระบายน้ำใต้ผิวดินอาจวางแนวตามยาวหรือตามแนวขวางทางรถไฟก็ได้ขึ้นอยู่กับความจำเป็นและความเหมาะสม และต้องออกแบบให้สามารถลำเลียงน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และน้ำซึม รวมถึงน้ำที่รวมจากแหล่งอื่น ออกนอกเขตทางรถไฟ หรือเข้าสู่ระบบอื่นที่ออกแบบไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงออกแบบให้ลดระดับหรือปริมาณน้ำใต้ดินรวมถึงน้ำซึม ควรต้องสำรวจและศึกษาคุณลักษณะเฉพาะด้านอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่นั้น ๆ โดยละเอียดสำหรับคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องระบาย การระบายน้ำใต้ผิวดินมักเป็นการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบต่าง ดังต่อไปนี้

- การระบายน้ำด้วยท่อมีรูพรุนหรือท่อพรุน
- การระบายน้ำโดยใช้วัสดุมวลรวม
- ทางน้ำเข้าและทางระบายน้ำออก
- บ่อตรวจ
- แผ่นใยสังเคราะห์

โดยมีรายละเอียดดังนี้

<u>การระบายน้ำด้วยท่อมีรูพรุน</u>

การคำนวณอัตราการไหลสูงสุดของระบบระบายน้ำที่จะออกแบบ สามารถคำนวณได้โดยวิธี Rational Method ทั้งนี้สามารถปรับเพิ่มค่าที่คำนวณจากวิธีการข้างต้นได้ เนื่องจากอาจมีน้ำใต้ดินจากส่วนอื่นและน้ำที่รวมจากระบบอื่นเข้ามาเพิ่มในท่อ นอกจากนั้นการประเมินการอัตราการไหลสูงสุดอาจทำได้โดยวิธีอื่น ๆ เช่น วิธีกราฟน้ำท่า (Hydrograph)

ในทางปฏิบัติสามารถใช้ท่อที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ออกแบบได้ การเลือกใช้ท่อที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ออกแบบจะสามารถลดความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นต่อระบบ เช่น มีวัสดุกีดขวางการไหลในท่อ รวมทั้งยังทำให้ระบบระบายน้ำง่ายต่อการทำความสะอาด และด้วยเหตุผลด้านการบำรุงรักษา ดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กที่สุดของท่อจึงไม่ควรน้อยกว่า 225 มม.



ความลาดเอียงตามยาวของท่อควรมีอัตราส่วนเท่ากับ 1 : 100 ในกรณีที่ไม่อาจวางความลาดเอียงของท่อตามเกณฑ์ข้างต้นได้ ความลาดเอียงต่ำสุดก็ไม่ควรเกิน 1 : 200

ความลึกของท่อระบายน้ำที่ฝังใต้ระบบรางไม่ควรน้อยกว่า 1,600 มม. โดยวัดจากส่วนบนสุดของรางรถไฟถึงส่วนบนสุดของท่อ ในกรณีที่วางท่อขนานกับรางรถไฟใต้ทางเดินความลึกของท่อไม่ควรน้อยกว่า 600 มม. สำหรับบางพื้นที่ที่ไม่สามารถวางท่อระบายน้ำให้มีความลึกอย่างน้อยตามข้อกำหนดข้างต้นได้ สามารถที่จะลดความลึกการฝังของท่อลงได้ในแต่ละกรณี คือ

- สำหรับท่อที่วางใต้รางรถไฟควรมีความลึกอย่างน้อยเท่ากับ 1,200 มม. วัดจากส่วนบนสุดของรางรถไฟถึงส่วนบนสุดของท่อ
- สำหรับท่อที่วางใต้ทางเดินคู่ขนานกับรางรถไฟความมีความลึกอย่างน้อย 300 มม. จากส่วนบนสุดของทางเดิน หรือ 1,000 มม. จากส่วนบนสุดของรางรถไฟที่อยู่ใกล้เคียงวัสดุท่อที่นิยมใช้ ได้แก่ ท่อคอนกรีตเสริมเหล็ก ท่อคอนกรีตเสริมเส้นใย และท่อเหล็ก ซึ่งท่อแต่ละประเภทในข้างต้นในการใช้งานจะต้องเป็นไปตามข้อแนะนำของผู้ผลิต

<u>การระบายน้ำโดยใช้วัสดุมวลรวม</u>

การระบายน้ำโดยใช้วัสดุมวลรวมเหมาะกับกรณีที่คาดว่าปริมาณน้ำใต้ดินหรือน้ำจากการซึมผ่านมีปริมาณน้อย การระบายน้ำด้วยวัสดุมวลรวมไม่สามารถที่จะใช้สำหรับการระบายน้ำที่หลากบนพื้นผิวได้ (Surface Runoff)

ในการออกแบบการระบายน้ำผ่านวัสดุมวลรวมโดยการซึม สามารถประมาณค่าอัตราการซึมหรือการระบายได้โดยสมการของดาร์ซี่ (Darcy's Equation) ตัวอย่างเช่น ความสามารถในการซึมผ่านของกรวดสะอาดจะอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.1 ม./วินาที โดยวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการระบายน้ำควรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 20 มม. ถึงขนาด 53 มม. (สำหรับหินทางรถไฟแบบหินโรยทาง) โดยค่าการซึมผ่านของน้ำผ่านวัสดุมวลรวมข้างต้นมีค่าดังนี้

- มวลรวมขนาด 20 มม. ค่าการซึมผ่านของน้ำ K = 0.15 ม./วินาที
- มวลรวมขนาด 53 มม. ค่าการซึมผ่านของน้ำ K = 0.40 ม./วินาที
- ระบบระบายน้ำด้วยวัสดุมวลรวม จะต้องมีการวางแผ่นใยสังเคราะห์ด้วย เพื่อป้องกันการพัดพาของวัสดุขนาดเล็ก ที่อาจไหลไปกับน้ำเนื่องจากการซึม

<u>ทางน้ำเข้าและทางระบายน้ำออก</u>

เพื่อป้องกันการกัดเซาะหรือการพังทลายของดิน ทางน้ำเข้า (Inlet) และทางน้ำออก (Outlet) จะต้องมีขนาดกำแพงปากท่อ (Headwall) ที่เหมาะสมและวางระดับสอดคล้องกับระดับดินเดิม บริเวณจุดทางน้ำออกพื้นดินต้องแน่นหนามั่นคงสามารถรองรับอัตราการไหลออกของน้ำโดยไม่ก่อให้เกิดการกัดเซาะ สำหรับ



พื้นที่ที่มีการชะล้างหน้าดินปริมาณน้ำที่ต้องระบายจะมีความเข้มข้นของตะกอนด้วยดังนั้นระบบจึงต้องมีบ่อดักตะกอน

บ่อตรวจ

บ่อตรวจเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นเนื่องจากเป็นจุดรวมน้ำ และระบบต้องมีบ่อตรวจก็เพื่อประโยชน์ด้านความสะดวกของการบำรุงรักษาระบบระบายน้ำในภายหลัง บ่อตรวจควรมีระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของแต่ละบ่อในช่วง 30 ม. ถึง 50 ม. ในกรณีของระบบระบายน้ำมีแนวผ่านชานชาลาระยะห่างจากบ่อหนึ่งถึงอีกบ่อหนึ่งควรมีค่าลดลงอยู่ที่ระหว่าง 20 ม. ถึง 30 ม. เมื่อแนวของบ่อตรวจต้องโค้งไปตามแนวของทางรถไฟ ระยะห่างของแต่ละบ่อก็ควรลดลงไปอีกเพื่อให้ได้แนวโค้งที่เหมาะสมตามเส้นทางรถไฟ(มาตรฐาน มขร.S-T-003-256X)

ถ้าบ่อตรวจอยู่ใกล้กับบริเวณประแจ (Turnout) ตำแหน่งของบ่อควรจะวางให้พอดีในพื้นที่ว่างระหว่างหมอนทางรถไฟ

ขนาดภายในของด้าน กว้าง×ยาว ที่เล็กที่สุดของบ่อตรวจควรมีค่าเท่ากับ 600 มม. × 600 มม. สำหรับบ่อตรวจที่ลึกมากกว่า 1 ม. และขนาด 450 มม. × 450 มม. สำหรับบ่อที่ลึกน้อยกว่า 1 ม.

บางครั้งบ่อตรวจที่เป็นบ่อคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast) ก็สามารถใช้ในระบบได้เช่นเดียวกันกับบ่อตรวจที่หล่อในที่ (Cast in-situ) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม

แผ่นใยสังเคราะห์

วัตถุประสงค์หลักของการใช้แผ่นใยสังเคราะห์ในงานระบายน้ำใต้ดินเพื่อให้เป็นวัสดุหรือตัวกรองสำหรับป้องกันเม็ดดินหรือวัสดุขนาดเล็กไม่ให้ผ่านหรือไหลไปกับน้ำที่ต้องการระบายออก เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ข้างต้นแผ่นใยสังเคราะห์จึงต้องมีคุณสมบัติเฉพาะต่าง ๆ ดังนี้

- เป็นแผ่นใยที่ยอมให้มีการซึมผ่านของน้ำได้ดี
- มีความคงทน (รวมถึงในระหว่างขั้นตอนของการก่อสร้างด้วย)
- กรองน้ำได้ดี
- ไม่มีปัญหาการอุดตันเนื่องจากวัสดุหรือเม็ดดินขนาดเล็กหรือละเอียด
- มีความยืดหยุ่น

อนึ่ง การเลือกใช้แผ่นใยสังเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละพื้นที่และสภาพแวดล้อมนั้นต้องเป็นไปตามศักยภาพการซึมผ่านได้ของน้ำ ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินในแต่ละพื้นที่ และข้อจำกัดของศักยภาพการระบายน้ำในพื้นที่เฉพาะนั้น ๆ ด้วย



10.7 การตรวจสอบการออกแบบ (Design investigation)

การตรวจสอบการออกแบบหมายถึงการกำหนดขอบเขตของการตรวจสอบ ชนิด/ประเภท และลักษณะเฉพาะของระบบระบายน้ำที่จะออกแบบ

10.7.1 ขอบเขตของการตรวจสอบ

วัตถุประสงค์หลักของการตรวจสอบคือการกำหนดหรือสร้างข้อกำหนดของระบบระบายน้ำและข้อจำกัดต่าง ๆ ที่อาจมีต่อระบบโดยปกติมักจะมีองค์ประกอบด้านในด้านต่าง ๆ ดังนี้

- การกำหนดปัญหา เงื่อนไข และวัตถุประสงค์ของการออกแบบระบายน้ำให้ชัดเจน เช่น พื้นที่ไหนที่ต้องระบายน้ำ ระบายน้ำออกไปตรงไหน และด้วยเหตุผลอะไร
- ระบุข้อมูลที่สำคัญและจำเป็นสำหรับการออกแบบ ได้แก่ ตำแหน่งที่ตั้ง ภูมิประเทศ พื้นที่ข้างเคียง (ขนาดพื้นที่กำเนิดน้ำที่จะต้องนำมาคำนวณอัตราการไหลสูงสุด) พื้นที่ระบายน้ำออก เหตุการณ์วิกฤตด้านอุตุ-อุทกวิทยาในอดีต การเข้าออกพื้นที่ ความปลอดภัยทั้งระหว่างการก่อสร้างและการบำรุงรักษาภายหลัง เป็นต้น
- รวมรวมรายงานและข้อมูลการศึกษาด้านอุตุ-อุทกวิทยา ทั้งในพื้นที่เองรวมทั้งในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง เช่น สถิติน้ำฝน น้ำท่า น้ำท่วม การใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นต้น
- การสำรวจพื้นที่จริง โดยข้อมูลที่ต้องการในเบื้องต้นสำหรับการออกแบบได้แก่
- ภูมิประเทศ เช่น ความชัน ลักษณะดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน
- ทางเข้าออก ข้อจำกัดทั้งในช่วงการก่อสร้างและการบำรุงรักษา
- ระบบระบายน้ำเดิมที่มีอยู่ ข้อจำกัด และความเสียหายหรือด้อยประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำเดิม (ถ้ามี)
- ตำแหน่งระบายน้ำออก (พื้นที่ระบายน้ำออก) เช่น ลำรางธรรมชาติหรือแม่น้ำ
- จุดและโอกาสที่อาจจะเกิดปัญหาจากการระบายน้ำออก เช่น น้ำท่วมพื้นที่ระบายน้ำออกแล้วเอ่อกลับมาท่วมทางรถไฟ
- โครงสร้างข้างเคียงที่อาจมีผลการการออกแบบและก่อสร้างระบบระบายน้ำ หรือการก่อสร้างระบบระบายน้ำอาจทำให้โครงสร้างนั้นเสียเสถียรภาพ
- ประมาณการพื้นที่ระบายน้ำ (พื้นที่กำเนิดน้ำ)



10.7.2 การกำหนดรูปแบบระบบระบายน้ำ

การพิจารณาเลือกรูปแบบของระบบระบายน้ำที่เหมาะสมสำหรับแต่ละพื้นที่นั้นจะขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบและข้อมูลที่รวบรวมมารวมถึงการสำรวจพื้นที่จริง

โดยทั่วไปจะขึ้นข้อจำกัดของพื้นที่ก่อสร้าง แหล่งกำเนิดน้ำ แหล่งระบายน้ำออก (น้ำทิ้ง) องค์ประกอบและโครงสร้างระบบราง นอกจากนั้นการบำรุงรักษาระบบในระยะยาวก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำหรับการเลือกระบบระบายน้ำว่าจะเป็นแบบผิวดินหรือระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน

ระบบระบายน้ำแบบผิวดินจะเป็นตัวเลือกแรกเสมอ เนื่องจากสะดวกต่อการก่อสร้าง ตรวจสอบและบำรุงรักษาง่าย รวมถึงมีค่าดำเนินการต่าง ๆ ที่ถูกกว่าระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน

10.8 การคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องระบายในระบบระบายน้ำ

ถึงขั้นตอนนี้ข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็น ข้อจำกัด ประเภทของระบบระบายน้ำ การวางผังองค์ประกอบของระบบระบายน้ำ จะต้องถูกกำหนดมาแล้ว ในขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณปริมาณน้ำที่ระบบจะต้องระบาย ต่อจากนั้นขนาดของระบบและองค์ประกอบของระบบก็จะสามารถกำหนดได้ในลำดับถัดไป

ปริมาณน้ำที่ต้องระบาย (Q_{PF}) หรืออัตราไหลสูงสุดที่ระบบต้องลำเลียงออกจากทางรถไฟสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 10-1

$$Q_{PF} = Q_R + Q_S + Q_C \qquad \text{สมการที่ 10-1}$$

เมื่อ Q_{PF} คือ ปริมาณน้ำหรืออัตราการไหลสูงสุดที่ต้องระบาย (ม^3/วินาที)
Q_R คือ น้ำท่าผิวดิน (ม^3/วินาที)
Q_S คือ น้ำท่าใต้ผิวดิน (ม^3/วินาที)
Q_C คือ ปริมาณน้ำที่รวมจากระบบอื่น (ถ้ามี) (ม^3/วินาที)

ปริมาณน้ำท่าผิวดิน ($Q_R = 0.278CIA$) จะคำนวณโดยวิธี Rational Method ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ระบายน้ำ (A, ตร.กม.) ความเข้มฝนออกแบบจาก IDF-Curve (I, มม./ชม.)

สัมประสิทธิ์ของการเกิดน้ำท่าซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้ประโยชน์ที่ดิน (C) อย่างไรก็ตามอาจประมาณค่า Q_R ได้จากวิธีอื่น เช่น วิธีกราฟน้ำท่า วิธีการวิเคราะห์ด้วยหลักความถี่การเกิดโดยพิจารณาทั้งลุ่มน้ำ

Q_S คือน้ำท่าใต้ผิวดินซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างยากต่อการประเมิน ในกรณีที่ระบบระบายน้ำที่ออกแบบต้องพิจารณาน้ำท่าใต้ผิวดินด้วย ตัวแปรทางด้านอุทกธรณีวิทยาจะต้องดำเนินการสำรวจสำหรับ



ประเมินปริมาณน้ำท่าใต้ดินโดยสมการของดาร์ซี่ (Darcy's Equation) ส่วน Q_C สามารถประมาณค่าได้จากอัตราการไหลสูงสุดที่จุดออกที่จะไหลรวมเข้าสู่ระบบระบายน้ำที่ออกแบบ การประมาณค่าก็สามารถคำนวณได้โดยสมการ Rational Method เช่นเดียวกันกับ Q_S

10.8.1 รอบปีการเกิดซ้ำเฉลี่ย

การประมาณค่าอัตราการไหลสูงสุดโดยวิธี Rational Method นั้น จะต้องมีการกำหนดหรือทราบรอบปีการเกิดซ้ำเฉลี่ย (Average Recurrence Interval, ARI) ที่จะออกแบบก่อน รอบปีการเกิดซ้ำเฉลี่ยนี้คือค่าความถี่เฉลี่ยของเหตุการณ์ในอดีต (ในกรณีนี้คือฝนตกหนักแล้วเกิดน้ำท่าสูงสุด) สำหรับการออกแบบระบบระบายน้ำบนทางรถไฟกำหนดให้ใช้ค่า ARI เท่ากับ 100 ปี

10.8.2 วิธี Rational Method

วิธี Rational Method สามารถคำนวณค่าอัตราการไหลสูงสุดของแต่ละเหตุการณ์ที่กำหนดได้โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ดังสมการที่ 10-2

$$Q_{peak} = 0.278CIA \qquad \text{สมการที่ 10-2}$$

เมื่อ Q_{peak} คือ อัตราการไหลสูงสุดที่ต้องระบาย (ม^3/วินาที)
A คือ พื้นที่รับน้ำฝน/ พื้นที่รับน้ำ/ พื้นที่ระบายน้ำ(ตร.กม.)
C คือ สัมประสิทธิ์น้ำท่า (ไม่มีหน่วย)
I คือ ความเข้มฝน (มม./ชม.)

<u>สัมประสิทธิ์น้ำท่า</u> (C)

ค่า C หรือว่าสัมประสิทธิ์น้ำท่านั้นเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย โดยทั่วไปเป็นค่าที่ได้จากการตรวจวัดและจากการเก็บข้อมูลในพื้นที่จริงจากหลาย ๆ กรณี ซึ่งโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวและลักษณะภูมิประเทศ (ความลาดชันของพื้นที่ดังแสดงใน ตารางที่ 10-1 เป็นต้น

ในกรณีที่พบว่าพื้นที่ระบายน้ำมีรูปแบบลักษณะพื้นที่ซับซ้อน เช่น บางส่วนเป็นพื้นที่พัฒนา บางส่วนเป็นทุ่งหญ้า และบางส่วนเป็นป่าละเมาะ ฯลฯ ค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่าที่ใช้ในสมการที่ 2 ควรเป็นค่าเฉลี่ยตามสัดส่วนของพื้นที่ ดังแสดงในสมการที่ 10-3

$$C = \frac{C_1A_1 + C_2A_2 + \ldots + C_nA_n}{A} \qquad \text{สมการที่ 10-3}$$



เมื่อ C คือ สัมประสิทธิ์น้ำท่าเฉลี่ยของพื้นที่ระบายน้ำ

C_1A_1 คือ ผลคูณของสัมประสิทธิ์น้ำท่า (C_1) ในพื้นที่ย่อย (A_1)

C_2A_2 คือ ผลคูณของสัมประสิทธิ์น้ำท่า (C_2) ในพื้นที่ย่อย (A_2)

...

C_nA_n คือ ผลคูณของสัมประสิทธิ์น้ำท่า (C_n) ในพื้นที่ย่อย (A_n)

A คือ พื้นที่ระบายน้ำรวมทั้งหมด ($A_1 + A_2 + ... + A_n$)

อนึ่งยังพบว่าค่า C แปรผันไปตามความเข้มของฝนดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 10-27 ดังนั้น ในการออกแบบควรใช้ค่า C ที่มีค่ามากกว่าระหว่างค่าจากตารางที่ 10-1 ทั้งนี้เพื่อจะทำให้การประเมินปริมาณน้ำที่ต้องระบายได้ค่าสูงสุด

ตารางที่ 10-1 ค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่าโดยวิธี Rational Method

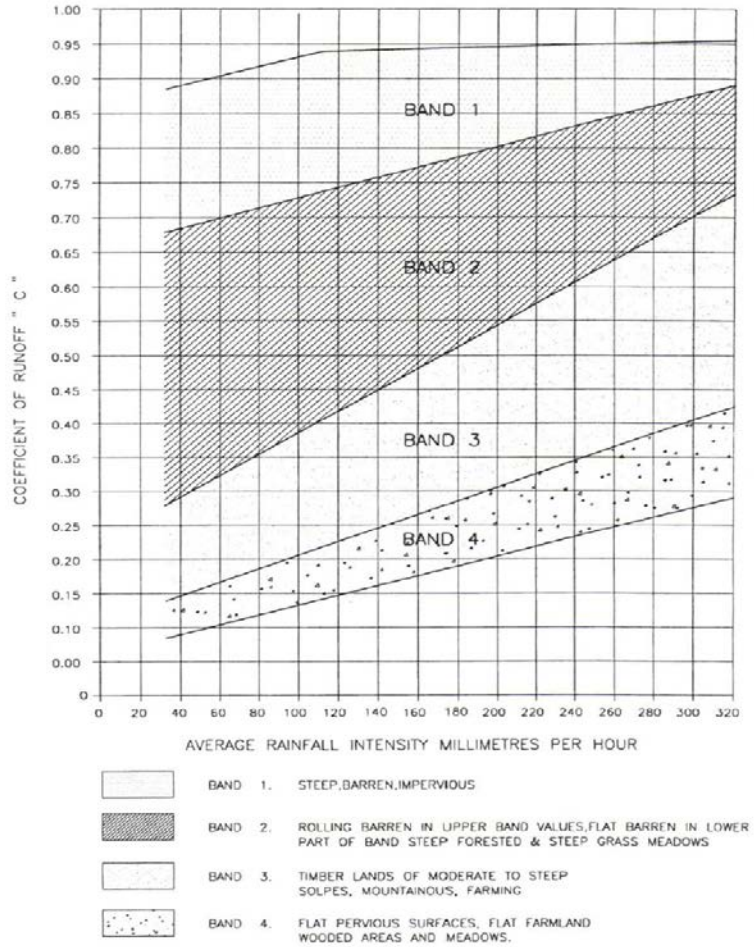
ลักษณะของพื้นผิว	รอบปีการเกิดซ้ำ (ปี)					
	2	5	10	25	50	100
พื้นที่พัฒนา						
ลาดยาง	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95
คอนกรีต/ หลังคา	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97
พื้นที่หญ้า (สนามสวนสาธารณะ ฯลฯ) - สภาพเลว (หญ้าคลุมน้อยกว่าร้อยละ 50)						
1) ความลาดชัน 0 – 2 %	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47
2) ความลาดชัน 2 – 7 %	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53
3) ความลาดชันเกิน7 %	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55
พื้นที่หญ้า (สนามสวนสาธารณะ ฯลฯ) – สภาพค่อนข้างดี (หญ้าคลุมประมาณร้อยละ 50 ถึง 75)						
1) ความลาดชัน 0 – 2 %	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41
2) ความลาดชัน 2 – 7 %	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49
3) ความลาดชันเกิน7 %	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53
พื้นที่หญ้า (สนามสวนสาธารณะ ฯลฯ) – สภาพดี (หญ้าคลุมมากกว่าร้อยละ 75)						
1) ความลาดชัน 0 – 2 %	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36
2) ความลาดชัน 2 – 7 %	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46
3) ความลาดชันเกิน7 %	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51
พื้นที่ยังไม่พัฒนา						
พื้นที่เพาะปลูก						
1) ความลาดชัน 0 – 2 %	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47
2) ความลาดชัน 2 – 7 %	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51



ลักษณะของพื้นผิว	รอบปีการเกิดซ้ำ (ปี)					
	2	5	10	25	50	100
3) ความลาดชันเกิน7 %	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54

ตารางที่ 10-1 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่าโดยวิธี Rational Method

ลักษณะของพื้นผิว	รอบปีการเกิดซ้ำ (ปี)					
	2	5	10	25	50	100
ทุ่งหญ้า/ ทุ่งหญ้าปศุสัตว์						
1) ความลาดชัน 0 – 2 %	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41
2) ความลาดชัน 2 – 7 %	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49
3) ความลาดชันเกิน7 %	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53
ป่าโปร่ง/ ป่าละเมาะ						
1) ความลาดชัน 0 – 2 %	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39
2) ความลาดชัน 2 – 7 %	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47
3) ความลาดชันเกิน7 %	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52



รูปที่ 10-27 สัมประสิทธิ์น้ำท่า (C)

<u>ความเข้มฝน (I)</u>

ค่าความเข้มฝน (I) ที่จะใช้ในสมการที่ 10-2 นั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัว ได้แก่รอบปีการเกิดซ้ำที่จะใช้ในการออกแบบ (สำหรับระบบระบายน้ำจากทางรถไฟใช้เท่ากับ 100 ปี) และตัวแปรที่ 2 คือระยะเวลาการตกของฝน (Rainfall Duration) สำหรับวิธี Rational Method กำหนดให้เวลาการตกของฝนมีค่าเท่ากับระยะเวลาของการไหลรวมตัว (Time of Concentration, T_C) นั้นคือระยะเวลาตั้งแต่ฝนเริ่มตกบนพื้นที่รับน้ำหรือพื้นที่ระบายน้ำแล้วเกิดน้ำท่าผิวดินไหลไปยังจุดออก ระยะเวลาตั้งแต่เกิดน้ำท่าจนถึงเวลาที่เกิดอัตราการไหลสูงสุด ณ จุดออก เรียกว่าระยะเวลาของการไหลรวมตัว โดยสามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 10-4

$$T_C = \left[0.868 L^3 / H \right]^{0.385} \qquad \text{สมการที่ 10-4}$$

เมื่อ T_C คือ ระยะเวลาการไหลรวมตัว (ชม.)

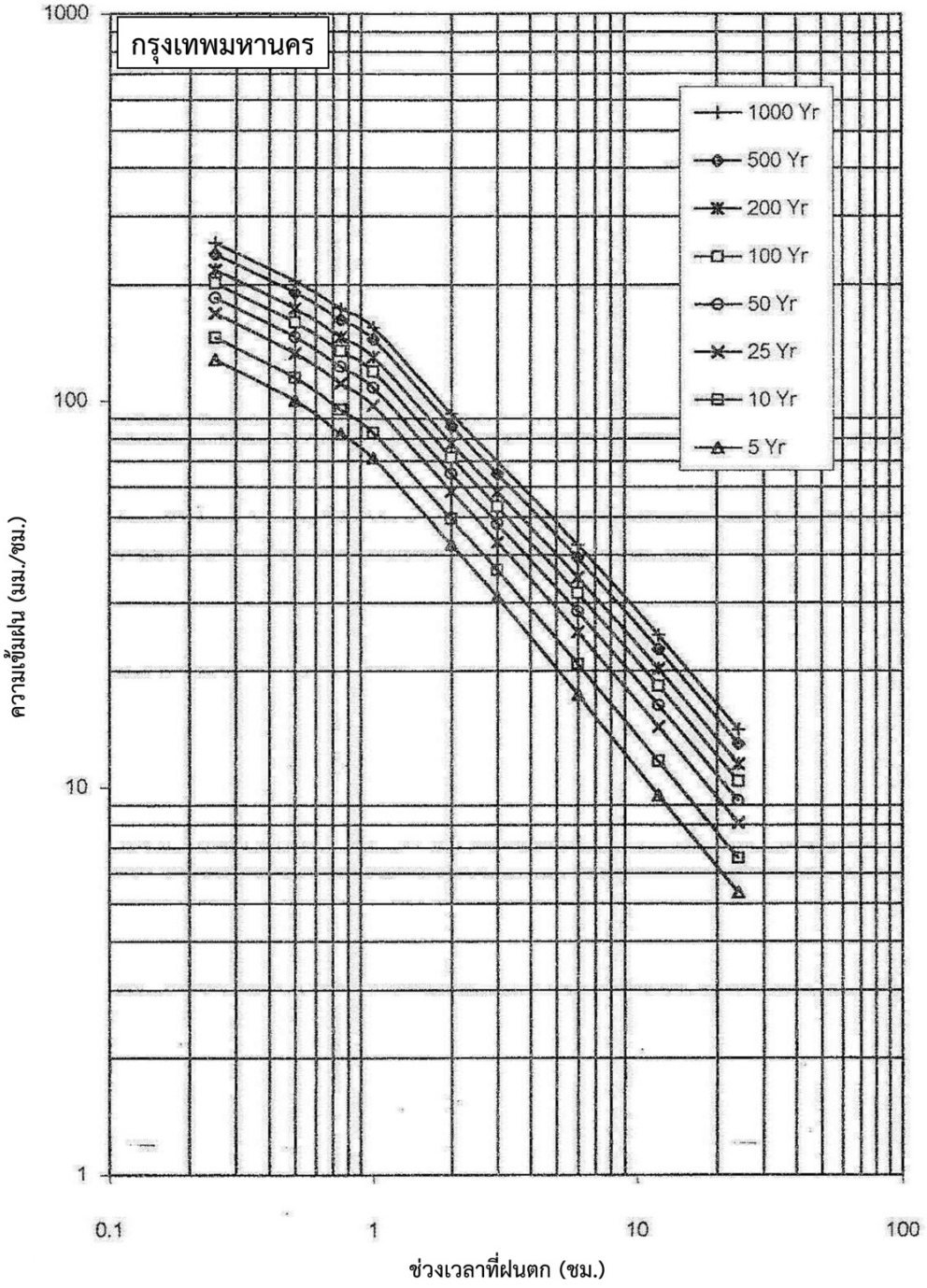
L คือ ความยาวตามทิศทางการไหลจากจุดไกลสุดมาถึงจุดออก (กม.)



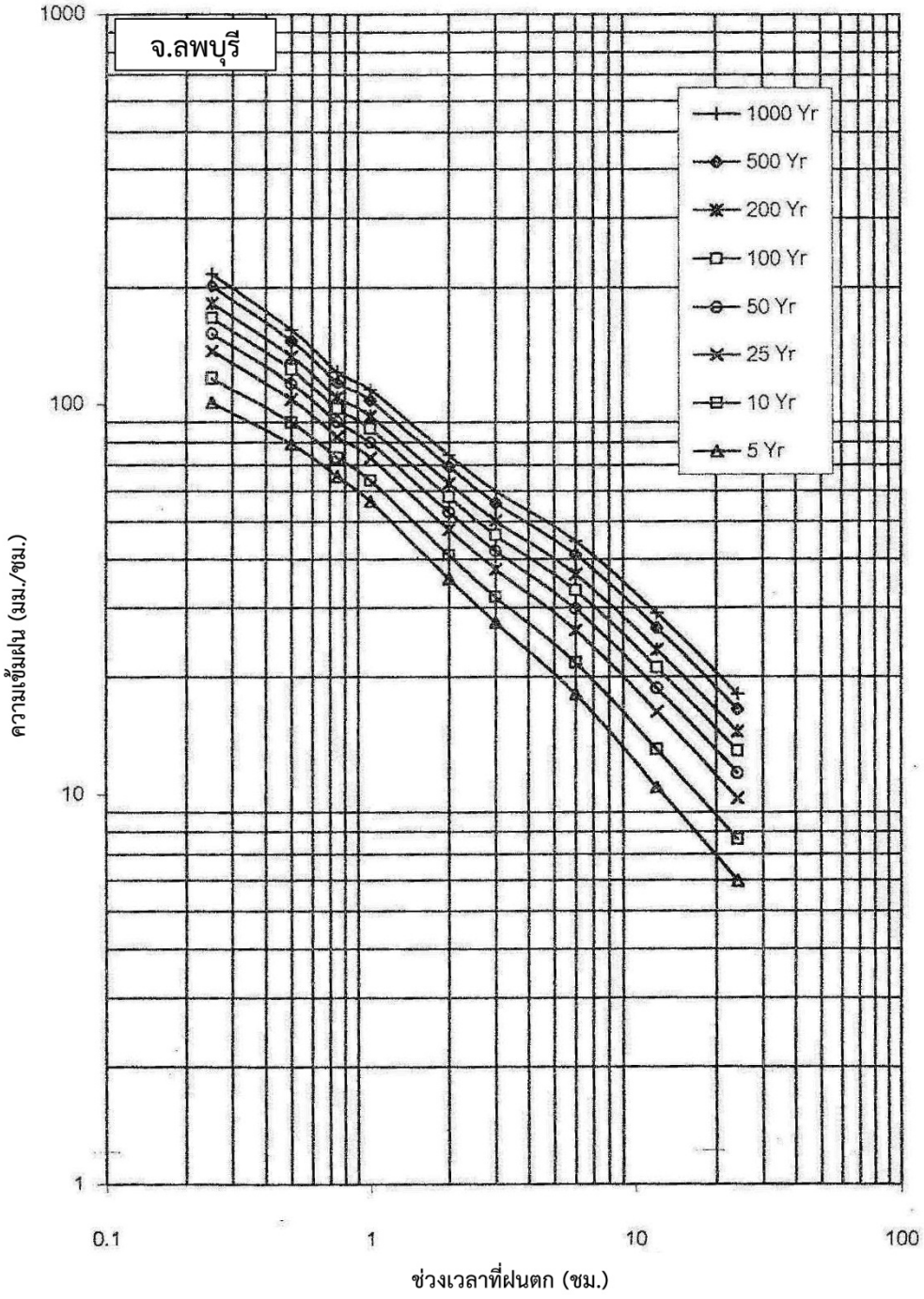
H คือ ความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างระดับพื้นผิวของจุดไกลสุดกับจุด ออก (ม.)

เพื่อให้เกิดความสะดวกในงานด้านการออกแบบ ความเข้มฝน (Intensity) เวลาที่ฝนตก (Rainfall Duration) จะถูกนำมาวิเคราะห์ในเชิงของความถี่ (Frequency Analysis) ความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างตัวแปรข้างต้นจะเรียกว่า IDF-Curve ในการสร้าง IDF-Curve นั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลตรวจวัดน้ำฝนรายนาทีเป็นระยะเวลานานหลายปีจึงจะสามารถนำข้อมูลนั้นมาสร้างเป็น IDF-Curve ได้ หน่วยงานหลักในประเทศไทยที่เก็บข้อมูลและสร้าง IDF-Curve ได้แก่ กรมชลประทาน และกรมอุตุนิยมวิทยารูปที่ 10-28 ถึง รูปที่ 10-30 แสดงตัวอย่าง IDF-Curve ที่วิเคราะห์โดยกรมชลประทาน

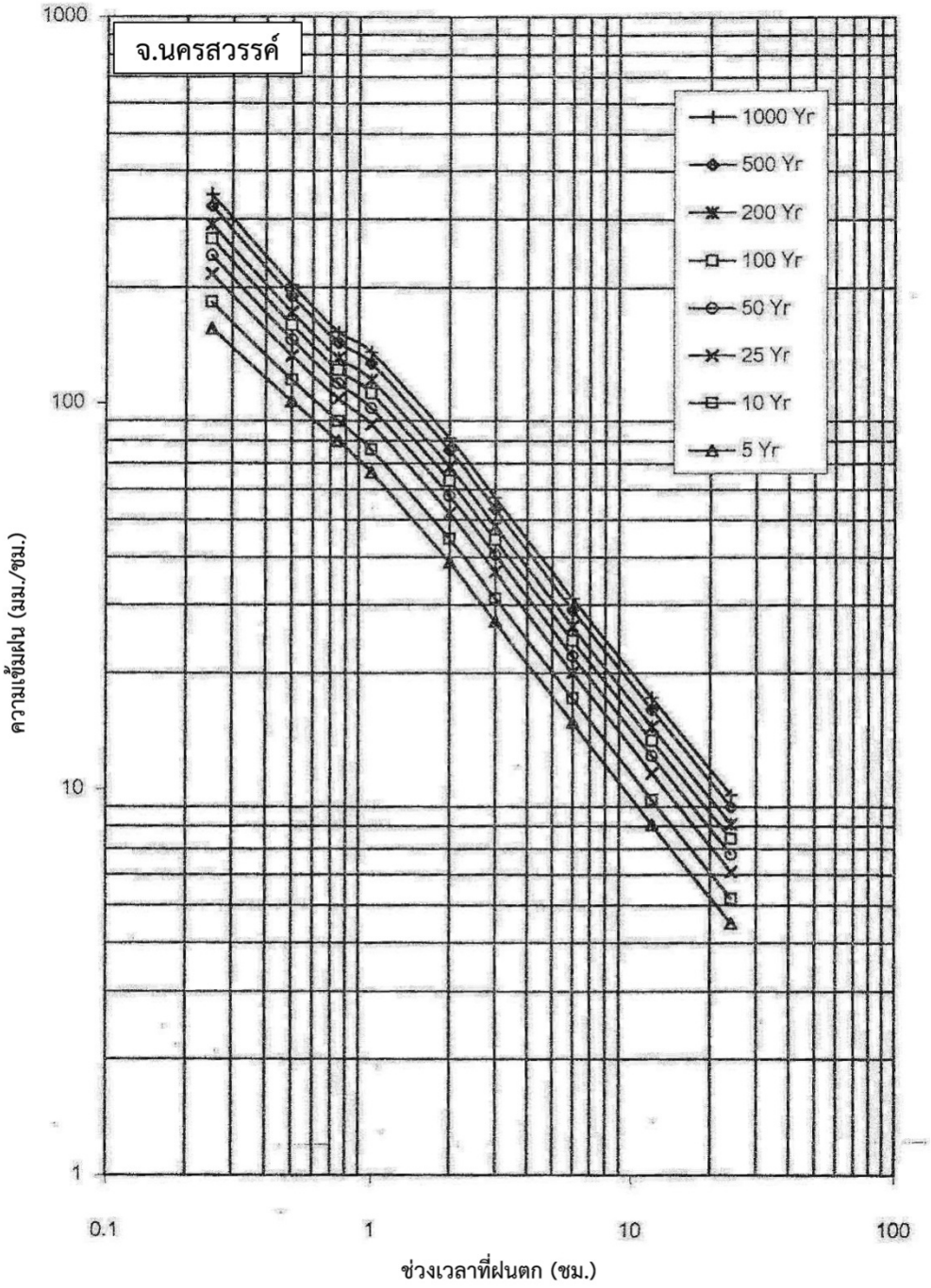
วิศวกรผู้ออกแบบควรนำข้อมูลฝนราย 15 นาที โดยทั่วไปจำนวนอย่างน้อย 30 ปี (ในกรณีที่บางพื้นที่มีข้อจำกัดด้านการตรวจวัดข้อมูลควรใช้ข้อมูลไม่ต่ำกว่า 10 ปี) ล่าสุดจากสถานีที่อยู่ใกล้เคียงกับพื้นที่ก่อสร้างมาวิเคราะห์ IDF-Curve ที่รอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ เช่น วิเคราะห์โดยวิธีของกัมเบล (Gumble) รวมถึงเหตุการณ์วิกฤติด้านอุตุ-อุทกวิทยา เพื่อใช้ในการออกแบบ โดยทั่วไปในการคำนวณอัตราการไหลสูงสุด จะต้องเลือก IDF-Curve ที่วิเคราะห์ได้จากสถานีวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้กับพื้นที่โครงการ (พื้นที่ออกแบบระบายน้ำ) มากที่สุดเป็นข้อมูลความเข้มฝนสำหรับการออกแบบ



รูปที่ 10-28 IDF-Curve สำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 10-29 IDF-Curve สำหรับพื้นที่ จ.ลพบุรี



รูปที่ 10-30 IDF-Curve สำหรับพื้นที่ จ.นครสวรรค์



10.8.3 กรณีการไหลผ่างโครงสร้างควบคุม (อาคารชลศาสตร์)

โครงสร้างควบคุมหรือ Control Structures มีได้หลายรูปแบบ ทั้งนี้อาจเป็นโครงสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้นจริง ๆ หรือเป็นการไหลผ่านหน้าตัดหรือช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นหน้าตัดควบคุม (Control Section) ก็ได้ โดยทั่วไปอัตราการไหลผ่านหน้าตัดควบคุมและโครงสร้างควบคุมจะขึ้นอยู่กับระดับน้ำที่แตกต่างกันโดยมีรูปของสมการดังนี้

กรณีการไหลแบบ Free Flow $Q = ah_1^b$ สมการที่ 10-5

กรณีการไหลแบบ Submerged Flow $Q = a(h_1 - h_2)^b$ สมการที่ 10-6

เมื่อ h_1 คือระดับน้ำด้านเหนือน้ำ

h_2 คือระดับน้ำด้านท้ายน้ำ

a คือสัมประสิทธิ์ของอาคาร

b คือค่าคงที่ (เช่น 1.5 สำหรับฝาย (Weir) และ 0.5 สำหรับ Sluice Gate)

สมการดังกล่าวจะอยู่ในรูปของ Semi-empirical และบางกรณีจะต้องมีการสอบเทียบ (Calibrate) ค่า a และ b จากอาคารจริง โดยทั่วไปอาคารควบคุมน้ำแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือฝาย (Weir) และช่องเปิดแบบ Orifice

แบบฝาย คืออาคารที่น้ำไหลข้ามอาจเป็นธรรมชาติอาจเป็นฝายคอนกรีตหรือฝายธรรมชาติ เช่น คันดินริมตลิ่ง หรืออาจเป็นคันดินที่ถูกสร้างขึ้นขวางการไหลของน้ำ อย่างไรก็ตามฝายก็มีรูปแบบแตกต่างกันไป แต่ที่พบเห็นกันมากได้แก่ ฝายสันกว้าง (Broad-Crested Weir) ฝายสันคม (Sharp-Crested Weir) และฝายโอกี้ (Ogee Weir)

ส่วนการไหลแบบ Orifice Type คืออาคารที่น้ำไหลลอดใต้บาน ซึ่งก็คืออาคารประเภทประตูน้ำแบบต่าง ๆ เช่น บานตรง (Vertical Sluice Gate) และบานโค้ง (Radial Gate) ลักษณะสำคัญของอาคารเหล่านี้คือ จะต้องควบคุมหรือกำหนดการเปิด-ปิดบานได้

ในกรณีที่ช่องเปิดระบายน้ำใต้ทางระไฟ เช่น Box Culvert, สะพาน ฯลฯ ไม่สามารถระบายน้ำได้ทันมักจะเกิดการไหลล้นคันทางรถไฟ ในกรณีเช่นนี้อัตราการไหลล้นมักจะอยู่ในรูปแบบการไหลแบบอิสระ (Free Flow) โดยอัตราการไหลนี้สามารถที่จะประยุกต์สมการของการไหลผ่านฝายแบบโอกี้มาใช้ในการคำนวณได้ ซึ่งมีรูปของสมการดังนี้

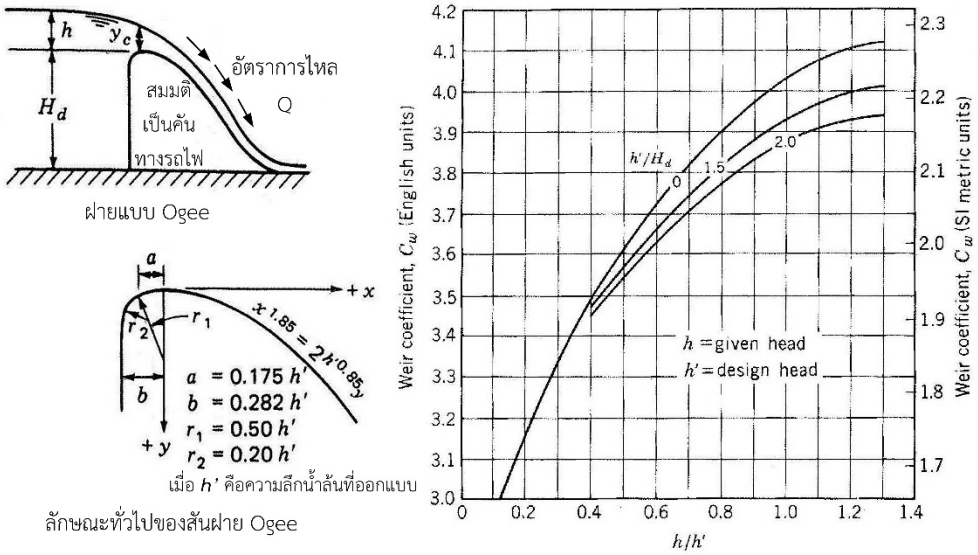
$$Q = C_w L h^{2/3}$$ สมการที่ 10-7

เมื่อ Q คืออัตราการไหล (ม.^{3}/วินาที)

L คือความยาวที่เกิดการไหลล้นคันทางรถไฟ (ม.)

h คือความลึกที่เกิดการไหลล้นคันทางรถไฟเฉลี่ย (ม.)

C_w คือความยาวที่เกิดการไหลล้นคันทางรถไฟ (ม.)สัมประสิทธิ์ (รูปที่ 10-31ในหน่วย SI และโดยทั่วไประดับน้ำที่ล้นคันทางรถไฟมักไม่สูงมากเมื่อเทียบกับคันทางจึงอนุโลมให้ใช้ค่า h'/H_d ประมาณ 0 ได้)



รูปที่ 10-31 สัมประสิทธิ์ C_w ของการไหลล้นคันทางรถไฟ

10.8.4 การวิเคราะห์อัตราการไหลสูงสุดผ่านคันทางรถไฟ (กรณีอื่น ๆ)

ข้อจำกัดของวิธี Rational Method คือสามารถประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลสูงสุดได้สำหรับพื้นที่รับน้ำไม่เกิน 25 ตร.กม. ในกรณีที่พื้นที่มากกว่านี้ไม่แนะนำให้ใช้วิธี Rational Method ในการประเมินอัตราการไหลสูงสุด

จากสภาพความเป็นจริง คันทางรถไฟมักตัดผ่านคลอง แม่น้ำ ฯลฯ ซึ่งอาจมีพื้นที่รับน้ำตรงจุดที่คันทางรถไฟตัดผ่านมากกว่า 25 ตร.กม. ดังนั้นอัตราการไหลสูงสุดตรงจุดนี้ต้องประเมินโดยวิธีอื่น เช่น วิธีกราฟน้ำท่า หรือการวิเคราะห์ด้วยหลักความถี่การเกิดโดยพิจารณาทั้งลุ่มน้ำ (Regional Flood Frequency)



วิธีกราฟน้ำท่า

คือการคำนวณอัตราการไหลสูงสุดจากพายุฝนโดยใช้เทคนิคกราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่า การวิเคราะห์ประกอบด้วยขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

ก) การวิเคราะห์พายุฝน ได้แก่ การคัดเลือกสถานีวัดน้ำฝนที่อยู่ในพื้นที่โครงการหรือบริเวณใกล้เคียงที่ทำการวัดข้อมูลที่สมบูรณ์ แล้วทำการหารูปแบบการกระจายตัวของฝนในช่วงเวลาต่าง ๆ นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณฝนสูงสุดในพื้นที่โครงการ แล้ววิเคราะห์แจงความถี่เพื่อหาปริมาณฝนสูงสุดที่คาบการเกิดต่าง ๆ กัน

ข) แยกการไหลพื้นฐาน (Base Flow) ออกจากกราฟน้ำท่าจะได้การไหลโดยตรง (Direct Runoff)

ค) นำข้อมูลกราฟการไหลโดยตรงมาสร้างกราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่า (Unit Hydrograph)

ง) การนำผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนที่รอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ในข้อ (ก) คูณกับกราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่า (ค) จะได้กราฟการไหลโดยตรงที่รอบปีการเกิดซ้ำต่าง

จ) กราฟปริมาณน้ำหลากสูงสุดได้จากนำผลการวิเคราะห์จากข้อ (ง) มาบวกกับการไหลพื้นฐาน

การวิเคราะห์ด้วยหลักความถี่การเกิดโดยพิจารณาทั้งลุ่มน้ำ

การวิเคราะห์ด้วยหลักความถี่การเกิดโดยพิจารณาทั้งลุ่มน้ำ (Regional Flood Frequency Analysis) เป็นการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักสถิติ โดยเป็นความพยายามที่จะสร้างกราฟการแจกแจงความถี่น้ำท่วมที่สามารถนำไปใช้ประเมินอัตราการไหลสูงสุดที่จุดต่าง ๆ ในลุ่มน้ำได้ โดยมีข้อสมมติฐานที่สำคัญและขั้นตอนในการวิเคราะห์ดังนี้

I. ข้อมูลอัตราการไหลสูงสุดรายปีของสถานีวัดน้ำท่าที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ (ที่ตั้งอยู่ในลำน้ำหลัก แม่น้ำสาขา หรืออาจรวมถึงลุ่มน้ำอื่นที่อยู่ใกล้เคียง) ต้องมีคุณสมบัติทางอุทกวิทยาที่คล้ายคลึงกันกับพื้นที่ที่ต้องการประเมินอัตราการไหลสูงสุด

II. โดยทั่วไปข้อมูลของแต่ละสถานีที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ไม่ควรต่ำกว่า 30 ปี แต่เนื่องจากประเทศไทยมักมีข้อจำกัดด้านนี้เพราะบางสถานีวัดน้ำท่าพึ่งมีการติดตั้งและเริ่มจัดเก็บข้อมูลได้ไม่นาน ดังนั้นมักอนุโลมด้านความยาวนานของข้อมูลแต่ไม่ควรต่ำกว่า 10 ปี



แนวทางการวิเคราะห์

1) นำข้อมูลสถิติอัตราการไหลสูงสุดรายปี (Q_{peak}) ของแต่ละสถานีสามารถนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย ($\overline{Q}_{peak}$) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

2) จากข้อ 1 ที่ได้ $\overline{Q}_{peak}$ และ SD ของสถานีต่าง ๆ สามารถคำนวณอัตราการไหลสูงสุดที่รอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ (Q_{Tr}) สำหรับประเทศไทยมักนิยมใช้ทฤษฎีกัมเบล (Gumble Distribution) ดังแสดงในสมการที่ 10-8 เมื่อ Tr คือ รอบปีการเกิดซ้ำ เช่น 2, 10, 25, 50, 100, 500 และ 1,000 ปี เป็นต้น

$$Q_{Tr} = \overline{Q}_{peak} - 0.45SD - 0.7797SD \ln\left[-\ln\left(1-\frac{1}{Tr}\right)\right] \qquad \text{สมการที่ 10-8}$$

3) จากสมการที่ 10-8 จะได้ Q_{Tr} ของสถานีวัดน้ำท่าต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยแต่ละสถานีก็ทราบค่า $\overline{Q}_{peak}$ (จากข้อ 1) ดังนั้นจึงสามารถหาอัตราส่วน $Q_{Tr} / \overline{Q}_{peak}$ ของแต่ละสถานีได้ เพื่อความสะดวกในการคำนวณนิยมทำเป็นตาราง

4) หาอัตราส่วนเฉลี่ยของ $Q_{Tr} / \overline{Q}_{peak}$ จากทุกสถานีที่รอบปีการเกิดซ้ำต่าง

5) จากข้อ (4) สร้างกราฟความสัมพันธ์ของ $Q_{Tr} / \overline{Q}_{peak}$ เฉลี่ยกับรอบปีการเกิดซ้ำ (Tr) โดยให้ $Q_{Tr} / \overline{Q}_{peak}$ เป็นค่าในแกน Y และ Tr เป็นค่าในแกน X

6) จากข้อมูลพื้นฐานของแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้างต้นนั้นต้องทราบขนาดพื้นที่รับน้ำ (A) ให้นำ $\overline{Q}_{peak}$ และ A มาทำการหาความสัมพันธ์ในรูปของสมการถดถอย (Regression) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปสมการที่ 10-9

$$\overline{Q}_{peak} = aA^{b} \qquad \text{สมการที่ 10-9}$$

7) ผลการวิเคราะห์ที่ได้ในข้อ 5 (กราฟความสัมพันธ์ของ $Q_{Tr} / \overline{Q}_{peak}$ เฉลี่ย กับ Tr) และข้อ 6 (สมการที่ 10-9) จะสามารถประเมินอัตราการไหลสูงสุดที่รอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ ที่จุดที่ต้องการได้ ทั้งนี้จุดที่ต้องการประเมินอัตราการไหลสูงสุดนั้นต้องทราบขนาดพื้นที่รับน้ำ ซึ่งสามารถหาได้จากแผนที่หรือข้อมูลภูมิประเทศ เป็นต้น



10.9 การออกแบบการระบายน้ำผิวดิน (Surface Drainage Design)

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการแสดงตัวอย่างการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องระบายและขนาดของรางระบายน้ำผิวดินโดยวิธี Rational Method โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

10.9.1 การประมาณค่าอัตราการไหลสูงสุด

ตัวอย่างที่ 1

สมมติจากข้อมูลการสำรวจภูมิประเทศบริเวณแนวทางรถไฟ จ.นครสวรรค์ พบว่ามีพื้นที่รับน้ำ (ระบายน้ำ) ประมาณ 40,000 ม.^{2}และเป็นพื้นที่เกษตรกรรมมีลักษณะเป็นคลื่นสูง ๆ ต่ำ ๆ (Rolling) สภาพดินเป็นดินร่วนปนทราย ระดับน้ำใต้ดินอยู่ค่อนข้างลึก (ไม่จำเป็นต้องพิจารณาปริมาณน้ำใต้ดินจากการซึม) พื้นที่มีความลาดชันเฉลี่ยของพื้นที่ประมาณร้อยละ 0.125 จุดที่ไกลที่สุดเชิงชลศาสตร์ (วัดตามแนวการไหลของน้ำ) ห่างจากจุดออกซึ่งเป็นจุดรวมน้ำเพื่อระบายออกประมาณ 4 กม. ให้คำนวณหาอัตราการไหลสูงสุดที่ต้องการสำหรับออกแบบระบบระบายน้ำ

แนวทางการคำนวณ

จากข้อมูลและลักษณะเฉพาะของพื้นที่จะได้สัมประสิทธิ์น้ำท่า (C , พื้นที่เกษตรกรรมมีลักษณะสูง ๆ ต่ำ ๆ ยังไม่พัฒนาและความลาดชันเฉลี่ยของพื้นที่อยู่ระหว่างร้อยละ 0 – 2 โดยมีรอบปีการเกิดซ้ำที่ออกแบบเท่ากับ 100 ปี) ประมาณ 0.47 และความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างระดับพื้นผิวของจุดไกลสุดกับจุดออก (H) คำนวณได้จาก H = Slope × L

$$H = (0.125/100) \times 4000$$

$$= 5 \text{ ม.}$$

จากสมการที่ 10-4

$$T_C = \left[0.868L^3 / H\right]^{0.385} = \left[0.868 \times 4^3 / 5\right]^{0.385}$$

$$= 2.5 \text{ ชม.}$$

จาก IDF-Curve รูปที่ 10-30 (จ.นครสวรรค์) ที่ช่วงเวลาที่ฝนตกเท่ากับ 2.5 ชม. (เท่ากับระยะเวลาการไหลรวมตัว, T_C) และรอบปีการเกิดซ้ำที่ออกแบบเท่ากับ 100 ปี ประมาณค่าความเข้มฝนได้เท่ากับ 50 มม./ชม.



จากสมการที่ 10-2

$$Q_{peak} = 0.278CIA$$

$$Q_{peak} = 0.278 \times 0.47 \times 50 \times (40,000 / 1000^2)$$

$$= 0.261 \text{ ม}^3./\text{วินาที}$$

ดังนั้นรางระบายน้ำผิวดินที่ต้องออกแบบต้องสามารถระบายน้ำในอัตราการไหลสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 0.261 ม^3./วินาที

10.9.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่ง (Manning's Roughness Coefficient)

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่ง (Manning's *n* หรือค่า *n*) มีความหมายทางกายภาพคือเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเสียดทานของพื้นผิวต่อการไหล ถ้าค่า *n* มีค่ามากแสดงว่าพื้นผิวมีความเสียดทานของการไหลมากนั้นคือไหลช้า ในทางตรงกันข้ามถ้า *n* มีค่าน้อยแสดงว่ามีความต้านทานต่อการไหลน้อย (ไหลเร็ว) ปกติค่า *n*มักได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการร่วมกับการเก็บข้อมูลจริงจากภาคสนามตารางที่ 10-2 ถึง ตารางที่ 10-5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่งตามลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวการไหลต่าง ๆ

ตารางที่ 10-2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่งnสำหรับการไหลในท่อปิดใด ๆ

วัสดุพื้นผิวของราง (ท่อปิด)	ค่าแมนนิ่ง (Manning's n)
คอนกรีต (ท่อกลมหรือท่อกล่อง)	0.012
ท่อเหล็กสังกะสี	0.020
ท่อดินเผา	0.012
ท่อซีเมนต์ใยหิน	0.010
ท่อ P.V.C.	0.009
ท่อเหล็ก	0.009-0.011

ตารางที่ 10-3 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่ง n สำหรับการไหลในรางเปิด (รางดาด)

วัสดุพื้นผิวของราง (ดาด)	ค่าแมนนิ่ง (Manning's n)
ดาดคอนกรีต	0.013-0.017
พื้นรางเป็นกรวดและดาดคอนกรีตด้านข้าง	0.017-0.020
พื้นรางเป็นหินเรียงและดาดคอนกรีตด้านข้าง	0.023-0.033
ดาดยางมะตอยหยาบ	0.016
ดาดยางมะตอยเรียบ	0.013



ตารางที่ 10-4 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่ง n สำหรับการไหลในรางเปิด (รางผิวธรรมชาติหน้าตัดการไหลสม่ำเสมอ)

วัสดุพื้นผิวของราง (ไม่ดาด)	ค่าแมนนิ่ง (Manning's n)
รางไม่มีวัชพืชปกคลุม	0.016-0.018
รางมีหญ้าขึ้นเล็กน้อย	0.022-0.027
พื้นรางเป็นดินปนกรวด	0.022-0.025

ตารางที่ 10-5 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่งnสำหรับการไหลในรางเปิด (รางผิวธรรมชาติหน้าตัดการไหลค่อนข้างสม่ำเสมอ)

วัสดุพื้นผิวของราง (ไม่ดาด)	ค่าแมนนิ่ง (Manning's n)
รางไม่มีวัชพืชปกคลุม	0.022-0.025
รางหญ้าขึ้นเล็กน้อย	0.030-0.035
รางมีวัชพืชพวกตะไคร่น้ำขึ้นมาก	0.030-0.035
พื้นรางเป็นกรวดไม่มีวัชพืชปกคลุมด้านข้าง	0.025-0.030
พื้นรางเป็นหินใหญ่ไม่มีวัชพืชปกคลุมด้านข้าง	0.030-0.040

ตารางที่ 10-6 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่ง n สำหรับการไหลในรางเปิด (รางพื้นผิวเป็นหินแข็ง)

วัสดุพื้นผิวของราง	ค่าแมนนิ่ง (Manning's n)
ผิวเรียบหน้าตัดค่อนข้างสม่ำเสมอ	0.035-0.040
เป็นลูกคลื่นหน้าตัดไม่สม่ำเสมอ	0.040-0.045

10.9.3 การกำหนดความลาดเอียงของรางระบายน้ำ

ความลาดเอียงตามยาวน้อยที่สุดของรางระบายน้ำไม่ควรต่ำกว่า 1:200 นั้นคือการเปลี่ยนแปลงของระดับในแนวดิ่ง 1 หน่วยในระยะราบเท่ากับ 200 หน่วย สำหรับพื้นที่ที่ไม่มีข้อจำกัดด้านภูมิประเทศและผลกระทบของระบบระบายน้ำต่อระบบอื่น ความลาดเอียงที่ 1:100 นั้นจะทำให้การไหลมีความเร็วมากพอที่จะไม่ตกตะกอนและพัดพาวัชพืชหรือเศษวัสดุให้ออกไปจากรางได้ด้วยความเร็วของการไหลเอง ในกรณีที่ความลาดเอียงของรางระบายน้ำน้อยมากตะกอนที่ปนมากับน้ำก็มีโอกาสที่จะตกตะกอนสูง ทำให้ประสิทธิภาพของการระบายน้ำต่ำลงดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มรอบการขุดลอกตะกอนและบำรุงรักษารางมากขึ้น



10.9.4 การคำนวณเพื่อเลือกขนาดหน้าตัดของรางระบายน้ำ

ถ้ากำหนดให้ Sคือความลาดเอียงตามยาวของรางระบายน้ำ n คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่ง (Manning's n) และตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางเรขาคณิตของหน้าตัดการไหล จะได้ความสัมพันธ์ของสมการที่นิยมใช้คำนวณการไหลในทางน้ำเปิดดังแสดงในสมการที่ 10-10 และเป็นที่รู้จักและนิยมเรียกว่าสมการของแมนนิ่ง (Manning's Equation)

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} A \qquad \text{สมการที่ 10-10}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลในที่นี้คืออัตราการไหลสูงสุด (ม.^{3}/วินาที)

n คือ สัมประสิทธิ์ของแมนนิ่ง

A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล (ม.^{2})

P คือ เส้นของเปียก (ม.)

R คือ รัศมีชลศาสตร์ ($R = A / P$, ม.)

S คือ ความลาดเอียงตามยาวของรางระบายน้ำ (ม./ม.)

ถ้ากำหนดให้ $\beta = AR^{2/3}$ จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 10-10

$$Q = \frac{1}{n} \beta S^{1/2} \qquad \text{สมการที่ 10-11}$$

ตารางที่ 10-7 ความสัมพันธ์ของค่า β กับค่า A B และ C ของหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ลำดับ	ขนาดมิติ A (มม.)	ขนาดมิติ B (มม.)	ขนาดมิติ C (มม.)	พื้นที่หน้าตัด (ม.^{2})	P (ม.)	R (ม.)	β
1	200	-	300	0.060	0.700	0.086	0.012
2	200	-	450	0.090	0.850	0.106	0.020
3	200	200	300	0.100	0.866	0.116	0.024
4	200	300	300	0.120	1.021	0.118	0.029
5	200	200	450	0.130	1.016	0.128	0.033
6	300	-	450	0.135	1.050	0.129	0.034
7	300	200	300	0.150	1.021	0.147	0.042
8	300	300	300	0.180	1.149	0.157	0.052
9	450	-	450	0.203	1.350	0.150	0.057



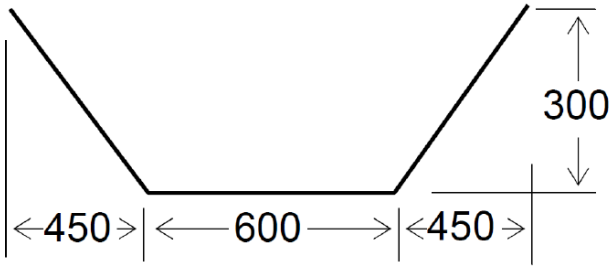
ตารางที่ 10-7 (ต่อ) ความสัมพันธ์ของค่า β กับค่า A B และ C ของหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ลำดับ	ขนาดมิติ A (มม.)	ขนาดมิติ B (มม.)	ขนาดมิติ C (มม.)	พื้นที่หน้าตัด ($ม.^2$)	P (ม.)	R (ม.)	β
10	300	200	450	0.195	1.171	0.167	0.059
11	300	450	300	0.225	1.382	0.163	0.067
12	300	300	450	0.225	1.299	0.173	0.070
13	300	200	600	0.240	1.321	0.182	0.077
14	300	450	450	0.270	1.532	0.176	0.085
15	450	-	600	0.270	1.500	0.180	0.086
16	300	300	600	0.270	1.449	0.186	0.088
17	300	450	600	0.315	1.682	0.187	0.103
18	300	200	900	0.330	1.621	0.204	0.114
19	450	300	450	0.338	1.532	0.220	0.123
20	300	300	900	0.360	1.749	0.206	0.126
21	450	-	900	0.405	1.800	0.225	0.150
22	450	450	450	0.405	1.723	0.235	0.154
23	450	300	600	0.405	1.682	0.241	0.157
24	300	450	900	0.405	1.982	0.204	0.141
25	450	450	600	0.473	1.873	0.252	0.189
26	450	300	900	0.540	1.982	0.272	0.227
27	450	450	900	0.608	2.173	0.280	0.260
28	600	600	600	0.720	2.297	0.313	0.332
29	600	600	900	0.900	2.597	0.347	0.444

เนื่องจากค่า β นั้นขึ้นอยู่กับค่าทางเรขาคณิตของหน้าตัด เช่นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีตัวแปร A B และ C สำหรับกรณีที่ค่า B เท่ากับศูนย์หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมูก็จะกลายเป็นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะเป็นการสะดวกในการออกแบบถ้าสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปร A B C และค่า β (แสดงในตารางที่ 10-7) ซึ่งจะได้แสดงให้เห็นในตัวอย่างต่อไป

ตัวอย่างที่ 2

ดังแสดงในรูปที่ 10-32 รางเปิดหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่ออกแบบให้มีแนวลาดเอียงตามยาวเท่ากับ 1:200 รางมีค่าสัมประสิทธิ์แมนนิ่งเท่ากับ 0.030 จงคำนวณศักยภาพของรางเปิดนี้ในการระบายน้ำโดยใช้สมการที่ 10-10 ในการคำนวณ



รูปที่ 10-32 รางเปิดหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (มิติเป็น มม.)

แนวทางการคำนวณ

คำนวณโดยสมการที่ 10-10 จากข้อมูลที่กำหนดให้

S = 1:200 = 0.005

n = 0.030

A = $(600 \times 300) + 2 \times (0.5 \times 300 \times 450)$

= 351,000 มม.^{2} = 0.315 ม.^{2}

P = $600 + 2 \times (300^2 + 450^2)^{0.5}$

= 1,682 มม.= 1.682 ม.

R = A/P = 0.315/1.682

= 0.187 ม.

Q = $(1/n) \times A \times R^{2/3} \times S^{1/2}$

= $(1/0.030) \times 0.315 \times 0.187^{2/3} \times 0.005^{1/2}$

= 0.243 ม.^{3}/วินาที

คำนวณโดยใช้สมการที่ 10-11 จากข้อมูลหน้าตัดที่กำหนดให้ (A = 300 มม. B = 450 มม. และ C = 600 มม.) จะได้

β = 0.103

จากสมการที่ 10-11

Q = $\frac{1}{n}\beta S^{1/2}$

= $(1/0.030) \times 0.103 \times 0.005^{1/2}$

= 0.243 ม.^{3}/วินาที



10.9.5 ตรวจสอบศักยภาพของหน้าตัดระบายน้ำที่กำหนด

การออกหน้าตัดของรางระบายน้ำ วิศวกรต้องสำรวจและรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของสภาพภูมิประเทศ (เช่นข้อมูล ขนาดพื้นที่รับน้ำ ความลาดชันของพื้นที่ ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน IDF-Curve ของสถานีวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้พื้นที่โครงการมากที่สุด) พร้อมทั้งกำหนดว่ารูปแบบรางระบายน้ำจะเป็นแบบไหน (รูปแบบของหน้าตัด รางดาดหรือไม่ดาด เป็นต้น)

ขั้นตอนต่อเป็นเป็นการสมมติขนาดของหน้าตัด เช่นที่แสดงในตัวอย่างที่ 2 สมมติหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งมีมิติค่า A = 300 มม. B = 450 มม. และ C = 600 มม. รูปที่ 10-26 ด้วยผู้ออกแบบทราบวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างและความลาดเอียงตามยาวของรางระบายน้ำที่ออกแบบจึงสามารถคำนวณศักยภาพของการระบายน้ำของหน้าตัดที่สมมติขึ้นมาได้ ซึ่งตัวอย่างที่ 2 แสดงให้เห็นว่าหน้าตัดที่กำหนดสามารถระบายน้ำได้ด้วยอัตราการไหลสูงสุดไม่เกิน 0.243 ม.^{3}/วินาที

จากนั้นนำอัตราการไหลสูงสุดที่คำนวณได้จากหน้าตัดที่สมมติไปเปรียบเทียบกับค่าประมาณการที่ได้จากสมการที่ 10-1 ($Q_{PF} = Q_R + Q_S + Q_C$) เมื่อค่าอัตราการไหลสูงสุดจากหน้าตัดที่สมมติมีค่ามากกว่า Q_{PF} เล็กน้อย ($Q_{peak} > Q_{PF}$) แสดงว่าหน้าตัดที่สมมติมีความเหมาะสมสามารถลำเลียงปริมาณน้ำหรืออัตราการไหลสูงสุดที่ต้องระบายได้อย่างปลอดภัย หากไม่เป็นไปตางเงื่อนไขข้างต้น ($Q_{peak} \leq Q_{PF}$) จะต้องดำเนินการสมมติขนาดหน้าตัดใหม่และตรวจสอบซ้ำไปเรื่อย ๆ

<u>ตัวอย่างที่ 3</u>

จากตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 จงตรวจสอบว่าหน้าตัดที่กำหนดสามารถลำเลียงปริมาณน้ำหรืออัตราการไหลสูงสุดที่ต้องระบายได้อย่างปลอดภัยหรือไม่

แนวทางการตรวจสอบ

จากสมการที่ 10-1 และผลการคำนวณในตัวอย่างที่ 1

Q_{PF} = $Q_R + Q_S + Q_C$

Q_R = 0.281 ม.^{3}/วินาที

Q_S = 0.0 ม.^{3}/วินาที

Q_C = 0.0 ม.^{3}/วินาที

Q_{PF} = 0.281 + 0.0+ 0.0 = 0.281 ม.^{3}/วินาที

จากหน้าตัดรางระบายน้ำรูปสี่เหลี่ยมคางหมูใน**ตัวอย่างที่ 2** (A = 300 มม. B = 450 มม. และ C = 600 มม.) พบว่าสามารถระบายน้ำได้สูงสุดเท่ากับ Q = 0.243 ม.^{3}/วินาที นั้นคือหน้าตัดที่กำหนดไม่สามารถระบายน้ำได้อย่างปลอดภัย

($Q = Q_{peak} \leq Q_{PF}$)



ต้องสมมติหน้าตัดการไหลใหม่ ในที่นี้สมมติหน้าตัดการไหลเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูเช่นเดิมแต่มีขนาด A = 300 มม. B = 300 มม. และ C = 900 มม. พบว่ามีค่า β = 0.125 จากสมการที่ 10-11 จะได้

Q = (1/n) × β × $S^{1/2}$= (1/0.030) × 0.125× $0.005^{1/2}$

= 0.295 ม.^{3}/วินาที > 0.281 ม.^{3}/วินาที (Q_{PF})

นั้นคือ Q_{peak}> Q_{PF} สามารถระบายน้ำได้อย่างปลอดภัย อย่างไรก็ตามวิศวกรผู้ออกแบบควรสมมติหน้าตัดการไหลใหม่หลาย ๆ หน้าตัดเพื่อเป็นทางเลือกในการเปรียบเทียบต่อไป

10.9.6 ตรวจสอบความเร็วเฉลี่ยของการไหลในหน้าตัดที่กำหนด

เมื่อคำนวณอัตราการไหลสูงสุดในหน้าตัดที่กำหนดได้แล้ว ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการไหลก็สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 10-12

$$Q = AV$$ สมการที่ 10-12

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลในที่นี้คืออัตราการไหลสูงสุด (ม.^{3}/วินาที)

A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล (ม.^{2})

V คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ยของหน้าตัด (ม./วินาที)

ตัวอย่างที่ 4

จาก**ตัวอย่างที่ 3** $Q_{PF} = Q_{peak}$ = 0.281 ม.^{3}/วินาที จงคำนวณความเร็วการไหลเฉลี่ยในหน้าตัดการไหลที่กำหนด

แนวทางการคำนวณ

Q_{PF} = 0.281 ม.^{3}/วินาที

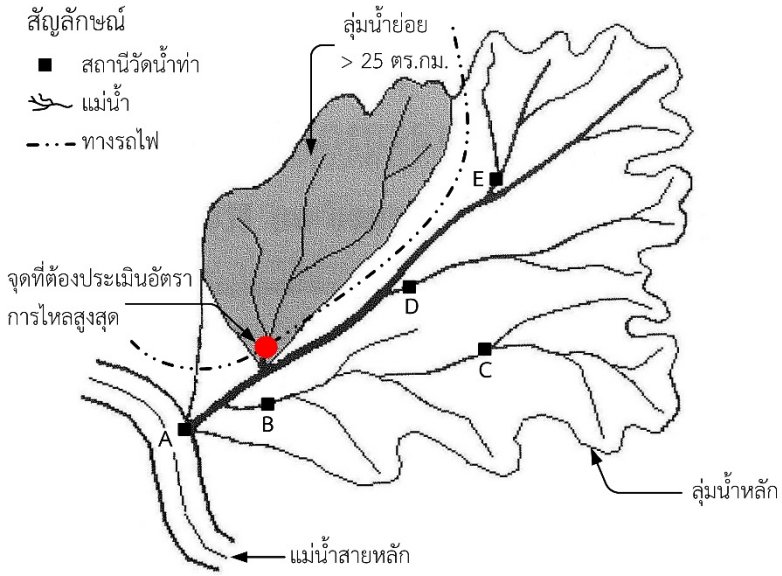
A = 0.360ม.^{2}

V = 0.281/0.360 = 0.780 ม./วินาที

ตัวอย่างที่ 5

จากรูปข้างล่างแสดงลุ่มน้ำแห่งหนึ่งโดยในลุ่มน้ำนี้มีสถานีวัดน้ำท่าที่มีการบันทึกข้อมูลอยู่จำนวน 4 สถานี ได้แก่ สถานี B, C, D และ E โดยแต่ละสถานีมีรายละเอียดและสถิติของข้อมูลดังแสดงในตาราง a ถ้าหากว่ามีทางรถไฟตัดผ่านเข้ามาในพื้นที่ลุ่มน้ำและต้องตัดผ่านลำน้ำสาขาแห่งหนึ่งในลุ่มน้ำนี้ (บริเวณจุดวงกลมทึบ) แต่จุดดังกล่าวไม่มีสถานีวัดน้ำท่า แต่จากข้อมูลภูมิประเทศทราบว่าตรงจุดนี้มีพื้นที่รับน้ำประมาณ 2,800

ตร.กม. (พื้นที่แรเงา) จงประเมินอัตราการไหลสูงสุดที่รอบปีการเกิดซ้ำ 100 ปี โดยอัตราการไหลสูงสุดที่คำนวณได้นี้จะถูกนำไปพิจารณาออกแบบการระบายน้ำเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับทางรถไฟ



ตารางที่ 10-8 รายละเอียดและสถิติของสถานีวัดน้ำท่า

ข้อมูล	สถานี B	สถานี C	สถานี D	สถานี E
ช่วงปีที่มีข้อมูล	2510 – 2522	2506 – 2524	2508 – 2524	2507 – 2527
จำนวน (ปี)	13	19	17	21
พื้นที่รับน้ำ (A, ตร.กม.)	4,090	1,036	1,861	703
$\overline{Q}_{peak}$ (ม.^{3}/วินาที)	681.38	290.80	322.94	132.50
SD (ม.^{3}/วินาที)	484.03	205.48	170.25	93.45

<u>วิธีทำ</u> จากตารางรายละเอียดของสถานีวัดน้ำท่าจะได้ $\overline{Q}_{peak}$ และ SD ของทั้ง 4 สถานี และเมื่อนำพารามิเตอร์ข้างต้นในสมการที่ (8.x.1) จะได้ Q_{Tr} ที่รอบปีการการเกิดซ้ำต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 10-9



ตารางที่ 10-9 ค่า Q_{Tr} ของสถานีวัดน้ำท่า B, C, D และ E

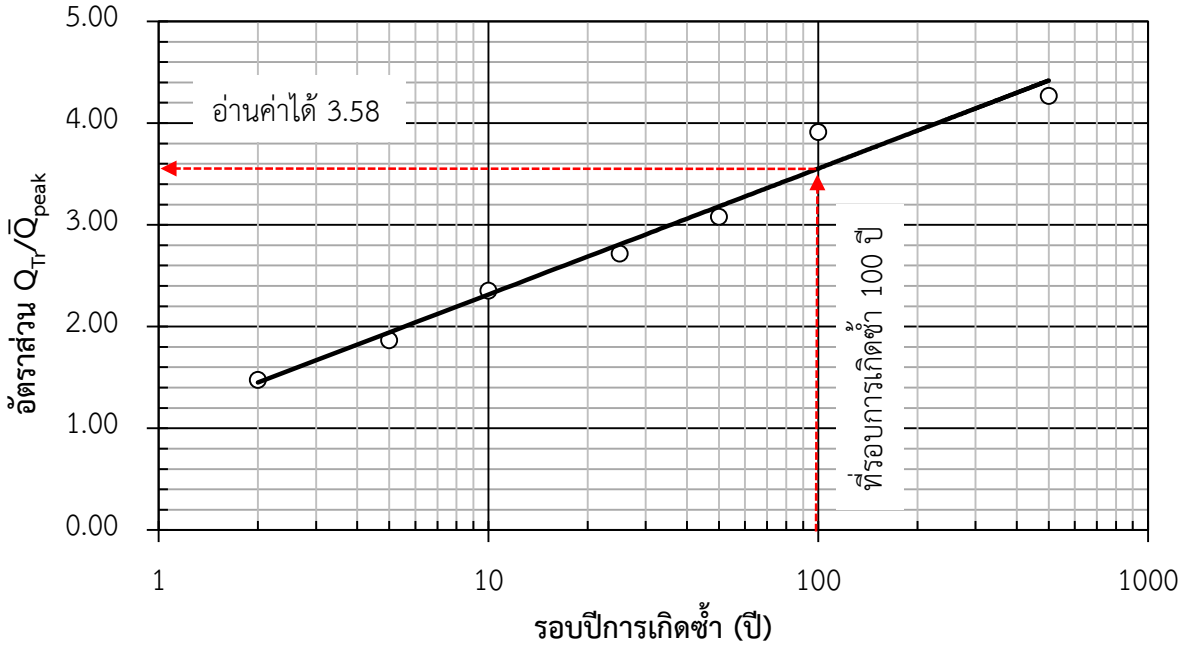
รอบปีการเกิดซ้ำ (ปี)	อัตราการไหล (Q_{Tr} ม.^{3}/วินาที)			
	สถานี B	สถานี C	สถานี D	สถานี E
2	601.89	257.05	294.98	117.15
5	1,029.64	438.64	445.44	199.74
10	1,312.85	558.87	545.05	254.42
25	1,670.69	710.78	670.91	323.50
50	1,936.15	823.47	764.29	374.75
100	2,199.65	935.34	856.97	425.63
500	2,808.57	1,193.83	1,071.15	543.19
1,000	3,070.35	1,304.96	1,163.22	593.73

จากตารางที่ 10-9 สามารถหาค่า $Q_{Tr} / \overline{Q}_{peak}$ ของสถานีวัดน้ำท่า B, C, D และ E ได้ดังแสดงในตารางที่ 10-10

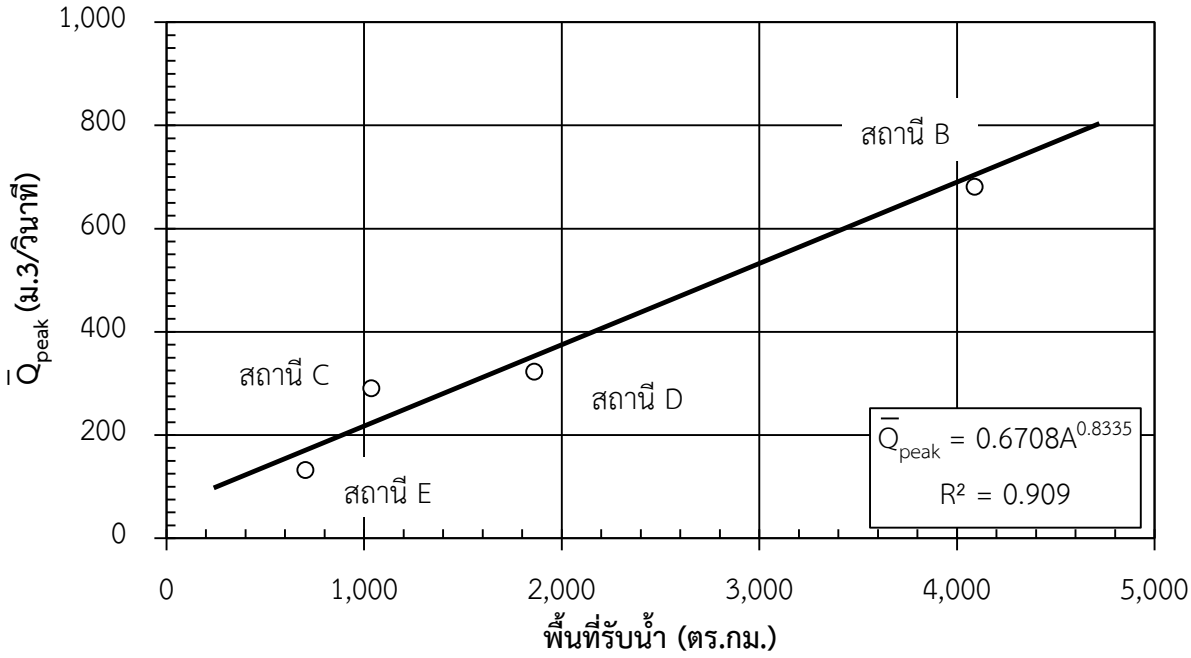
ตารางที่ 10-10 ค่า $Q_{Tr} / \overline{Q}_{peak}$ ของสถานีวัดน้ำท่า B, C, D, E และค่าเฉลี่ยจากทั้ง 4 สถานี

รอบปีการเกิดซ้ำ (ปี)	อัตราส่วน $Q_{Tr} / \overline{Q}_{peak}$				
	สถานี B	สถานี C	สถานี D	สถานี E	เฉลี่ย 4 สถานี
2	0.883	0.884	0.913	0.884	0.891
5	1.511	1.508	1.379	1.507	1.477
10	1.927	1.922	1.688	1.920	1.864
25	2.452	2.444	2.078	2.442	2.354
50	2.842	2.832	2.367	2.828	2.717
100	3.228	3.216	2.654	3.212	3.078
500	4.122	4.105	3.317	4.100	3.911
1,000	4.506	4.487	3.602	4.481	4.269

จากตารางที่ 10-10 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Q_{Tr} / \overline{Q}_{peak}$ โดยใช้ค่าเฉลี่ยทั้ง 4 สถานีกับรอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 10-33 และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\overline{Q}_{peak}$ กับขนาดพื้นที่รับน้ำ (A) แล้ววิเคราะห์สมการการถดถอยได้ $\overline{Q}_{peak} = 0.6708A^{0.8335}$ ดังแสดงในรูปที่ 10-34



รูปที่ 10-33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Q_{Tr} / \bar{Q}_{peak}$ โดยใช้ค่าเฉลี่ยทั้ง 4 สถานีกับรอบปีการเกิดซ้ำต่าง



รูปที่ 10-34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\bar{Q}_{peak}$ กับขนาดพื้นที่รับน้ำ

จากกราฟในรูปที่ 10-33 และรูปที่ 10-34 จะทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลสูงสุดที่รอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ ตรงจุดไหนก็ได้ในบริเวณขอบเขตลุ่มน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์ แต่ต้องทราบขนาดพื้นที่รับน้ำตรงจุดนั้น



ในกรณีนี้ตรงจุดบริเวณทางรถไฟตัดข้ามลำน้ำสาขาซึ่งมีพื้นที่รับน้ำเท่ากับ 2,800 ตร.กม. เมื่อแทนค่าขนาดพื้นที่รับน้ำในสมการถดถอยจะได้ $\overline{Q}_{peak} = 0.6708(2,800)^{0.8335} = 500.95$ ม.^{3}/วินาที และที่รอบปีการเกิดซ้ำเท่ากับ 100 ปี (โจทย์กำหนด) อ่านค่า $Q_{Tr} / \overline{Q}_{peak} = 3.58$ ดังนั้นอัตราการไหลสูงที่ต้องระบายออกเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อทางรถไฟจึงเท่ากับ $Q_{100 ปี}$

$$= \overline{Q}_{peak} \times \left(\frac{Q_{Tr}}{\overline{Q}_{peak}} \right) = 500.95 \times 3.58 = 1,793.40 \text{ ม.}^3\text{/วินาที}$$ ตอบ

10.9.7 ตรวจสอบการดาดรางระบายน้ำ

รางระบายน้ำอาจเป็นรางดินขุด หิน ดิน หรืออื่น ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของรางซึ่งต้องใช้ความรู้ด้านธรณีเทคนิคในการตรวจสอบซึ่งอยู่นอกเหนือของเขตของคู่มือในส่วนนี้ ดังที่ได้กล่าวในมาตรฐาน มขร.S-T-010-256X นั้น รางระบายน้ำนั้นอาจเป็นรางดาดผิวด้วยคอนกรีตหรือไม่ดาดผิวก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของราง (วัสดุผิวราง) และความเร็วสูงสุดที่ยอมให้ของแต่ละวัสดุผิวราง ถ้าความเร็วเฉลี่ยของการไหลในหน้าตัดที่กำหนด (ออกแบบ) มากกว่าความเร็วสูงสุดที่ยอมให้ เมื่อมีการใช้งานได้ระยะหนึ่งความเร็วของการไหลจะกัดเซาะรางขึ้นเรื่อย ๆ และท้ายที่สุดก็นำไปสู่การพังทลายของรางระบายน้ำในที่สุด

จากตารางที่ 10-3 พบว่าความเร็วการไหลสูงสุดที่ยอมให้สำหรับรางดาดคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 6.0 ม./วินาที ในกรณีที่ตรวจสอบแล้วพบว่าความเร็วของการไหลภายใต้อัตราการไหลสูงสุดที่ต้องระบายมีค่ามากกว่าความเร็วสูงสุดที่ยอมให้ ก็ให้เลือกขนาดหน้าตัดที่ใหญ่ขึ้นซึ่งจะทำให้ความเร็วของการไหลเฉลี่ยมีค่าลดลงแล้วต้องตรวจสอบซ้ำว่าค่าที่ได้ไม่เกินความเร็วการไหลสูงสุดที่ยอมให้ ถ้าหากยังมีค่าที่สูงกว่าค่าที่ยอมให้ก็ให้เลือกขนาดหน้าตัดที่ใหญ่ขึ้นอีกแล้วตรวจสอบซ้ำจนกว่าความเร็วการไหลเฉลี่ยของหน้าตัดไม่เกินความเร็วการไหลสูงสุดที่ยอมให้

นอกจากนั้นยังต้องตรวจสอบด้วยว่าลักษณะทางกายภาพของผิวรางระบายน้ำที่ออกแบบด้วยว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่ง (Manning's *n*) สอดคล้องกับค่าที่กำหนดในตารางที่ 10-2ถึง ตารางที่ 10-6หรือไม่ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่งที่มีค่าน้อย เช่นรางผิดดาดคอนกรีตพบว่ามีค่า n ประมาณ 0.013 – 0.017 จะส่งผลการการไหลสะดวกขึ้น (ไหลเร็วขึ้น) ในทางตรงกันข้ามค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่งที่มีค่ามากเช่นรางหน้าตัดธรรมชาติมีหญ้าขึ้นเล็กน้อยจะมีค่า n อยู่ระหว่าง 0.030 – 0.035 เป็นต้น

ในการออกแบบหน้าตัดการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันแต่ลักษณะพื้นผิวของรางแตกต่างกัน รางที่มีค่าสัมประสิทธิ์แมนนิ่งที่น้อยกว่าจะมีขีดความสามารถในการระบายอัตราการไหลสูงสุดได้มากกว่า ดังนั้นถ้ามีข้อจำกัดด้านพื้นที่การเลือกใช้รางดาดจะทำให้สามารถลดขนาดหน้าตัดลงได้ซึ่งจะเป็นการประหยัดพื้นที่ที่ต้องสงวนไว้สำหรับงานด้านการระบายน้ำ



ตารางที่ 10-11 ความเร็วของการไหลสูงสุดที่ยอมให้ในรางเปิด

ชนิด/วัสดุของรางน้ำเปิด	ความเร็ว (ม./วินาที)
ทรายละเอียด (Fine Sand)	0.45
ดินร่วนปนตะกอนทราย (Silt Loam)	0.60
กรวดละเอียด (Fine Gravel)	0.75
ดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay)	0.90
กรวดหยาบ (Coarse Gravel)	1.20
หินดินดาน หรือ ชั้นดานแข็ง (Shale or Hardpan)	1.50
หญ้าปกคลุม (Grass Covered)	1.80
หิน (Stones)	2.50
ยางมะตอย (Asphalt)	3.00
ก้อนหินมนขนาดใหญ่ (Boulders)	5.00
คอนกรีต (Concrete)	6.00

10.10 การออกแบบการระบายน้ำใต้ผิวดิน (Subsurface Drainage Design)

เนื้อหาในส่วนของการระบายใต้ผิวดินประกอบด้วย การคำนวณขนาดของท่อระบายน้ำที่ไหลด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก การระบายน้ำด้วยวัสดุมวลรวม สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ การวางแนวลาดเอียงตามยาวของท่อ ตลอดจนข้อพิจารณาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

10.10.1 การระบายน้ำด้วยท่อ

เนื้อหาต่อจากนี้จะเป็นการแสดงแนวทางหรือขั้นตอนสำหรับคำนวรหาขนาดของท่อระบายน้ำสำหรับระบายน้ำใต้ผิวดิน

ขั้นที่ 1: ปริมาณน้ำที่ต้องระบาย

ก่อนที่จะคำนวณเพื่อกำหนดขนาดของการระบายน้ำใต้ผิวดิน จะต้องมีการประเมินปริมาณของน้ำที่ต้องระบายก่อน การคำนวณสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 10-1

ขั้นที่ 2: เลือกรูปแบบของท่อ

การเลือกรูปแบบหรือชนิดของท่อนั้นให้พิจารณาตามลักษณะของงาน สภาพแวดล้อม และตำแหน่งการฝังของท่อ เช่น ถ้าจำเป็นต้องวางท่อใต้รางรถไฟก็ไม่ควรใช้ท่อแบบมีรูปพรุน (Slotted Pipe) เนื่องจากตำแหน่งนี้ท่อจะได้รับแรงกระทำทางการวิ่งของรถไฟด้วย ในขณะที่ตำแหน่งอื่น ๆ ทั้งท่อที่มีรูพรุนและไม่มีรู



พรุน (Slotted and Unslotted Pipes) อาจสามารถใช้ได้ วิศวกรผู้ออกแบบต้องพิจารณาตามหลักวิชาการและความเหมาะสม

ขั้นที่ 3: กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อก็มีความหมายทางกายภาพเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิ่ง โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อนี้จะได้จากโรงงานผู้ผลิตซึ่งได้จากการทดสอบและขึ้นอยู่กับวัสดุท่อด้วย

ขั้นที่ 4: กำหนดความลาดเอียงตามยาวของแนวท่อ

ปกติค่าความลาดเอียงตามยาวของแนวท่อมักถูกกำหนดโดยข้อจำกัดของพื้นที่ก่อสร้าง (สภาพภูมิประเทศ) อย่างไรก็ตามความลาดเอียงตามยาวของแนวท่อไม่ควรน้อยกว่า 1:300 (โดยปกติความลาดเอียงของแนวท่อประมาณ 1:100 มักเป็นที่นิยมมากในการก่อสร้างและด้วยความลาดชันนี้จะทำให้ความเร็วของการไหลมากพอที่ท่อจะทำความสะอาดตัวเองได้) หลักการโดยทั่วไปคือยิ่งสามารถวางแนวท่อให้มีความลาดเอียงมากเท่าใดการบำรุงรักษาในภายหลังก็จะน้อยเท่านั้น

ขั้นที่ 5: กำหนดขนาดท่อ แสดงดังตารางที่ 10-12

ตารางที่ 10-12 ศักยภาพการลำเลียงน้ำของท่อในแต่ละรูปแบบ

ขนาดท่อ (มม.)	ชนิดท่อ	ความลาดเอียง	อัตราการลำเลียง (ม.^{3}/วินาที)
225	ท่อใยหิน	1 : 100	0.058
225	ท่อใยหิน	1 : 200	0.041
225	คอนกรีต	1 : 100	0.053
225	คอนกรีต	1 : 200	0.037
300	ท่อใยหิน	1 : 100	0.126
300	ท่อใยหิน	1 : 200	0.089
300	ท่อเหล็กอาบสังกะสี	1 : 100	0.105
300	ท่อเหล็กอาบสังกะสี	1 : 200	0.074
300	คอนกรีต	1 : 100	0.114
300	คอนกรีต	1 : 200	0.081
375	ท่อใยหิน	1 : 100	0.228
375	ท่อใยหิน	1 : 200	0.161
375	ท่อเหล็กอาบสังกะสี	1 : 100	0.175
375	ท่อเหล็กอาบสังกะสี	1 : 200	0.124
375	คอนกรีต	1 : 100	0.207



ตารางที่ 10-12 (ต่อ) ศักยภาพการลำเลียงน้ำของท่อในแต่ละรูปแบบ

ขนาดท่อ (มม.)	ชนิดท่อ	ความลาดเอียง	อัตราการลำเลียง (ม.^{3}/วินาที)
375	คอนกรีต	1 : 200	0.147
450	ท่อใยหิน	1 : 100	0.370
450	ท่อใยหิน	1 : 200	0.262
450	ท่อเหล็กอาบสังกะสี	1 : 100	0.265
450	ท่อเหล็กอาบสังกะสี	1 : 200	0.187
450	คอนกรีต	1 : 100	0.337
450	คอนกรีต	1 : 200	0.238
525	ท่อใยหิน	1 : 100	0.559
525	ท่อใยหิน	1 : 200	0.395
525	คอนกรีต	1 : 100	0.508
525	คอนกรีต	1 : 200	0.359
600	ท่อใยหิน	1 : 100	0.798
600	ท่อใยหิน	1 : 200	0.564
600	ท่อเหล็กอาบสังกะสี	1 : 100	0.499
600	ท่อเหล็กอาบสังกะสี	1 : 200	0.353
600	คอนกรีต	1 : 100	0.725
600	คอนกรีต	1 : 200	0.513

หมายเหตุ: ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อที่ใช้ในการคำนวณ

ท่อคอนกรีต = 0.011

ท่อใยหิน = 0.010

ท่อเหล็กอาบสังกะสี = 0.012 – 0.015

เพื่อให้เกิดความสะดวกในการออกแบบ ตารางที่ 10-12 ได้ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยสมการที่ 10-5 โดยตารางประกอบด้วย ขนาดท่อ วัสดุท่อ (สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ) ความลาดเอียงตามยาวของท่อ และอัตราการไหลสูงสุดที่ท่อสามารถลำเลียงได้สำหรับท่อขนาดอื่น ๆ และความลาดเอียงอื่น ๆ วิศวกรผู้ออกแบบก็สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 10-5 ในการออกแบบจากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 วิศวกรผู้ออกแบบต้องทราบอัตราการระบายน้ำสูงสุดที่ท่อต้องระบาย วัสดุท่อ และการวางแนวลาดเอียงตามยาวของท่อ ในตารางที่ 10-12 ก็เพียงเลือกอัตราการระบายน้ำสูงสุดที่ท่อสามารถลำเลียงได้ให้มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดในขั้นตอนที่ 1 เล็กน้อย ก็จะสามารถทราบขนาดท่อที่ต้องการได้



ขั้นที่ 6: ตรวจสอบความเร็วของการไหลเฉลี่ยในท่อ

จากสมการ *V = Q/A* ก็สามารถคำนวณความเร็วของการไหลในท่อได้ ทั้งนี้จะต้องตรวจสอบความเร็วการไหลในท่อไม่ให้เกินความเร็วสูงสุดของท่อแต่ละประเภทที่ยอมให้ตามคำแนะนำของผู้ผลิต ถ้าความเร็วของการไหลสูงเกินกว่าความเร็วที่ยอมให้ในระยะยาวอาจทำให้ผิวท่อเกิดการกัดกร่อนและเสียหายได้

ในกรณีที่ความเร็วของการไหลสูงเกินกว่าความเร็วสูงสุดที่ยอมให้สำหรับท่อแต่ละประเภทก็ควรเลือกขนาดท่อที่ใหญ่ขึ้นซ้ำจะทำให้ความเร็วการไหลเฉลี่ยมีค่าลดลงแล้วตรวจสอบซ้ำว่าอยู่ในขอบเขตค่าที่ยอมให้หรือไม่

10.10.2 การระบายน้ำด้วยวัสดุมวลรวม

การระบายน้ำด้วยวัสดุมวลรวมเหมาะสำหรับกรณีที่คาดการณ์ว่าจะมีปริมาณน้ำที่เกิดจากการซึมไม่มากนัก ในกรณีที่คาดการณ์ว่าจะมีน้ำที่เกิดจากการซึมมากควรมีการวางท่อที่มีรูพรุนในระบบระบายน้ำด้วย

ลักษณะโดยทั่วไปของการระบายน้ำโดยใช้วัสดุมวลรวมคือการระบายน้ำด้วยผืนกรองระบายน้ำ (แผ่นใยสังเคราะห์) และการคำนวณอัตราการระบายก็สามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 10-13 ของดาร์ซี่ (Darcy's Equation)

$$Q = KiA$$ สมการที่ 10-13

เมื่อ Q คือ อัตราการไหล (ม.^{3}/วินาที)

A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล (ม.^{2})

I คือ ความลาดเอียงทางชลศาสตร์

K คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านวัสดุมวลรวม

และในตารางที่ 10-13 แสดงค่าลักษณะเฉพาะของพารามิเตอร์ K × I สำหรับวัสดุรวมรวมขนาด 20 มม. และขนาด 53 มม.ที่ถูกออกแบบให้มีความลาดเอียงทางชลศาสตร์จาก 1:100 ถึง 1:500 ในกรณีอื่น ๆ ค่าพารามิเตอร์นี้จะหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรืออ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 10-13 คือค่าลักษณะเฉพาะของพารามิเตอร์ K × i

ความลาดเอียง	K × I (มวลรวมขนาด 20 มม.)	K × i(มวลรวมขนาด 53 มม.)
1:100	0.00150	0.0040
1:200	0.00075	0.0020
1:300	0.00050	0.0013
1:400	0.00038	0.0010
1:500	0.00030	0.0008



ตัวอย่างที่ 6

ถ้าอัตราการไหลที่ต้องระบายเท่ากับ 0.01 ม.^{3}/วินาที โดยระบายผ่านวัสดุมวลรวมขนาด 20 มม. และมีความลาดชันทางชลศาสตร์ประมาณ 1:200 จงคำนวณหาขนาดพื้นที่ระบายน้ำผ่านวัสดุมวลรวมนี้

แนวทางการคำนวณ

$Q = K \times i \times A$ หรือ

$A = Q/Ki$

$= 0.01/0.00075 = 13.3$ ม.^{2}

ในกรณีเดียวกันแต่เปลี่ยนขนาดวัสดุมวลรวมเป็น 53 มม. จะพบว่า

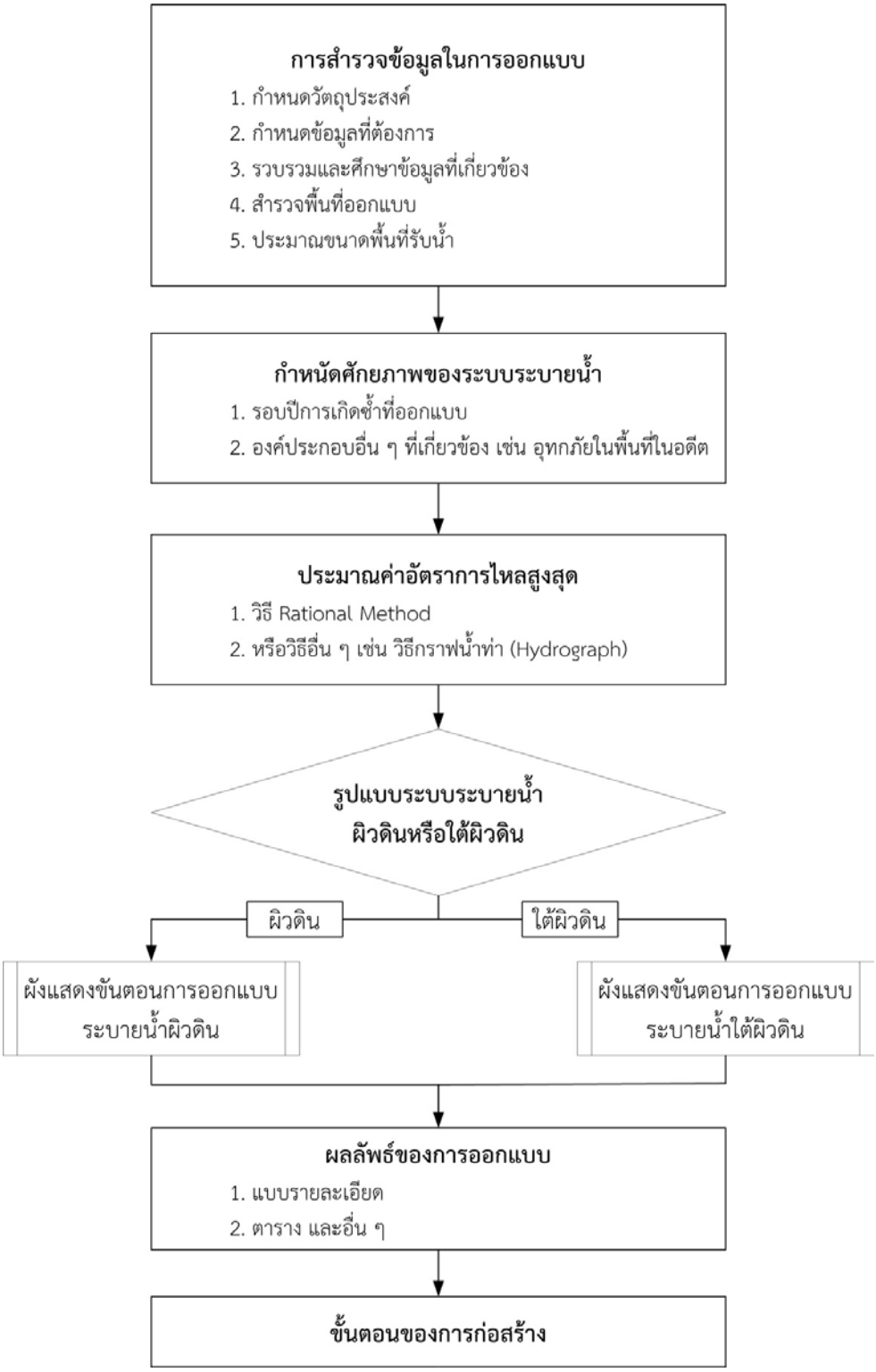
$A = Q/Ki$

$= 0.01/0.002 = 5.0$ ม.^{2}

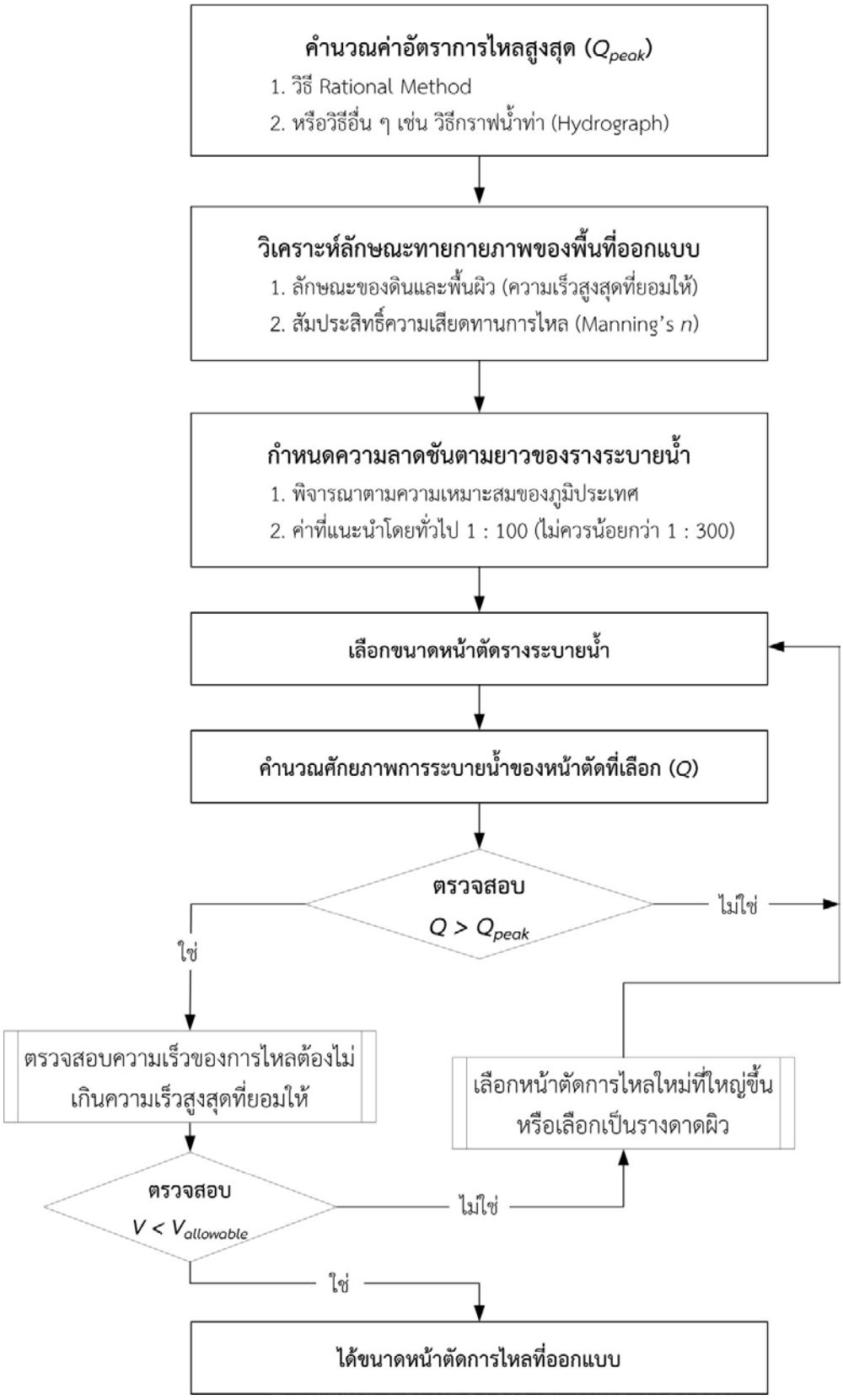
นั้นคือ ขนาดหน้าตัดระบายน้ำผ่านวัสดุมวลรวมลดลงมากกว่าสองเท่า อย่างไรก็ตามค่าที่คำนวณได้ข้างต้นเป็นเพียงค่าโดยประมาณการเท่านั้น เนื่องจากมีพารามิเตอร์ที่อ่อนไหวต่อการคำนวณในกรณีนี้คือค่า *K* ดังนั้น จึงควรออกแบบให้มีหน้าตัดพื้นที่ระบายน้ำให้มีค่ามากกว่าที่คำนวณได้

10.11 สรุปขั้นตอนของการออกแบบการระบายน้ำบนทางรถไฟ

เพื่อเป็นการสรุปแนวทางการออกแบบการระบายน้ำบนทางรถไฟ คู่มือนี้จึงได้สรุปขั้นตอนของการออกแบบเป็นแผนผังแสดงขั้นตอน (แผนผัง) 3 แผนผัง (รูปที่ 10-35 ถึง รูปที่ 10-37) ได้แก่ 1) แผนผังขั้นตอนโดยทั่วไปของการออกแบบ 2) แผนผังแสดงขั้นตอนของการออกแบบระบายน้ำผิวดิน และ 3) แผนผังแสดงขั้นตอนของการออกแบบระบายน้ำใต้ผิวดิน

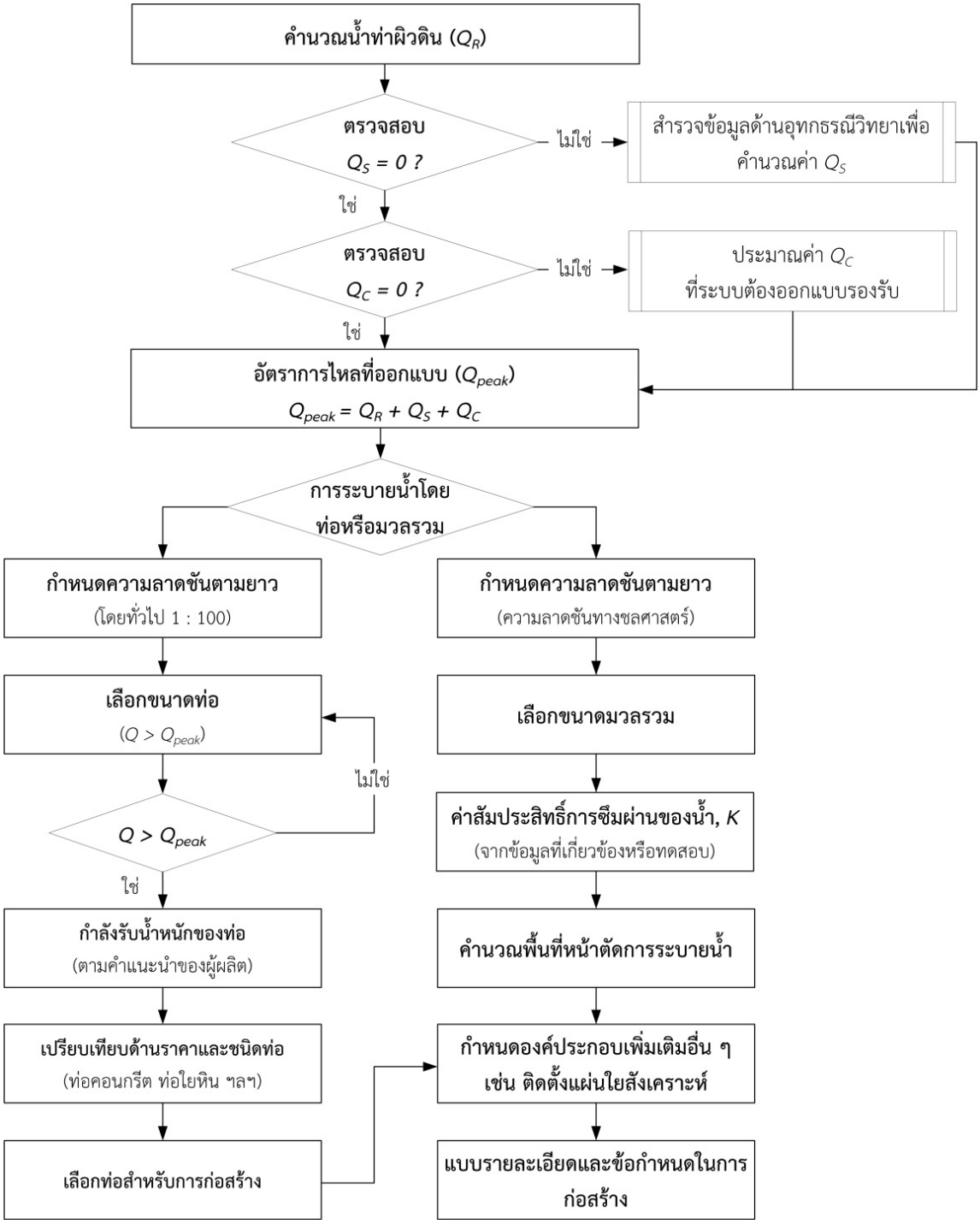


รูปที่ 10-35 ขั้นตอนโดยทั่วไปของการออกแบบระบบระบายน้ำบนทางรถไฟ



รูปที่ 10-36 ขั้นตอนโดยทั่วไปของการออกแบบระบบผิวดินบนทางรถไฟ





รูปที่ 10-37 ขั้นตอนโดยทั่วไปของการออกแบบระบบใต้ผิวดินบนทางรถไฟ



10.12 การก่อสร้างระบบระบายน้ำบนทางรถไฟ

นอกจากข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่ได้ได้รวบรวมและศึกษาแล้ว การสำรวจพื้นที่ก่อสร้างจริงมีความจำเป็นที่ต้องดำเนินการ เพราะแต่ละพื้นที่ก็สร้างอาจมีลักษณะหรือข้อจำกัดเฉพาะที่แตกต่างกันออกไปถึงแม้ว่าจะเป็นรูปแบบการระบายน้ำที่เหมือนกัน อาจมีรายละเอียดอื่นที่จำเป็นที่ต้องนำมาพิจารณาในการก่อสร้าง เช่น การกำหนดและป้องกันพื้นที่ก่อสร้างให้มีความปลอดภัย เครื่องจักรกลที่ต้องใช้ในงานก่อสร้าง และอื่น ๆ เป็นต้น

เนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงขั้นตอนหลัก ๆ สำหรับงานก่อสร้างระบบระบายน้ำบนทางรถไฟทั้งที่เป็นระบบระบายน้ำผิวดินและระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน

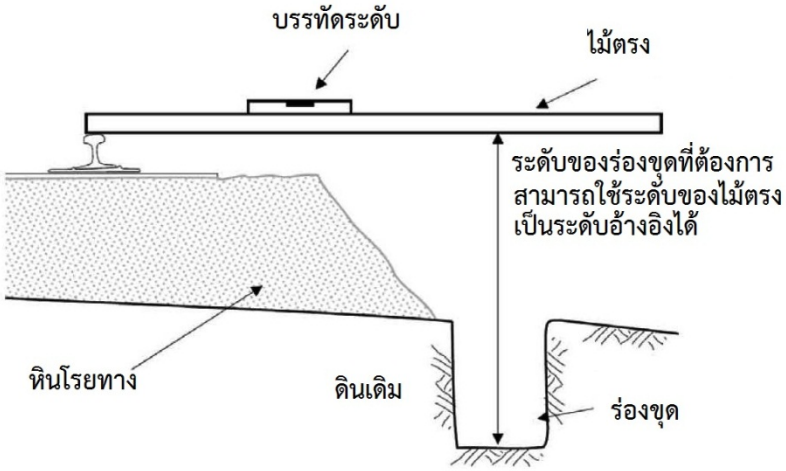
10.13 การวางแนวและความลาดชันของระบบระบายน้ำ

การวางแนวระบบระบายน้ำ เช่น รางระบายน้ำหรือท่อระบายน้ำ ก็ใช้หลักการพื้นฐานและมาตรฐานของงานสำรวจชั้นหนึ่ง โดยทั่วไปทางรถไฟต้องมีแนวทางรถไฟอยู่แล้ว เช่นหมุดอ้างอิงที่มีค่าพิกัดและระดับอ้างอิงที่รู้ค่า (Reference Points) สำหรับงานระบายน้ำสามารถกำหนดให้แนวทางรถไฟนั้นเป็นแนวอ้างอิง ดังนั้นการกำหนดแนวของระบบระบายน้ำจึงสามารถทำได้โดยการกำหนดระยะจากแนวอ้างอิง (Offset) ทั้งนี้ระยะดังกล่าวต้องสอดคล้องกับมาตรฐาน มขร ที่มีระบุไว้ แล้ววางหมุดไปตลอดแนวในทุก ๆ ระยะทาง 25 ม. หรือน้อยกว่าเพื่อความสะดวกในการก่อสร้าง

สำหรับระดับในแนวดิ่งซึ่งจะเกี่ยงข้องกับความลาดชันของระบบระบายน้ำ อย่างน้อยจะต้องมีการกำหนดระดับ 2 ตำแหน่งที่สำคัญคือ ระดับของท้องร่องของการขุด (Trench Bottom หรือ Excavation Depth) และระดับของท้องรางระบายน้ำหรือท้องท่อระบายน้ำ (Pipe Invert) ในทางปฏิบัติถ้าเป็นงานระบายน้ำโดยรางเปิด (Open Channel) การให้ระดับของท้องรางระบายน้ำมักไม่เป็นปัญหาในการก่อสร้าง แต่สำหรับงานระบายน้ำด้วยท่อแล้วการวัดระดับท้องของท่อระบายน้ำในช่วงของการก่อสร้างเพื่อควบคุมงานมักทำได้ไม่สะดวก ดังนั้นจึงควรให้ระดับของหลังท่อระบายน้ำ (Crown of Pipe) ด้วยอีกตำแหน่งหนึ่ง

ในการควบคุมการก่อสร้างเพื่อให้ได้แนวระดับตามที่ออกแบบเช่นงานขุดเพื่อก่อสร้างรางระบายน้ำหรือวางท่อระบายน้ำที่ไม่ลึกมากนัก ผู้ควบคุมงานสามารถใช้แนวทางพื้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 10-38 นั้นคือทราบค่าระดับจากรางรถไฟอยู่แล้ว (ระดับอ้างอิง) จากนั้นก็ใช้ไม้หรือวัสดุอื่น ๆ ที่ตรงและน้ำหนักไม่มาก (Straight Edge) วางพาดตั้งฉากบนรางรถไฟและบนไม้ตรงนี้ก็วางบรรทัดวัดระดับน้ำ (Spirit Level) เพื่อให้มั่นใจว่าไม้ตรงที่วางพาดอยู่บนรางรถไฟนั้นอยู่ในแนวระดับ จากนั้นก็วัดระดับในแนวดิ่งจากไม้ตรงนี้ลงมาถึงท้องของร่องที่จะขุดรวมถึงกำหนดตำแหน่งต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ระดับท้องราง ท้องท่อ หลังท่อ เป็นต้น

ในกรณีที่งานขุดลึกวิธีการข้างต้นอาจไม่เหมาะสม การควบคุมระดับจะเหมาะสมกว่า โดยการใช้กล้องระดับหรือวิธีการอื่น ๆ ที่เหมาะสมก็สามารถประยุกต์ใช้ได้



รูปที่ 10-38 แนวทางการกำหนดระดับของท้องร่องขุด

10.14 การเตรียมหน้างานก่อสร้าง

การเตรียมหน้างานก่อสร้างนั้นขึ้นอยู่กับพื้นที่การก่อสร้าง ปริมาณงานที่ต้องดำเนินการมากน้อยแตกต่างกันไป โดยทั่วไปมักประกอบด้วยงานดังต่อไปนี้

- งานเคลียร์พื้นที่ก่อสร้างและกำหนดเขต
- งานปรับหน้าดินหรืออื่น ๆ ที่ไม่พึงประสงค์ออกนอกพื้นที่
- งานเตรียมถนนหรือเส้นทางเข้าออก
- งานเตรียมทางเลี้ยงทางชั่วคราว (การก่อสร้างอาจกระทบการจราจรหรืออื่น ๆ)
- งานปรับปรุงระบบระบายน้ำเดิมที่มีอยู่แล้ว (การก่อสร้างระบบระบายน้ำต้องไม่ทำให้เกิดปัญหาการระบายน้ำกับพื้นที่)
- งานกันพื้นที่ ป้องกันพื้นที่ หรืองานเคลื่อนย้ายระบบสาธารณูปโภคอื่น ๆ ออกจากพื้นที่ก่อสร้าง

การดำเนินงานก่อสร้างจะมีอุปสรรคมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับการเตรียมงาน การวางแผนที่รอบครอบและการบริหารงานอย่างเป็นระบบ

10.15 งานขุด

เพื่อให้ได้แนวระดับของระบบระบายน้ำตามที่ออกแบบ งานขุดเป็นงานที่มิอาจหลีกเลี่ยงได้ ความยากง่ายของงานขุดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สภาพภูมิประเทศ ลักษณะดินหรือหิน (ถ้าเป็นหินก็ต้องมีงานระเบิดหิน) ฯลฯ ดังนั้นขั้นตอนรวมถึงเครื่องจักรที่ต้องใช้ก็แตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปร่องขุดต้องกว้างเพียงพอที่จะทำให้งานบดอัดกลับด้านข้างทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ



สำหรับงานขุดที่ต้องดำเนินการใกล้กับโครงสร้างหรือระบบสาธารณูปโภคอื่นควรดำเนินการอย่างระมัดระวัง โดยข้อแนะนำทั่วไปและเงื่อนไขสำหรับงานขุดและการเลือกใช้เครื่องจักรประกอบด้วย

- พื้นที่เข้าออก
- ปริมาณวัสดุที่ต้องขุด
- วัสดุที่ต้องขุด เช่น ดิน หิน
- พื้นที่ทิ้งวัสดุที่ขุด/ การขนย้าย
- พื้นที่ว่างชั่วคราวเผื่อกรณีอื่น ๆ ที่จำเป็น (Temporary Service Area)

10.16 การก่อสร้างระบบระบายน้ำผิวดิน

ระบบระบายน้ำผิวดินคือโครงสร้างที่รองรับและระบายน้ำผิวดินจากบริเวณทางรถไฟออกนอกพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการก่อสร้างจะประกอบด้วยงานสำรวจเพื่อวางแนวและกำหนดระดับ งานขุด และบางพื้นที่อาจมีงานดาดผิวรางระบายน้ำด้วย โดยมีขั้นตอนของงานก่อสร้างต่าง ๆ ประกอบด้วย

- งานสำรวจเพื่อวางแนวและระดับของรางระบายน้ำ
- งานสร้างแนวและหมุดอ้างอิงสำหรับควบคุมงานก่อสร้าง
- งานเตรียมพื้นที่หน้างานก่อสร้าง
- งานขุด
- งานก่อสร้างรางระบายน้ำและควบคุมระดับ (ความลาดชัน)
- หากความเร็วของการไหลที่ออกแบบมากและลักษณะดินขุดอาจเสียหายได้จากการชะล้าง (Risk of Erosion) รางก็ควรเป็นรางดาดผิว
- งานทำความสะอาดและปรับพื้นที่กลับ เช่น งานปลูกหญ้า ปรับความลาดชันของพื้นที่ เป็นต้น

10.17 การก่อสร้างระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน

การก่อสร้างระบบระบายน้ำใต้ดินก็มีหลักการเช่นเดียวกันกับการก่อสร้างระบบระบายน้ำผิวดิน แต่จะประกอบไปด้วยงานหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

- งานระบายน้ำตามยาว
- งานระบายน้ำตามขวาง
- งานก่อสร้างผืนระบายน้ำ
- งานก่อสร้างบ่อรวมน้ำหรือบ่อตรวจ
- จุดรับน้ำเข้าและระบายน้ำออก



งานระบายน้ำตามยาว

การระบายน้ำตามยาวด้วยท่อถือได้ว่าเป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุดสำหรับการระบายน้ำบนทางรถไฟ โดยมีขั้นตอนพื้นฐานในการก่อสร้างดังนี้

- งานสำรวจพื้นที่
- งานวางแนวและสร้างหมุดอ้างอิงสำหรับการกำหนดค่าระดับ
- งานขุดและการป้องกันเสถียรภาพด้านข้างของงานขุด (ในกรณีที่ขุดลึก)
- งานวางท่อและควบคุมระดับ(เช่นความลึกของท่อระบายน้ำที่ดำเนินการก่อสร้าง) ทั้งนี้ระดับต่าง ๆ จะต้องสอดคล้องกับมาตรฐาน มขร S-T-010-256X (การระบายน้ำด้วยท่อ)
- งานถมกลับและปรับพื้นที่

งานระบายน้ำตามขวาง

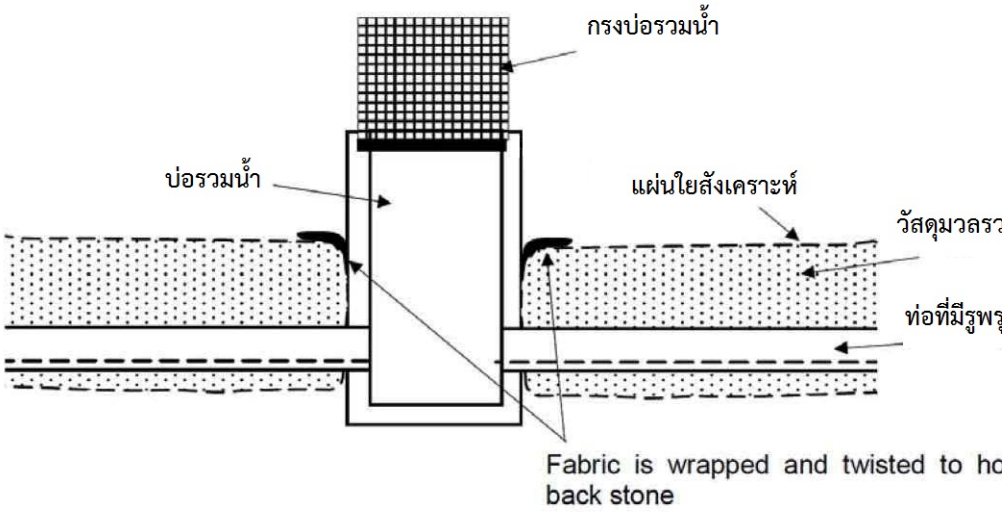
การระบายน้ำตามขวางนี้โดยทั่วไปคือจุดเปลี่ยนทางวิ่ง (Turnout) สำหรับขั้นตอนทั่วไปในการก่อสร้างก็เหมือนกับการก่อสร้างงานระบายน้ำตามยาวจะแตกต่างกับก็เฉพาะระดับความลึกของท่อที่ไม่ควรน้อยกว่า 1,200 มม. จากระดับรางรถไฟ

สำหรับการระบายน้ำจากคันทางรถไฟ (Embankment Drainage) การขุดอาจใช้รถแบคโฮขุดให้ได้ระดับตามที่ออกแบบส่วนขั้นตอนก่อสร้างก็เหมือนกับงานระบายน้ำตามยาว

งานก่อสร้างผืนระบายน้ำ

การระบายน้ำรูปแบบนี้มักพบบ่อยครั้งในงานก่อสร้างคันทางรถไฟ หรือถ้านอกจากการก่อสร้างคันทางเองแล้วผืนระบายน้ำยังใช้บ่อยในการซ่อมบำรุงคันทางรถไฟด้วย สำหรับขั้นตอนการก่อสร้างหลัก ๆ มีดังนี้

- งานขุด
- งานบดอัดคันทางเพื่อให้ได้ระดับ
- งานวางแผ่นใยสังเคราะห์ และทุก ๆ จุดต่อของแผ่นใยสังเคราะห์ควรวางให้ซ้อนทับกันอย่างน้อย 1 ม.
- งานวางวัสดุมวลรวมโดยทั่วไปใช้ขนาด 20 มม. ถึง 53 มม. และชั้นความหนาของวัสดุมวลรวมนี้ไม่ควรเกิน 300 มม.
- พับด้านข้างของแผ่นใยสังเคราะห์ไว้บนวัสดุมวลรวม
- เรียงหิน (Riprap) ขนาด 100 มม. ถึง 150 มม. เพื่อป้องกันผิวหน้าของแผ่นระบายน้ำ
- ก่อสร้างคันทางรถไฟให้ได้ระดับตามที่ออกแบบ



รูปที่ 10-39 จุดเชื่อมต่อระหว่างบ่อรวมน้ำกับท่อระบายน้ำ

งานก่อสร้างบ่อตรวจ

โดยปกติบ่อตรวจหรือรวมน้ำจะถูกวางเป็นระยะทุกๆ 30 ม. ถึง 50 ม. ยกเว้นบริเวณชานชาลาซึ่งระยะทางระหว่างบ่อรวมน้ำจะสั้นลง (มาตรฐาน มขร S-T-010-256X) ในการก่อสร้าง ณ ตำแหน่งที่ต้องก่อสร้างบ่อรวมน้ำ ร่องระบายน้ำจะถูกขุดให้กว้างและลึกขึ้นเพื่อให้สามารถวางบ่อร่วมน้ำได้ (อาจเป็นบ่อคอนกรีตที่หล่อในที่หรือบ่อคอนกรีตหล่อสำเร็จแล้วยกมาติดตั้งก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ) การปรับปรับฐานของบ่อรวมน้ำให้ได้ระดับสามารถทำได้โดยใช้ทรายบดอัด และรูปที่ 10-39 แสดงการเชื่อมต่อระว่างบ่อรวมน้ำกับท่อระบายน้ำ (มีรูพรุนหรือไม่มีรูพรุน) แต่โดยปกติท่อระบายน้ำแบบมีรูพรุนและแผ่นใยสังเคราะห์มักเป็นที่นิยมสำหรับการก่อสร้างจุดเชื่อมต่อระหว่างบ่อรวมน้ำกับท่อระบายน้ำ

จุดรับน้ำเข้าและระบายน้ำออก

ประเด็นที่สำคัญของโครงสร้างจุดดังกล่าวคือวิธีการเพื่อป้องกันปัญหาการกัดเซาะ หลักการโดยทั่วไปคือต้องออกแบบไม่ให้ความเร็วของการไหลเกินกว่าที่ยอมให้ และควรก่อสร้างโครงสร้างต่าง ๆ ที่เหมาะสมเช่น

- ชุดคอนกรีตหล่อสำเร็จ
- เรียงกระสอบทรายอัดแน่นรอบปากท่อ
- ทำกำแพงปากท่อ

บรรณานุกรม

[1] American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA), “AREMA Manual for Railway Engineering”, American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Landover, Maryland, Chapter 30, 2012

[2] AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association), “Manual for Railway Engineering”.

[3] AREMA Manual for Railway Engineering: 2011: Volume 2: Concrete Structures and Foundations: Part 27 Concrete Slab Track

[4] AS 1085 Railway track material Part 21: “Turnouts, switches and crossings”

[5] ASTM C 117-13 Standard Test Method for Materials Finer than 75 micron (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing

[6] ASTM C 127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate

[7] ASTM C 128-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate

[8] ASTM C 131-01 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine

[9] ASTM C 136-01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates

[10] ASTM C 295-12 Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete

[11] ASTM C 535-16 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine

[12] ASTM C 702-98 Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size

[13] ASTM C 88-13 Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate



[14] ASTM D 421-85(2007) Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants

[15] ASTM D 422-63(2007) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils

[16] ASTM D 4791-10 Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate

[17] ASTM D 6928-17 Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus

[18] ASTM D 75-03 Standard Practice for Sampling Aggregates

[19] ASTM D1452 / D1452M – 16 Standard Practice for Soil Exploration and Sampling by Auger Borings

[20] ASTM D1556 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method

[21] ASTM D1557 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3(2,700 kN-m/m3))

[22] ASTM D1586-11 Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils

[23] ASTM D1587 Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Fine-Grained Soils for Geotechnical Purposes

[24] ASTM D1883 – 16 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils

[25] ASTM D2166 / D2166M – 16 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil

[26] ASTM D2167 – 15 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Rubber Balloon Method

[27] ASTM D2216 – 10 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass

[28] ASTM D2217-85(1998) Standard Practice for Wet Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants



[29] ASTM D2434-68(2006) Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)

[30] ASTM D2487 – 11 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)

[31] ASTM D2488 Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)

[32] ASTM D2573 Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils

[33] ASTM D2664-04 Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens Without Pore Pressure Measurements

[34] ASTM D3441 Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Testing of Soils

[35] ASTM D420-98(2003) Standard Guide to Site Characterization for Engineering Design and Construction

[36] ASTM D4253 – 16 Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table

[37] ASTM D4254 – 16 Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density

[38] ASTM D4318 – 10 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils

[39] ASTM D4546 – 14 Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils

[40] ASTM D4767 – 11 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils

[41] ASTM D698 – 12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3(600 kN-m/m3))

[42] ASTM D854 – 14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer



[43] D J Thompson, “Railway noise and vibration – Mechanisms, modelling and means of control”, Elsevier, 2009

[44] D.V. Nguyen, K.D. Kim, P. Warnitchai, “Dynamic analysis of three-dimensional bridge-high-speed train interactions using a wheel/rail contact model”, Engineering Structures, 31(12): 3090–3106, 2009

[45] D.V. Nguyen,“Dynamic Analysis Of Bridge-Train Interaction Through Wheel-Rail Interface”, Dissertation, Asian Institute of Technology, 2008

[46] EN 13146-1 Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 1: Determination of longitudinal rail restraint;

[47] EN 13146-2 Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 2: Determination torsional resistance;

[48] EN 13146-3 Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 3: Determination of attenuation of impact loads;

[49] EN 13146-4 Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 4: Effect of repeated loading;

[50] EN 13146-5 Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 5: Determination of electrical resistance;

[51] EN 13146-6 Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 6: Effect of severe environmental conditions;

[52] EN 13146-7 Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 7: Determination of clamping force;

[53] EN 13146-9 Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 9: Determination of stiffness;

[54] EN 1367-1: 2007 Tests for thermal and weathering properties of aggregates. Determination of resistance to freezing and thawing

[55] EN 15273-1, Railway applications — Gauges — Part 1: General — Common rules for infrastructure androlling stock

[56] EN 15273-2, Railway applications — Gauges — Part 2: Rolling stock gauge



[57] EN 15273-3, Railway applications — Gauges — Part 3: Structure gauges

[58] EN 16432-1:2015: Railway applications – Ballastless Track Systems - Part 1: General requirements

[59] EN 16432-2:2015: Railway applications - Ballastless Track Systems - Part 2: Subsystem and components

[60] EN 16432-3:2015: Railway applications - Ballastless Track Systems - Part 3: Acceptance

[61] EN 1670. Railway applications - Track – Safety protection on the track during work

[62] EN 1991-2:2003:Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges

[63] EN 933-3: 2012 Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle shape. Flakiness index

[64] EN 933-4: 2008 Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle shape. Shape index

[65] Fries, R.H., Coffey, B.M., “A state-space approach to the synthesis of random vertical and crosslevel rail irregularities”, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 112(1):83-87, 1990.

[66] Fryba L., “Dynamics of Railway bridges”, Telford, 1996.

[67] Hay W W., “Railroad engineering. New York”, NY: John Wiley & Sons, 1953.

[68] Hertz H.,“UÈ ber die BeruÈhrung fester elastischer KoÈrper. J. reine und angewandte Mathematik”, 92 (1882), 156±171

[69] INDIAN STANDARD, HMR: SS: 01-2008: MANUAL OF SPECIFICATIONS AND STANDARDS. 2008, Department of Elevated Mass Rapid Transit System: Ministry of Railways (Railway Board) Government of India.

[70] IRISH STANDARD, EN 13803-1, Railway Applications Track-Track alignment design Parameters Track gauges 1435 mm and wider in Part1: Plain line. 2010.

[71] IRISH STANDARD, EN 13803-2, Railway applications- Track- Track alignment design parameters- Track gauges 1435 mm and wider in Part 2: Switches and crossings

and comparable alignment design situations with abrupt changes of curvature. 2010.

[72] Jin Yu Choi, “The Mechanism of Railway Track”,Intensive course on railway track engineering, Engineering Institute of Thailand, 2015

[73] Kalker J. J.,“Wheel-rail rolling contact theory”, Wear 144 (1991), 243±261

[74] KR C-14040 Concrete Track Structure

[75] Ministry of Railway, “Standard for Construction Quality Acceptance of Railway Track Engineering”,China Railway Publishing House, China, 2003

[76] Part 1: Railway risks and common principles for protection of fixed and mobile work sites

[77] SATISH CHANDRA and M.M. AGARWAL, Railway Engineering. 2007: Oxford University Press.

[78] Schramm G.,“Permanent way technique and permanent way economy”, Darmstadt, Germany,Otto Elsner Verlagsgesellschaft, 1961

[79] SCRRA Design Criteria Manual, Southern California Regional Rail Authority, 2014

[80] T HR CI 12130 ST Track Drainage. State of NSW through Transport for NSW. Version 1, 2015

[81] THE INTERNATIONAL UNION OF RAILWAY (UIC), UIC 710R: Minimum track gauge in curve. 2008, The International Union of Railway (UIC).

[82] UIC 774-3R. “Track/bridge Interaction Recommendations for calculations”.

[83] UIC 864-5, “Technical specifications for supply of rail seat pads”

[84] UIC, “UIC 518-ORTesting and Approval of Railway Vehicles on the point of view of their Dynamic Behavior-Safety-Track Fatigue-Ride”, International Union of Railway-UIC, 2005

[85] UIC, “UIC 776-2R Design requirement for rail-bridges based on interaction phenomena between train, track and bridge”, International Union of Railway-UIC, 2009

[86] เจน บุญซื่อ. (2537). ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ. กรุงเทพมหานคร: แผงไทย.



[87] เจน บุญซื่อ. (2537). ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ. กรุงเทพมหานคร: แผงไทย.

[88] การรถไฟแห่งประเทศไทย รฟท., มาตรฐานงานก่อสร้าง การรถไฟแห่งประเทศไทย รฟท. 2559.

[89] การรถไฟแห่งประเทศไทย: คู่มือบำรุงทาง พ.ศ. 2559

[90] การรถไฟแห่งประเทศไทย: คู่มือปฏิบัติการบำรุงทางตามวาระ. พ.ศ. 2558

[91] การรถไฟแห่งประเทศไทย: รายการมาตรฐานสำหรับงานก่อสร้างพื้นทางรถไฟ พ.ศ. 2558

[92] ข้อกำหนดการเดินรถไฟ การรถไฟแห่งประเทศไทย

[93] คู่มือการใช้แบบมาตรฐานท่อลอดถนน (มฐ) 04-01 กรมชลประทาน

[94] คู่มือการออกแบบระบบระบายน้ำบนสะพานและในทางลอด กรมทางหลวง

[95] คู่มือการออกแบบอาคารระบายน้ำและป้องกันการกัดเซาะในงานทางหลวง. กรมทางหลวง พ.ศ. 2554

[96] ฝ่ายโครงการพิเศษและก่อสร้าง, “คู่มือดำเนินการประกอบและติดตั้งประแจมุม 1:12 ขนาด 100 ปอนด์ เอ หมอนคอนกรีต”,การฝึกอบรมโครงการจัดการความรู้สู่การปฏิบัติ, การรถไฟแห่งประเทศไทย

[97] ฝ่ายการช่างโยธา, “คู่มือบำรุงทาง”, การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2016

[98] มอก. 2528 เล่ม 3 –2553: การทดสอบหมอนคอนกรีตอัดแรงสำหรับรางรถไฟ

[99] มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) 1914-52 มาตรฐานการระบายน้ำสำหรับงานถมดิน

[100] มาตรฐานงานทางหลวงท้องถิ่น (มถ.) 501-2550 มาตรฐานงานท่อระบายน้ำคอนกรีตเสริมเหล็ก

[101] มาตรฐานงานทางหลวงท้องถิ่น (มถ.) 502-2550 มาตรฐานงานระบายน้ำและโครงสร้างประกอบอื่นๆ

[102] รถไฟฟ้ามหานคร, มาตรฐานงานก่อสร้างรถไฟฟ้ามหานคร. 2542.

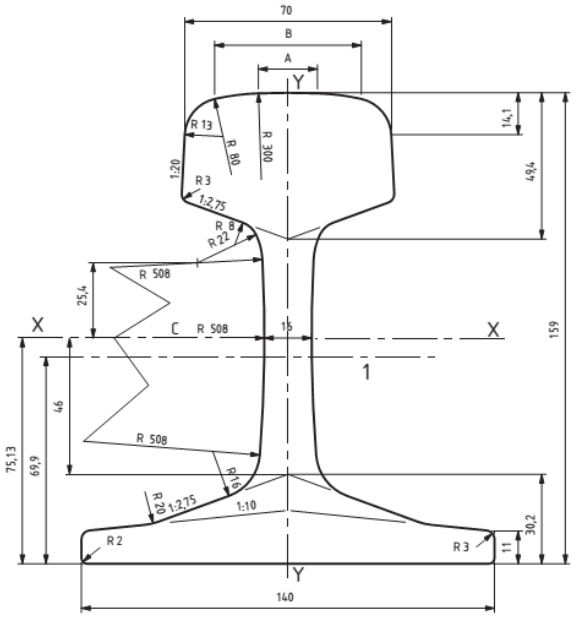
[103] รายงานประกอบแบบโครงการรถไฟทางคู่ -จิระขอนแก่น การรถไฟแห่งประเทศไทย

[104] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข), “งานออกแบบรายละเอียดโครงการระบบขนส่งกรุงเทพมหานคร ช่วงแบริ่ง-สมุทรปราการ และออกแบบโครงสร้างพื้นฐาน สิ่งอำนวยความสะดวกด้านการจราจรที่เกี่ยวข้อง”

[105] อรรถพล เก่าประเสริฐ, เอกสารประกอบการบรรยาย วิศวกรรมโครงสร้างทางรถไฟ (Railway Track Engineering), ว. (วสท.), Editor. 2559.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก



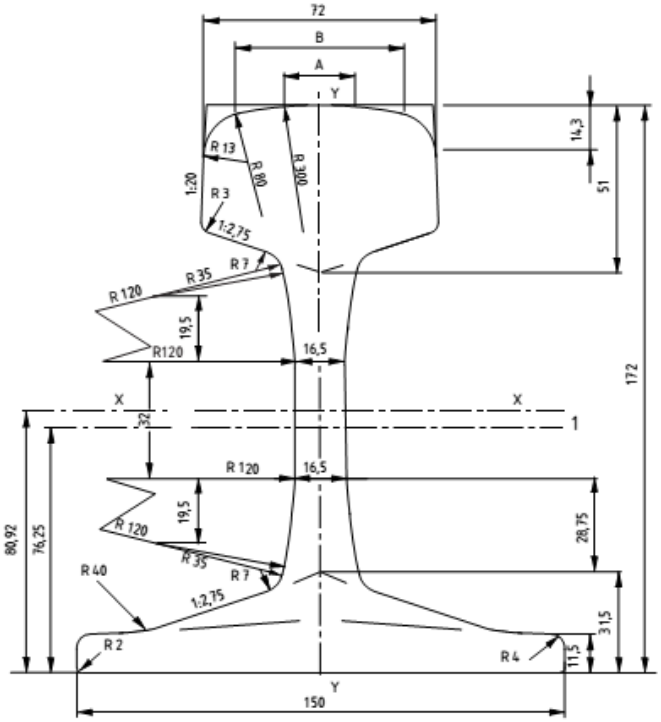
หน่วย : มิลลิเมตร

เครื่องหมาย

พื้นที่ตัดขวาง	:	69.77 ซม.^{2}
น้ำหนักต่อความยาว	:	54.77 กก./ม.
โมเมนต์ความเฉื่อยแกน x-x	:	2337.9 ซม.^{4}
มอดูลัสหน้าตัด–ส่วนหัว	:	278.7 ซม.^{3}
มอดูลัสหน้าตัด– ส่วนฐาน	:	311.2 ซม.^{3}
โมเมนต์ความเฉื่อยแกน y-y	:	419.2 ซม.^{4}
มอดูลัสหน้าตัดแกน y-y	:	59.9 ซม.^{3}
ขนาดกว้างยาว	:	A = 20.024 มม., B = 49.727 มม.

รูปที่ ก-1 หน้าตัดราง 54 E 1

ภาคผนวก ข



หน่วย : มิลลิเมตร

เครื่องหมาย

พื้นที่ตัดขวาง	:	76.70 ซม.^{2}
น้ำหนักต่อความยาว	:	60.21 กก./ม.
โมเมนต์ความเฉื่อยแกน x-x	:	3038.3 ซม.^{4}
โมดูลัสหน้าตัด–ส่วนหัว	:	333.6 ซม.^{3}
โมดูลัสหน้าตัด– ส่วนฐาน	:	375.5 ซม.^{3}
โมเมนต์ความเฉื่อยแกน y-y	:	512.3 ซม.^{4}
โมดูลัสหน้าตัดแกน y-y	:	68.3 ซม.^{3}
ขนาดกว้างยาว	:	A = 20.456 มม., B = 52.053 มม.

รูปที่ ข-1 หน้าตัดราง 60 E 1



ภาคผนวก ค

1. พิกัดความเผื่อความยาวของราง

ความยาวรางที่วัดได้ต้องอยู่ภายในพิกัด ±6 มิลลิเมตร สำหรับรางความยาวมาตรฐาน 24 เมตร หรือต่ำกว่า และ ±10 มิลลิเมตร สำหรับรางความยาวมาตรฐาน 25 เมตรขึ้นไป

2. พิกัดความเผื่อของโปรไฟล์ แสดงดังตาราง

* Reference points (see Figure E.1 ตามมาตรฐาน EN13674-1)			Profile class (dimensions in mm)	Gauge figure number (see annex E ตามมาตรฐาน EN13674-1)
Location		Symbol	X	
Height of rail[a]	< 165	*H	± 0.5	3
	≥ 165		± 0.6	
Crown profile	Class A straightness	*C	+ 0.6 / - 0.3	4
	Class B straightness		± 0.6	
Width of rail head		*WH	± 0.5	5
Rail asymmetry		*As	± 1.2	6,7
Inclination of fishing surfaces (on the basis of 14 mm parallel to the inclined theoretical fishing surfaces)[b]		*IF	± 0.35	8
Height of fishing	< 165	*HF	± 0.5	8
	≥ 165		± 0.6	
Web thickness		*WT	+ 1.0 / - 0.5	9
Width of rail foot		*WF	± 1.0	10
Foot toe thickness		*TF	+ 0.75 / - 0.5	11
Foot base concavity			0.3 max	

[a]The total height variation over any rail length shall not be greater than 1 mm for rails < 165 mm and 1.2 mm for rails ≥ 165 mm.

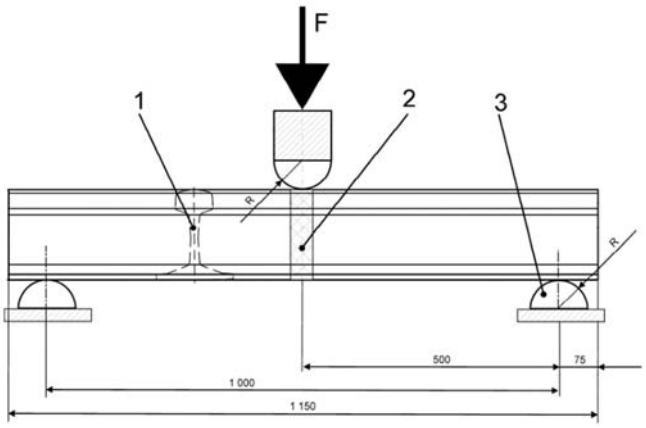
[b]The maximum fishing tolerance on the head and on the foot is 0.35 mm but the total tolerance allowed is also 0.35 mm.

ภาคผนวก ง

การทดสอบการดัดงอของรอยเชื่อมไฟฟ้า(Flash Butt Welding)

แนวเชื่อมรางต้องผ่านเกณฑ์รับรองในตารางที่ ง1 และการทดสอบแสดงดังรูปที่ ง1 ในการทดสอบแต่ละครั้งต้องทำต่อเนื่องจนได้ค่าในตารางที่ ง1 ในกรณีที่ไม่มีการแตกหักต้องหยุด ในกรณีที่ต้องการให้เกิดการแตกหักบริเวณแนวเชื่อมจะต้องมีการบากแนวเชื่อมและทำการทดสอบไปจนแตกหัก

สำหรับการทดสอบการดัดงอในการผลิตจริง อาจจะหยุดการทดสอบเมื่อแรงและระยะโก่งไปถึงค่าที่ต้องการ



Dimensions in millimeters

Key

F force

1 elevation

2 weld

3 bearer

NOTE 1 R: 25 mm to 70 mm.

NOTE 2 Loading rate (40 to 120) kN/s.

รูปที่ ง-1 การทดสอบการดัดงอ



ตารางที่ ง-1 ค่าทดสอบการดัดงอ

Rail Profile	Minimum bend test deflection (mm)		Minimum bend test force (kN) for approval and production	
	R220, R260 and R260Mn grade	R350HT grade	R220 grade	R260, R260Mn and R350HT grade
60E1	20	20	1,500	1,600
60E2				
56E1			1,230	1,330
55E1			1,200	1,300
54E1	25	22	1,230	1,330
54E2			1,170	1,270
54E3			1,080	1,180
52E1			1,100	1,200
50E6			1,070	1,170
50E3			1,060	1,160
49E1	30	25	950	1,050
46E1			910	1,010
46E2			930	1,030



ภาคผนวก จ

การทดสอบความแข็งบริเวณ HAZ

ชิ้นงานเชื่อม 2 ชิ้นผ่ากลาง (Cross Section) ตามความยาวรางของบริเวณหัวราง ห่างจากแนวเชื่อมด้านละ 100 mm และทำการวัดความแข็งจากแนวเชื่อมผ่าน HAZ (Heat Affected Zone) ไปที่เนื้อโลหะเดิม โดยใช้หน่วย Vickers โดยมีรายละเอียด

1) HV 30
2) ทำการวัดความแข็ง โดยบริเวณล่างผิวประมาณ 3-5 mm โดยเว้นระยะแต่ละจุด 2 mm
3) วัดค่าความแข็ง โดยเริ่มตั้งแต่แนวเชื่อมแล้วออกไปทั้ง 2 ข้างซ้ายขวา อย่างน้อยต้องเข้าไปสู่เนื้อโลหะเดิมที่ไม่มีผลกระทบจากความร้อน 20 mm
4) ทำการบันทึกผลในรูปตัวเลข



ภาคผนวก ฉ

การทดสอบความล้า

ให้เป็นไปตามมาตรฐาน EN 14587-1 และ EN 14730-1

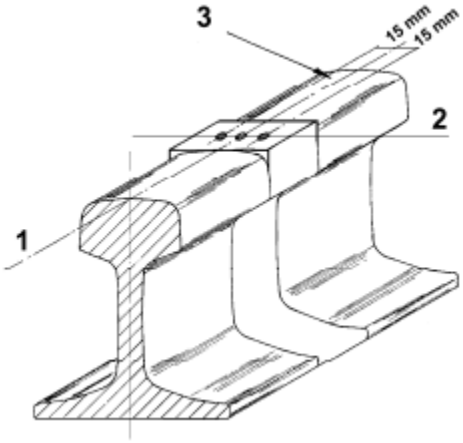
ภาคผนวก ช

วิธีการวัดความแข็งของบริเวณผิวรางเชื่อม

การทดสอบความแข็ง Brinellโดยใช้

หัวกดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm ชนิดทังสเตนคาร์ไบด์
น้ำหนักกด 3,000 kg
เวลากด 15 วินาที

โดยด้านบนของแนวเชื่อมต้องเจียรให้เรียบก่อนทำการทดสอบ



Key

1 Rail crown center line

2 Weld transverse center line

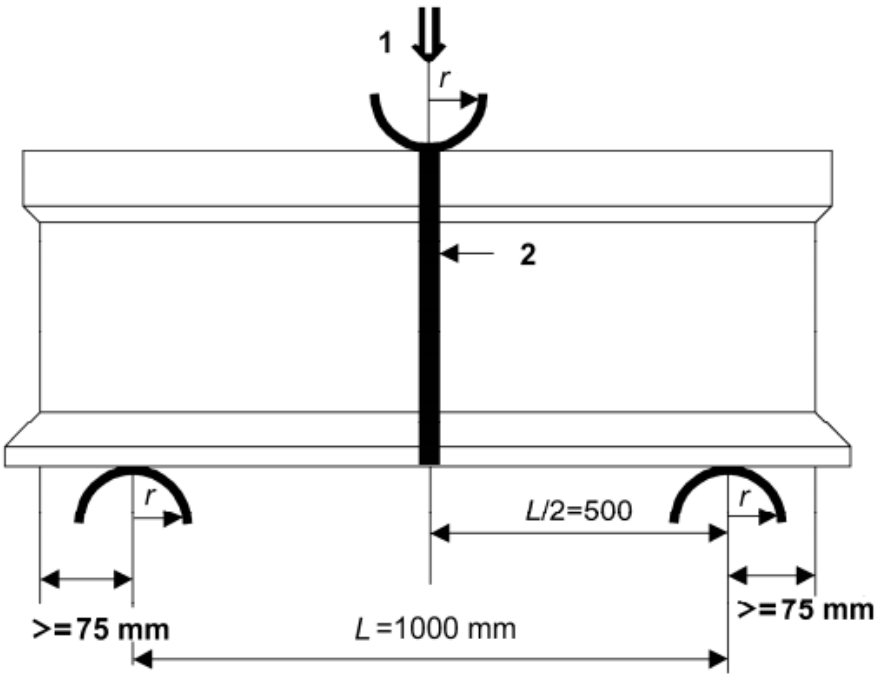
3 Rail running surface

รูปที่ ช-1 ตำแหน่งผิวที่ทดสอบความแข็ง

ภาคผนวก ซ

การทดสอบการดัดงอของ Thermite Welding

แสดงวิธีการทดสอบการดัดงอตาม**ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง**



- Key
- Load
- Weld
- 25 mm $\leq$ r $\leq$ 70 mm
- Minimum sample length = 1,150 mm
- Loading rate $\leq$ 60 kN/s.
- โดยให้แรงกระทำไปจนเกิดการหัก

รูปที่ ซ-1 การทดสอบการดัดงอของรอยเชื่อมราง



ภาคผนวก ฌ

(ร่าง) ใบประกาศนียบัตรผ่านการฝึกอบรม

Diploma in Aluminothermic Welding of Rails

In hereby awarded to

Name_____**Firstname**_____**Date of Birth**_____

Date_____**Diploma No**_____

Process Supplier	Skill Modules Passed	Extra Skills Passed Cutting Methods

Training establishment_____Signed_____

Name_____



ภาคผนวก ญ

(ร่าง) ใบอนุญาตให้เชื่อม

PERMIT to WELD

Employer_____Certificate No_____

Welder's Full Name_____SampleNo_____Photo

ISSUE DATE_____EXPIRY DATE _____

Is permitted access to the Railway Infrastructure

for the purposes of Aluminothermic Welding on line categories:

Approved for processes:_____

Process Supplier_____

Processes_____

Rail cutting methods:_____

The above mentioned person has been deemed qualified and competent in the following additional area:

Issuing Railway AuthoritySigned_____Printed Name_____

Surrender Conditions

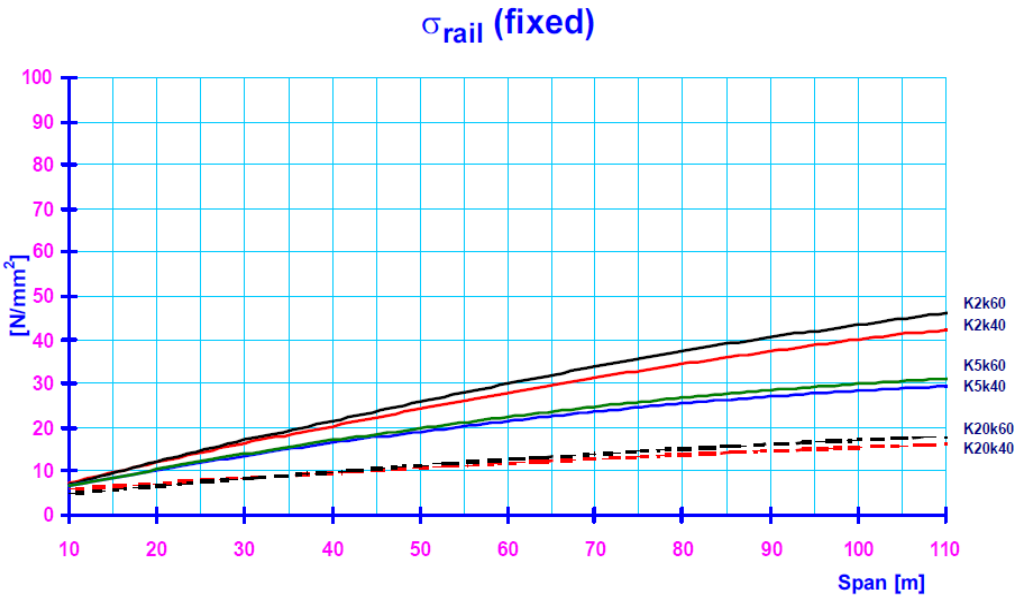
The following conditions will require the employer to surrender the Permit to Weld to the Railway Authority

Change of EmployerTermination of Welding ActivityDemand by Railway Authority

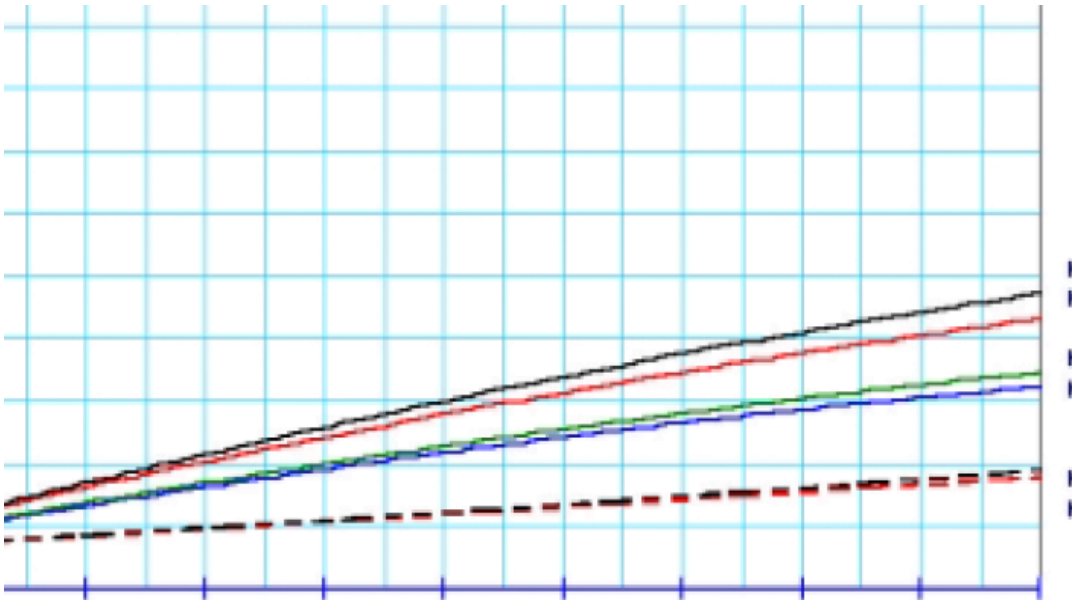
ภาคผนวก ฎ

Diagrams of interaction effects due to barking and temperature variations for simply-supported, single-track decks with a fixed support at one end

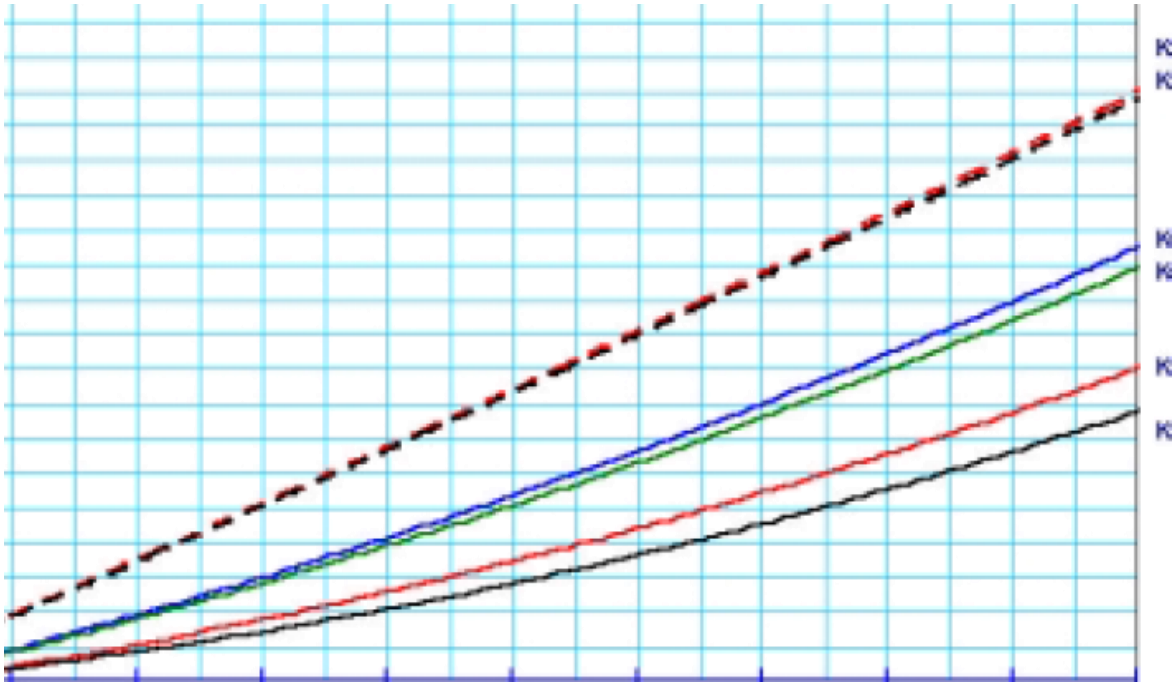
A.1 - Continuous welded rails



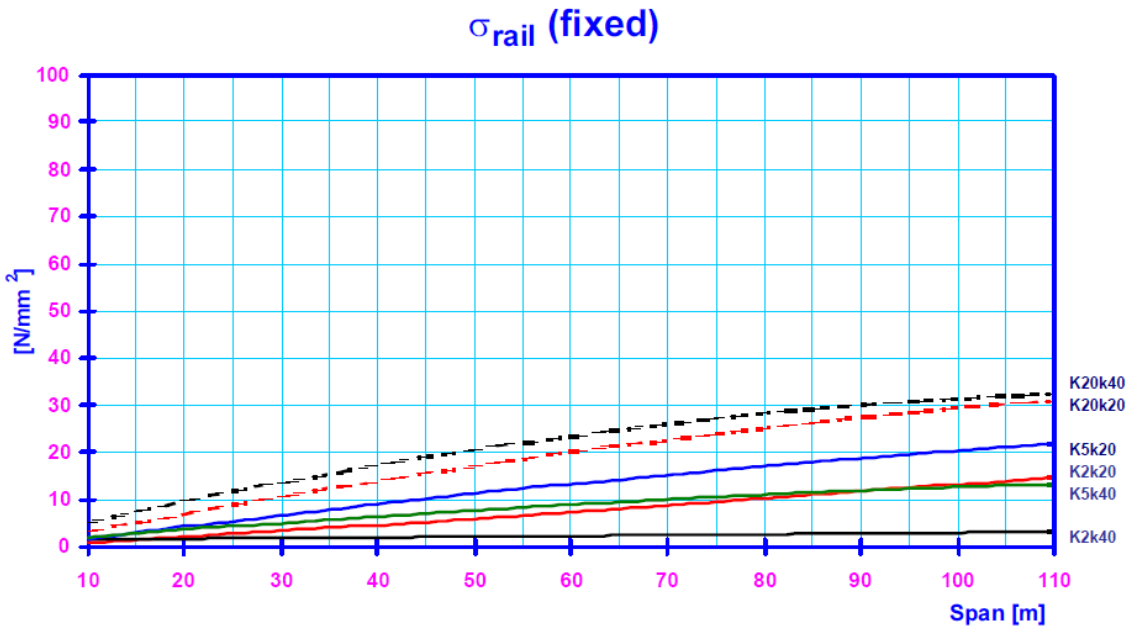
รูปที่ ฎ-1 Braking load-case (fixed support) (20 กิโลนิวตัน/เมตร)



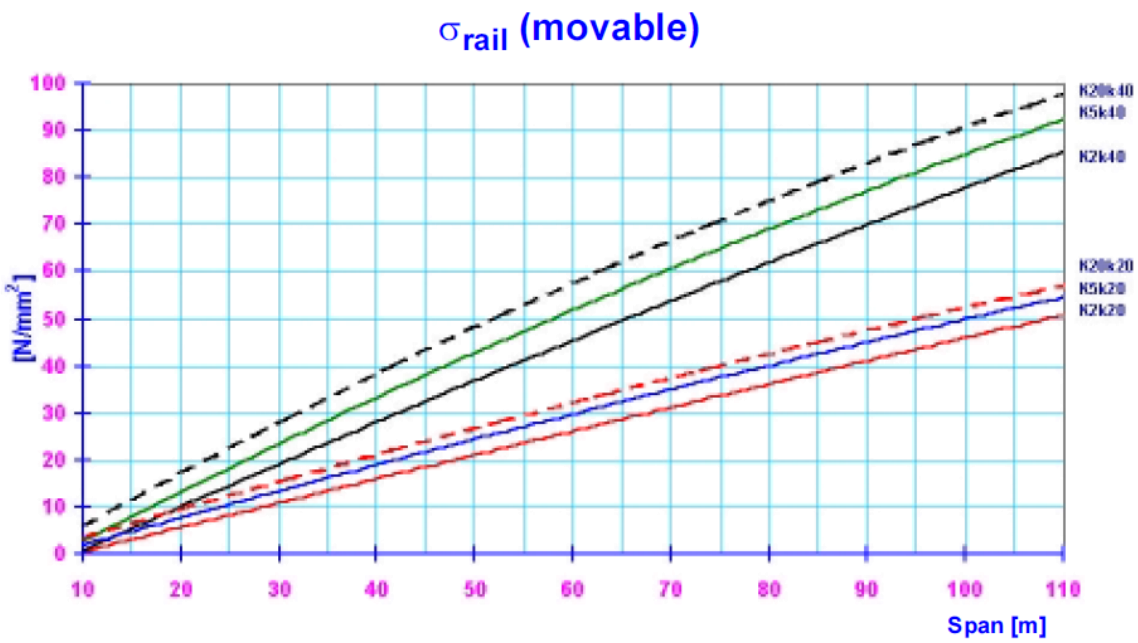
รูปที่ ฎ-2 Braking load-case (movable support) (20 กิโลนิวตัน/เมตร)



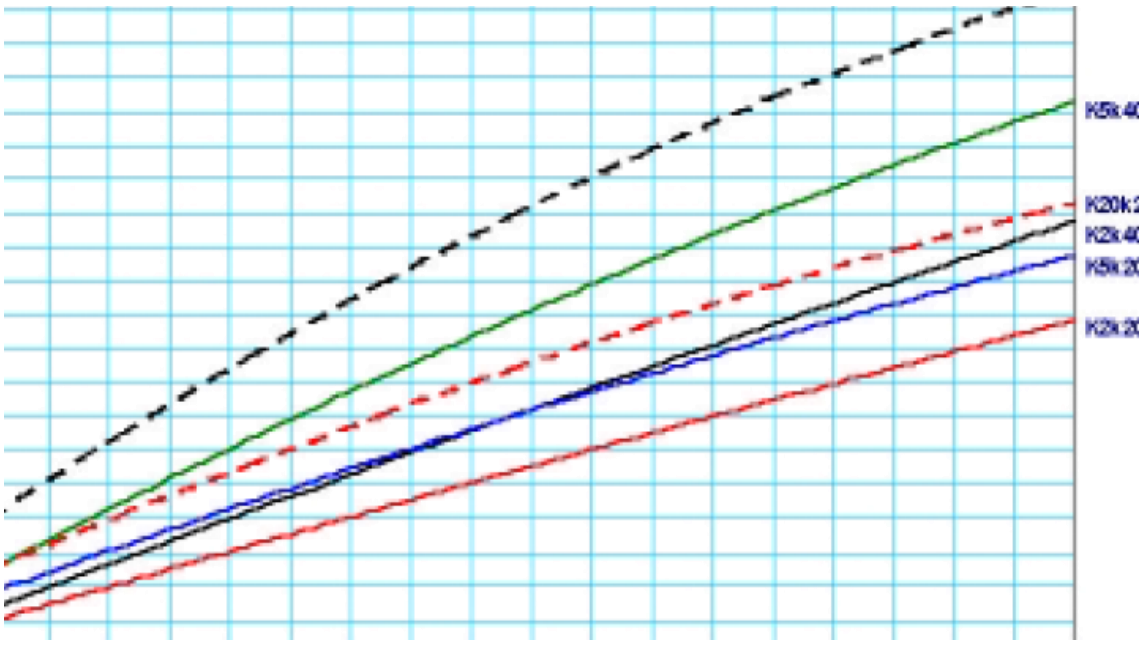
รูปที่ ฎ-3 Braking load-case (20 กิโลนิวตัน/เมตร) (support reaction)



รูปที่ ฎ-4 Temperature-variation load-case ($\Delta T_{deck} = 35$องศาเซลเซียส) (fixed support)

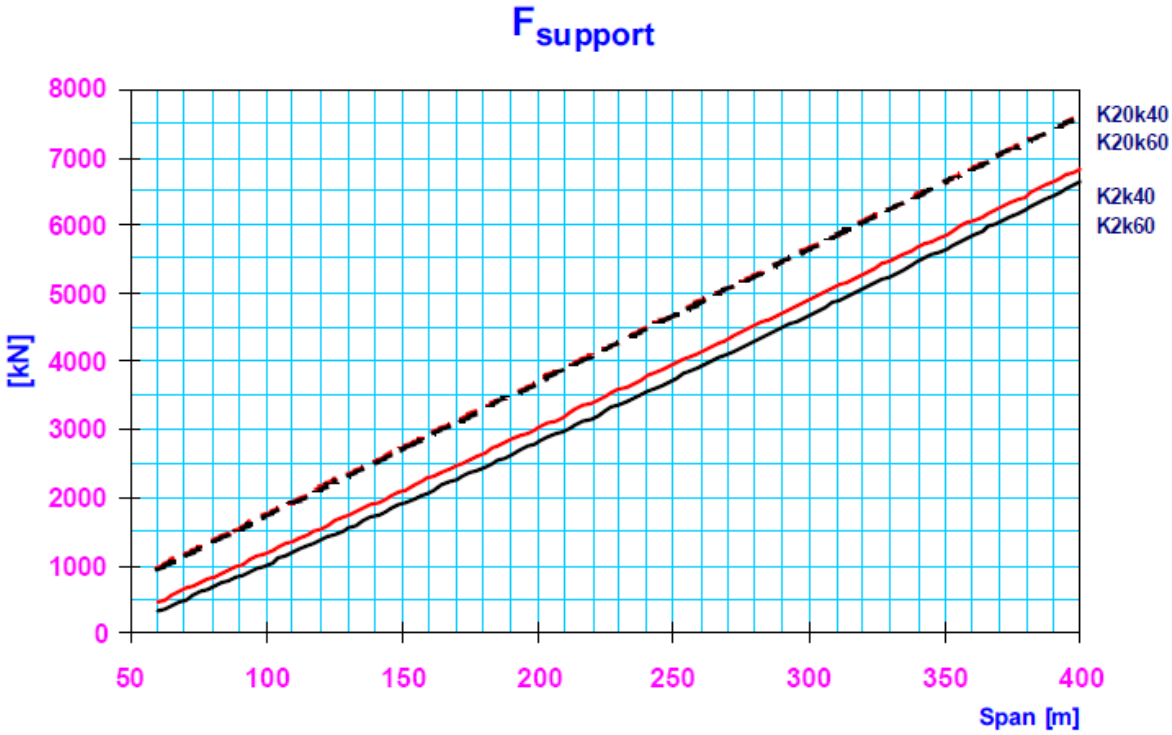


รูปที่ ฎ-5 Temperature-variation load-case ($\Delta T_{deck} = 35$องศาเซลเซียส) (movable support)

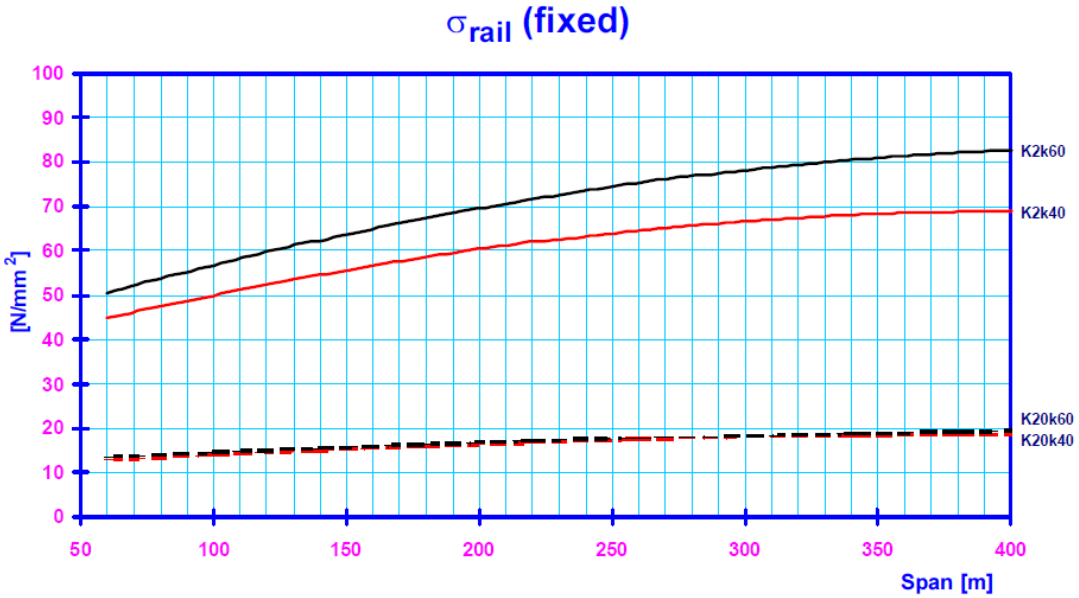


รูปที่ ฎ-6 Temperature-variation load-case ($\Delta T_{deck} = 35$องศาเซลเซียส) (support reaction)

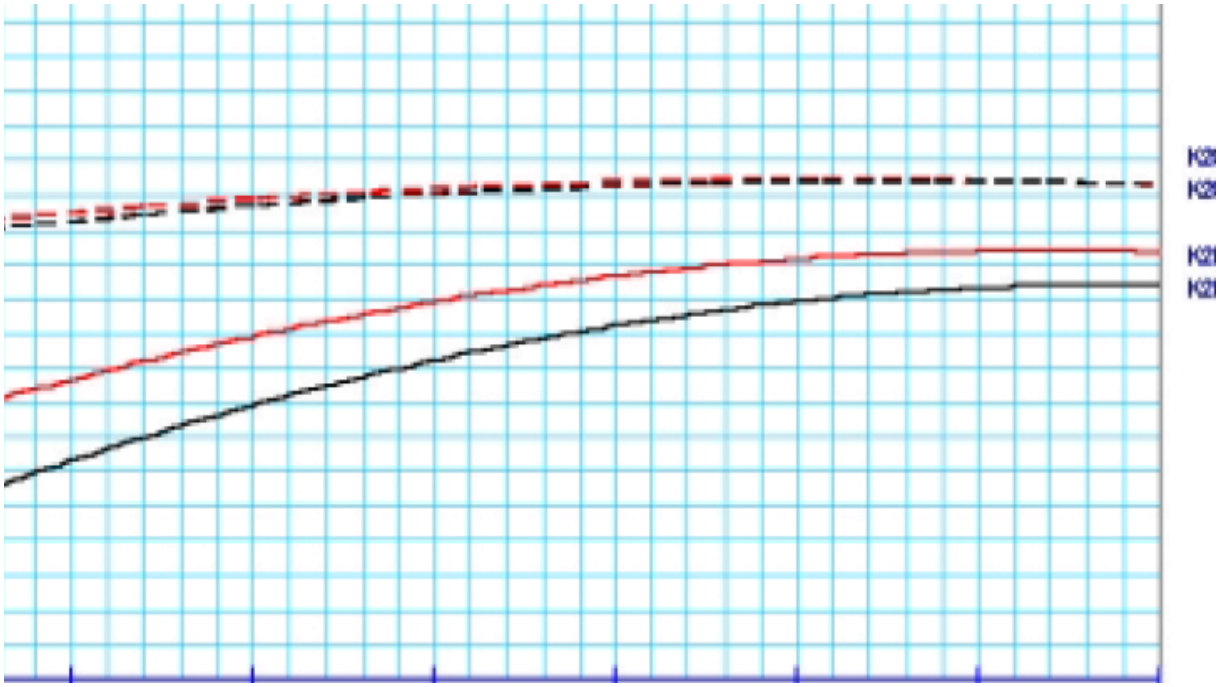
A.2 - With an expansion device



รูปที่ ฎ-7 Braking load-case (20 กิโลนิวตัน/เมตร) (reaction of the fixed support)



รูปที่ ฎ-8 Braking load-case (20 กิโลนิวตัน/เมตร) (fixed support)



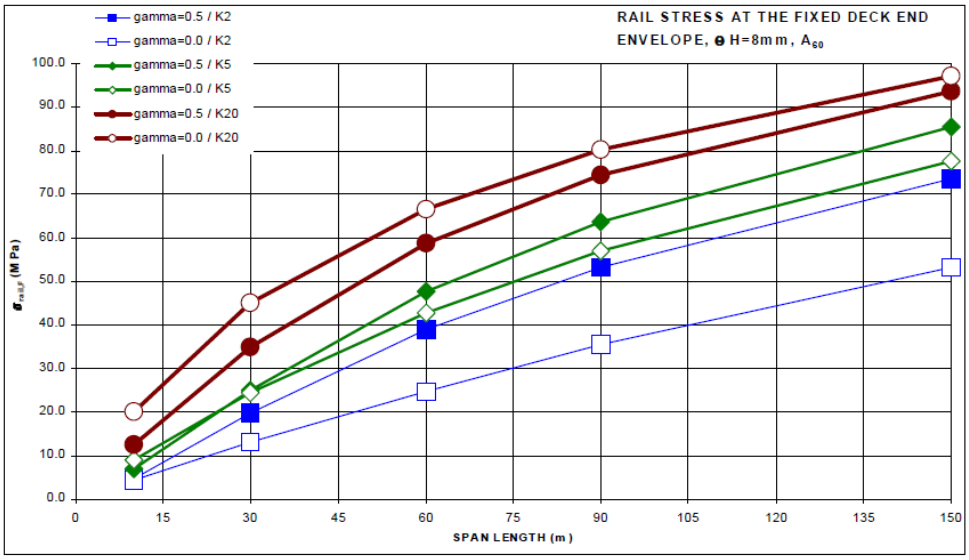
รูปที่ 2ฎ-9 Temperature-variation load-case

($\Delta T_{deck} = 35$องศาเซลเซียส ; $\Delta T_{rail} = 50$องศาเซลเซียส)

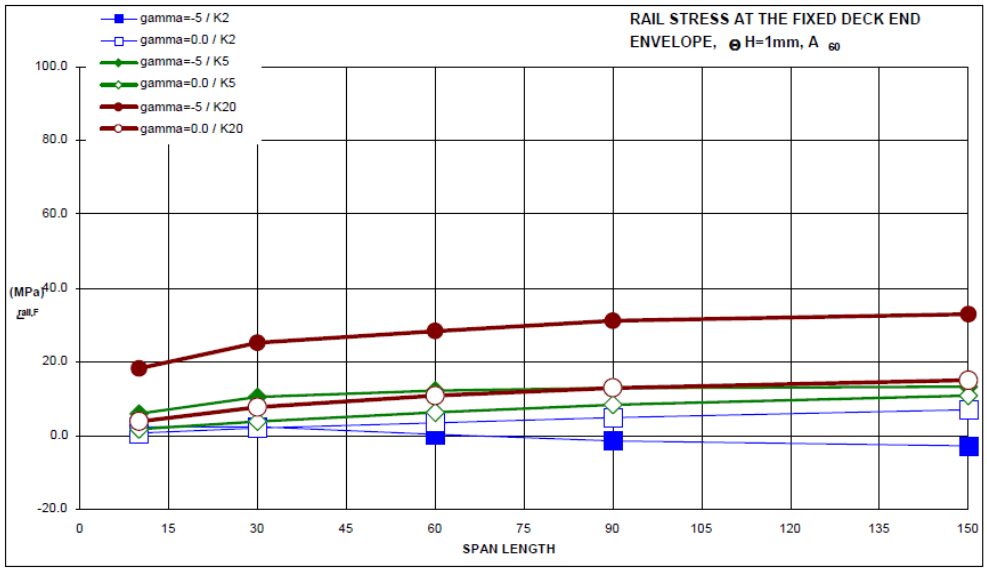
ภาคผนวก ฎ

Diagrams of interaction effects under vertical bending

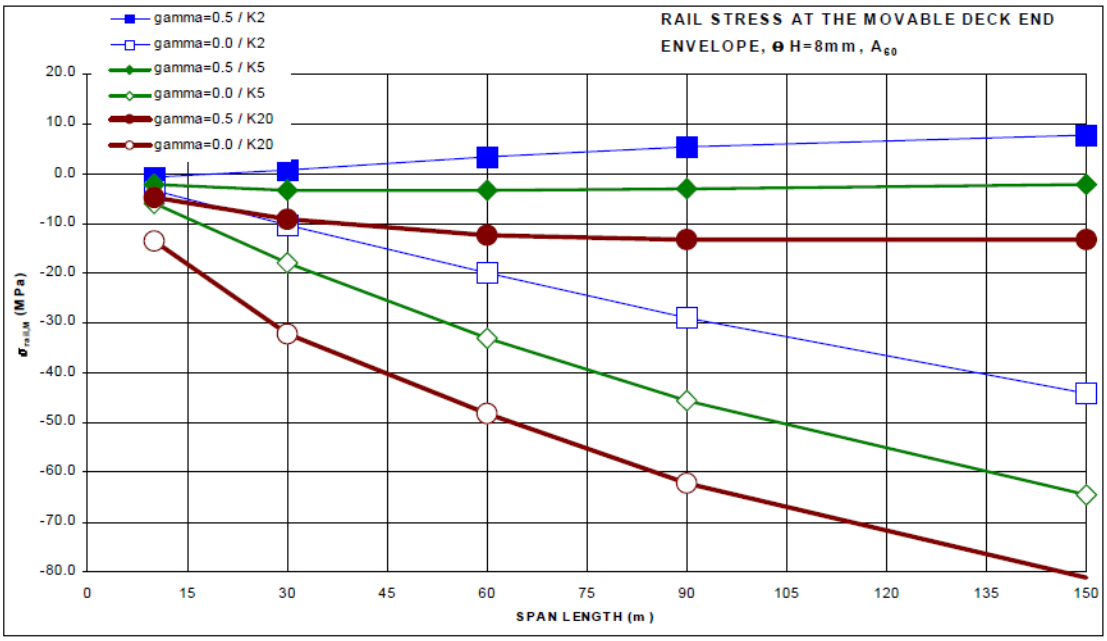
B.1 - Deck bridge - σ_{rail} (fixed)



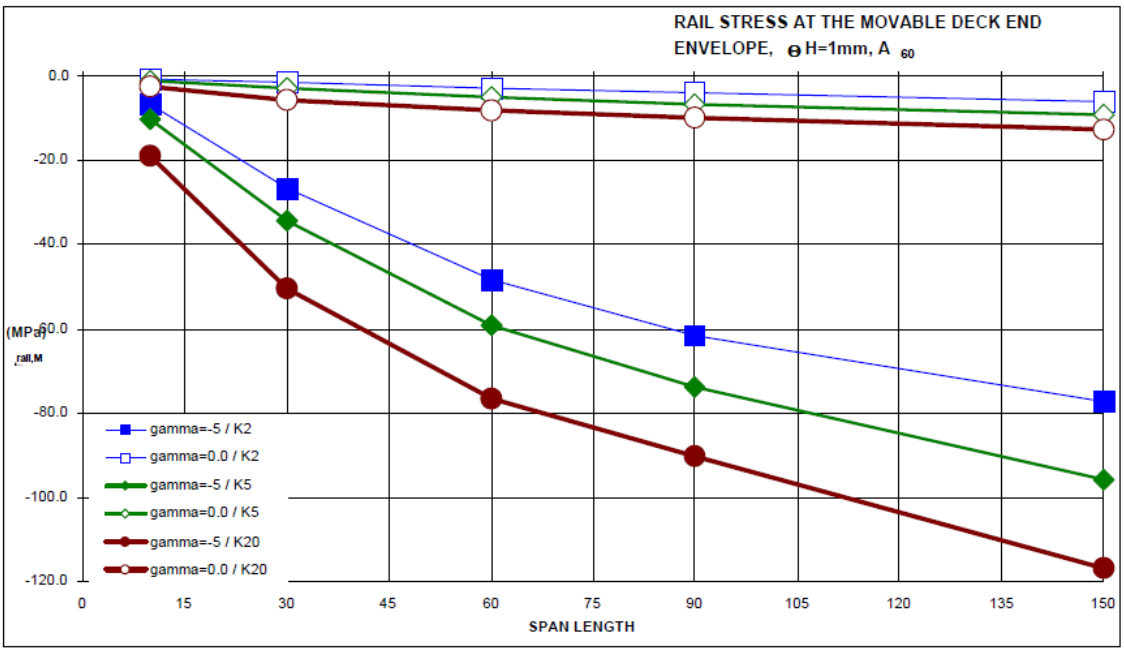
B.2 - Through girder bridge - σ_{rail} (fixed)



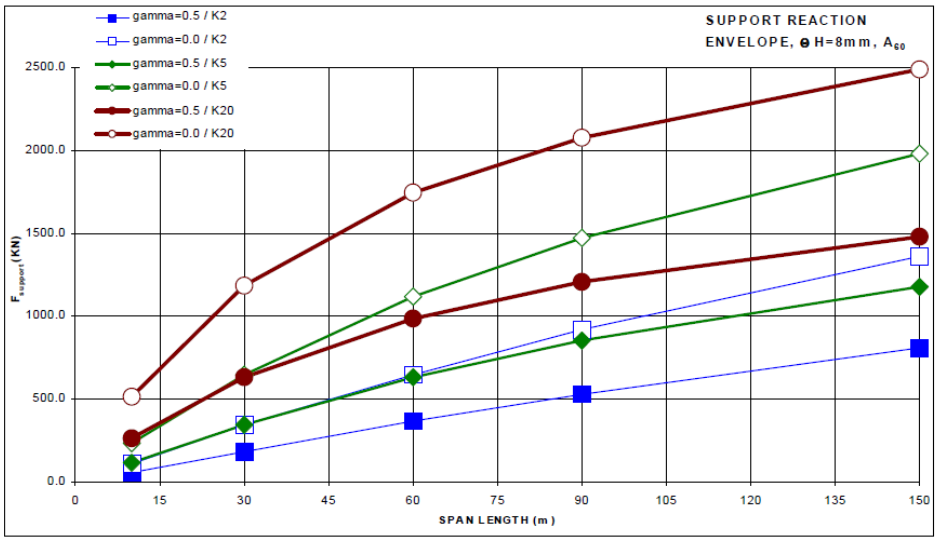
B.3 - Deck bridge - σ_{rail} (movable)



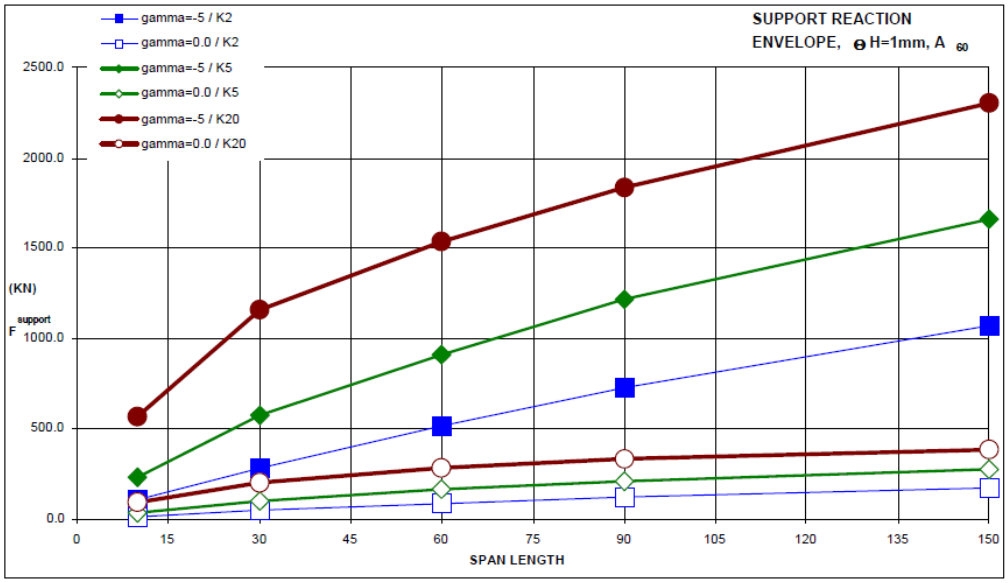
B.4 - Through girder bridge - σ_{rail} (movable)



B.5 - Deck bridge - $F_{support}$



B.6 - Through girder bridge - $F_{support}$



กลุ่มที่ปรึกษาโครงการ







สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.)

35 ถนนเพชรบุรี แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400

โทรศัพท์ 02-2151515 โทรสาร 02-2155500