

**การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก
(Falling Weight Deflectometer, FWD)
สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)**

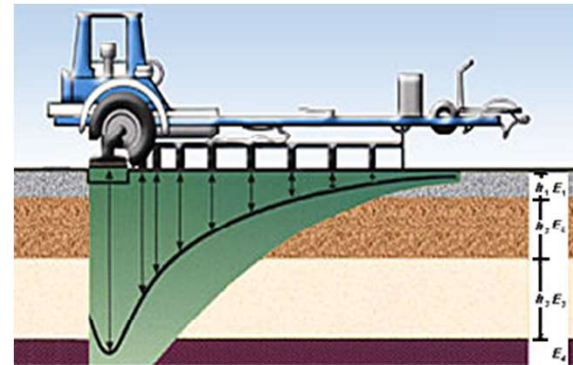
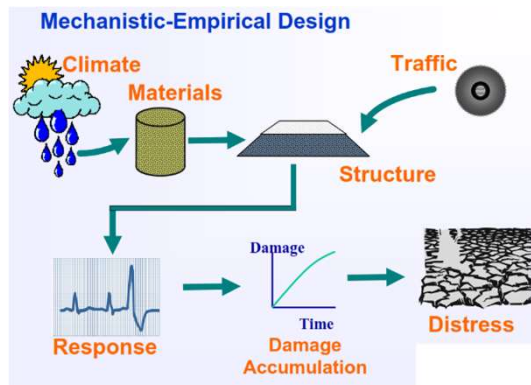


การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตัมน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

วิธีการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย

1. Empirical Method

2. วิธีเชิงกล (Mechanistic Design) ประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างทางด้วยตัมกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD)



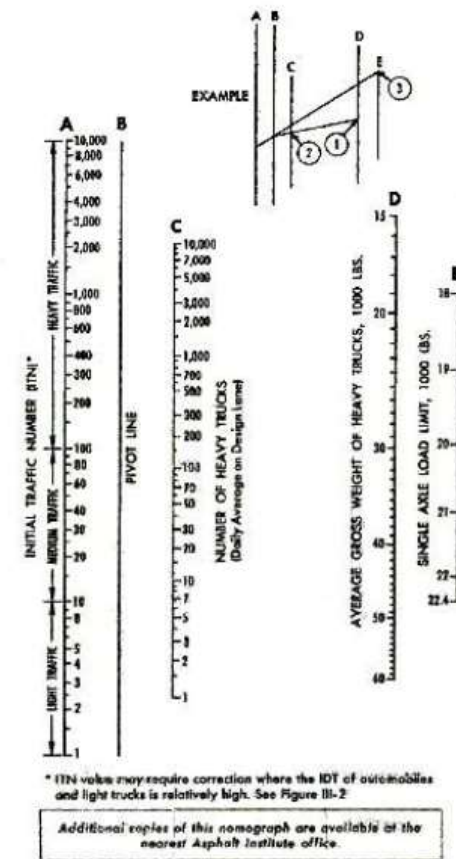
การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

วิธีการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย

วิธีที่นิยมในอดีตจนถึงปัจจุบัน

1. Empirical Method

เป็นวิธีการออกแบบที่อาศัยประสบการณ์ในการใช้งานจริงประกอบกับข้อมูลเชิงสถิติจากการทำแปลงทดสอบมาจัดรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ขึ้นเป็นสมการที่ประกอบด้วยตัวแปรต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างของถนนลาดยาง



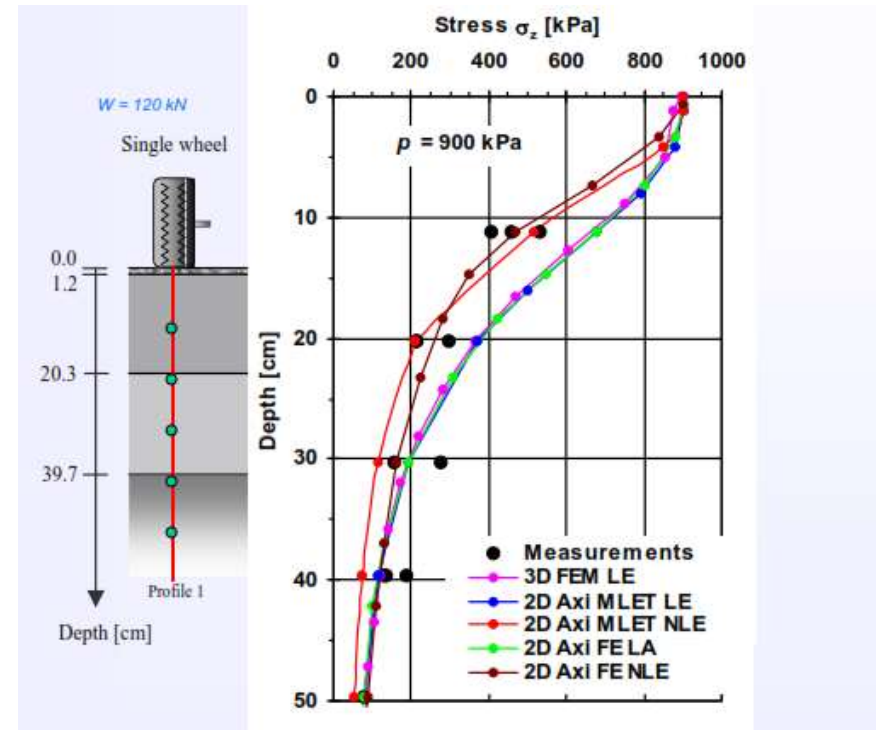
การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตัมน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

วิธีการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย

วิธีเรืมนำมาประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน

2. วิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

เป็นการออกแบบที่อาศัยการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างถนนเมื่อถูกแรงกระทำในรูปของการโก่งตัว แอ่นตัว ความเค้น และความเครียด ณ ส่วนต่างๆ ของโครงสร้างทาง และนำค่าเหล่านี้มาประเมินหาอายุการใช้งานของโครงสร้างทางอันเนื่องมาจากการเสียหาย (Failures) ในรูปแบบต่างๆ เช่น การแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue crack) และ การเกิดร่องล้อ (Rutting)



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

Empirical Method

ข้อดี

- ออกแบบได้ง่ายและรวดเร็ว
- ไม่จำเป็นต้องมีพื้นฐานด้านกลศาสตร์ของวัสดุมากนัก

ข้อเสีย

- ความสัมพันธ์ของกราฟออกแบบความหนาโครงสร้างทางไม่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมในประเทศไทย
- ไม่สามารถออกแบบซ่อมบำรุงโครงสร้างทางได้โดยตรง เนื่องจากไม่สามารถหาค่าคุณสมบัติของโครงสร้างทางเดิมได้



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

วิธีเชิงกล (Mechanistic Design Method)

ข้อดี

- ออกแบบให้สอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุในประเทศไทย
- ออกแบบให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกและรูปแบบจราจรในประเทศไทย
- นำมาประยุกต์ใช้กับออกแบบเพื่อซ่อมบำรุง/บูรณะโครงสร้างทางโดยคำนึงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างทางเดิม
- มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เนื่องจากการออกแบบมีความสอดคล้องกับปริมาณจราจร น้ำหนักบรรทุก คุณสมบัติของวัสดุ และสภาพแวดล้อม

ข้อเสีย

- ต้องการข้อมูลเชิงลึกของคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบและก่อสร้าง
- ต้องใช้ความรู้ความชำนาญด้านกลศาสตร์ของวัสดุ และการวิเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์ของโครงสร้างทาง

การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

เปรียบเทียบข้อมูลสำหรับการออกแบบถนน

Empirical Method

- เรขาคณิตของถนน
- ปริมาณจราจร
- น้ำหนักบรรทุก
- คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทาง

Mechanistic Design Method

- เรขาคณิตของถนน
- ปริมาณจราจร
- น้ำหนักบรรทุก
- คุณสมบัติของเชิงลึกวัสดุโครงสร้างทาง
- ข้อมูลผลการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างทางเดิมจากเครื่อง FWD กรณีออกแบบเพื่อซ่อมบำรุง
- แบบจำลองการทำนายอายุถนนที่เหมาะสมสำหรับสภาพแวดล้อมในประเทศไทย
- แบบจำลองการวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างทางภายใต้น้ำหนักบรรทุก

การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

เครื่องทดสอบการแอ่นตัวของถนนด้วยน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD)

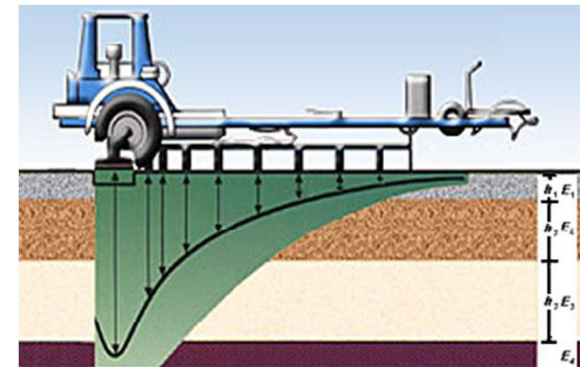
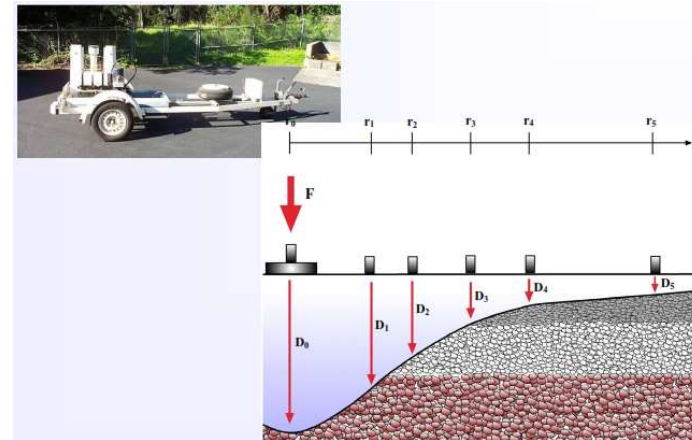
เครื่องทดสอบหาค่าการอ่อนตัว หรือ ค่าการยุบตัวของโครงสร้างพื้นทางแบบหยุ่นตัว (Flexible Pavement) โดยเฉพาะผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต การทดสอบสามารถทำได้โดยปล่อยน้ำหนักกระแทกบนผิวทาง และทำการตรวจวัดการเปลี่ยนรูปของผิวทางที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายใต้น้ำหนักกระแทก



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

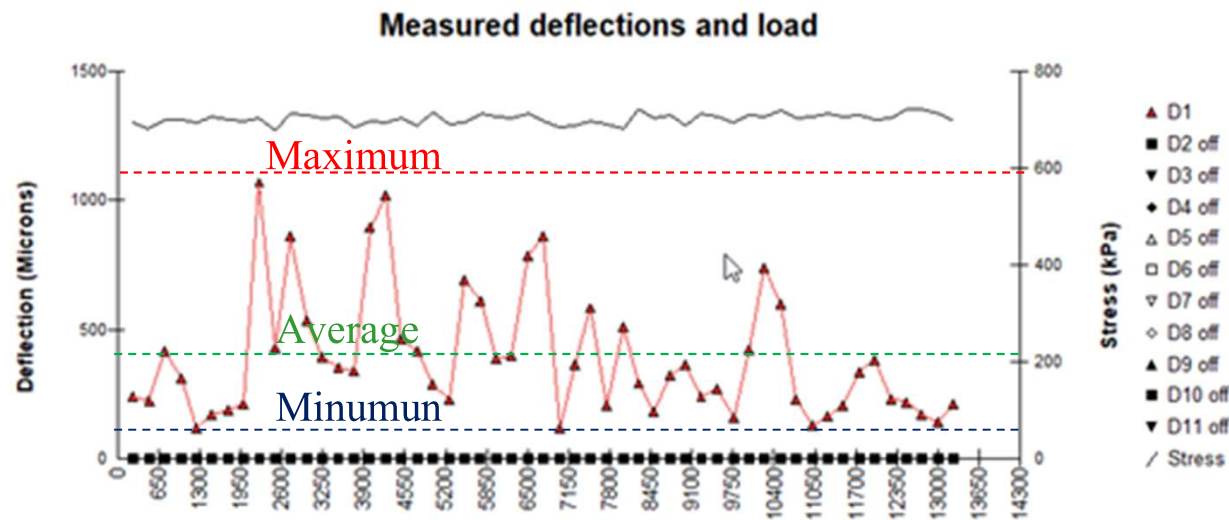
ส่วนประกอบสำคัญของเครื่อง FWD รถลากเครื่องมือและเครื่อง FWD

- ชุดน้ำหนักทดสอบ
- ชุดไฮดรอลิกยกน้ำหนัก
- ชุดแผ่น Plate รองรับน้ำหนัก
- ชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดน้ำหนักและความเค้น
- ชุดคันทดสอบการแอ่นตัว



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตัมน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ผลการทดสอบแสดงถึงและค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างที่เซนเซอร์ตำแหน่งต่างๆ ทุกระยะ 250 ม.
- การแอ่นตัวที่ศูนย์กลางของแรงกระแทก (เซนเซอร์ D1) นิยมนำมาประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างทางเบื้องต้น



จำนวนจุดทดสอบ	ค่าการแอ่นตัวสูงสุด (Micrometer)	ค่าการแอ่นตัวต่ำสุด (Micrometer)	ค่าเฉลี่ย (Micrometer)
54	1,068.60	116.80	387.52

การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

ข้อดีของการออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ออกแบบผิวทางใหม่ (ใช้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุงานทางจากห้องปฏิบัติการ)
- ออกแบบซ่อมบำรุง/บูรณะผิวทางเดิม โดยออกแบบให้ชั้นวัสดุโครงสร้างทางและผิวทางสามารถต้านทานหน่วยแรงภายนอกจากน้ำหนักบรรทุก และน้ำหนักกระทำซ้ำจากปริมาณจราจร และยังคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุเนื่องจากความล้า และสภาพแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น (ใช้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุงานทางจากเครื่อง FWD)



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

ข้อดีของการออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- คุณสมบัติด้านกลศาสตร์ที่แท้จริงของวัสดุ ที่ใช้ในการก่อสร้างถนน
- คุณลักษณะของการจราจร
- น้ำหนักบรรทุก
- สภาพแวดล้อมการใช้งานของถนน



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

ข้อมูลสำหรับการออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างทาง ประกอบด้วย

- คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต
- คุณสมบัติของมวลรวม หิน ทราย ดิน และยางมะตอย ที่จะใช้ในการก่อสร้าง และ
- คุณสมบัติของชั้นดินบริเวณสถานที่ก่อสร้าง



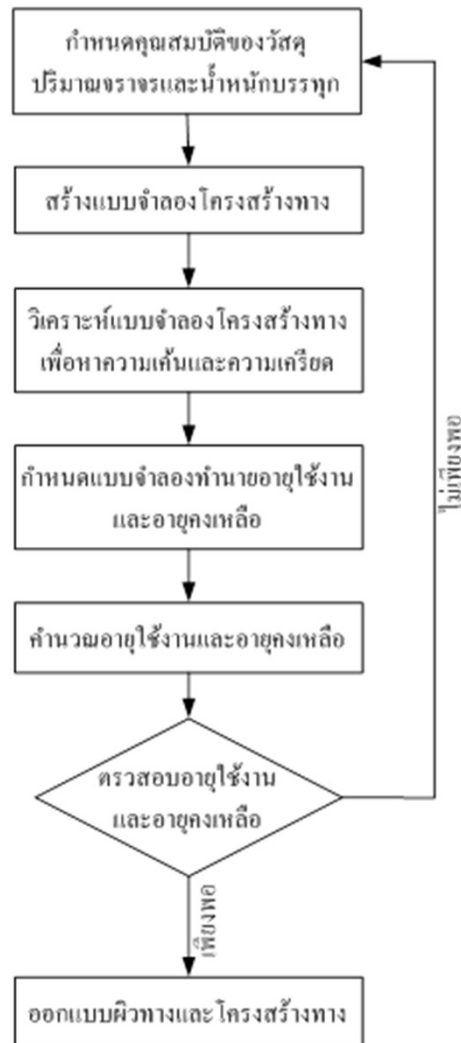
การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

ข้อมูลสำหรับการออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- คุณลักษณะของการจราจร ประกอบด้วย
 - ปริมาณจราจรและการจำแนกประเภทรถ
 - ปริมาณรถบรรทุก ประเภทรถบรรทุก น้ำหนักบรรทุก และน้ำหนักบรรทุกคงเพลาและ
 - คุณลักษณะของล้อรถ และแรงดันลมของรถบรรทุก
- สภาพแวดล้อมของถนน ประกอบด้วย
 - อุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดปีและ
 - ปริมาณน้ำฝน

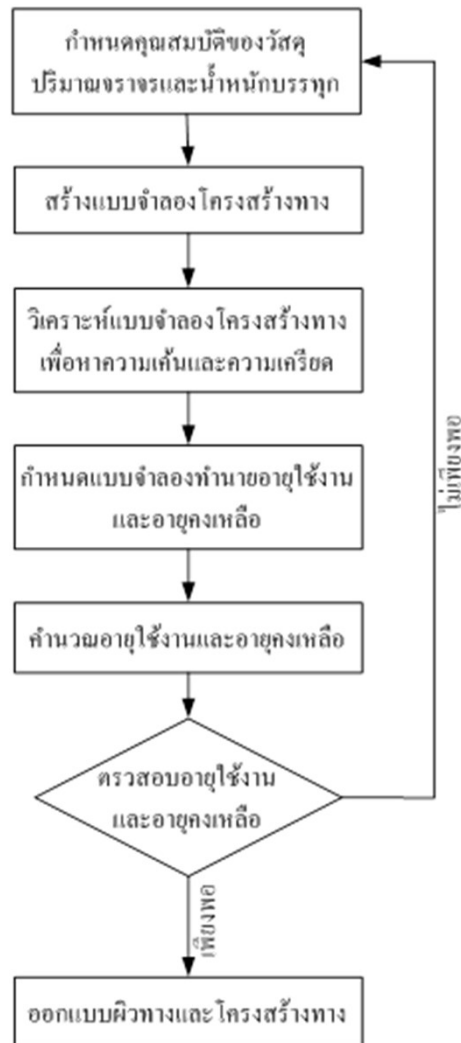


การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยต้อน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)



- ศึกษาและกำหนดคุณสมบัติของวัสดุผิวทางและโครงสร้างทางจากแหล่งวัสดุ หรือกำหนดจากข้อมูลโครงสร้างทางเดิมจากผลสำรวจด้วยเครื่อง FWD
- กำหนดให้มีน้ำหนักมากระทำต่อโครงสร้างทาง และวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อศึกษาผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นทาง ได้แก่ ค่าความเค้นและความเครียด ณ ตำแหน่งวิกฤติ ที่ส่งผลต่ออายุของโครงสร้างทาง
- สร้างแบบจำลองชั้นโครงสร้าง ที่ประกอบด้วย ความหนาของชั้นวัสดุแต่ละชั้น และคุณสมบัติของวัสดุ เช่น อิลาสติกโมดูลัส อัตราส่วนปัวซอง ฯลฯ เป็นต้น
- วิเคราะห์ผลการตอบสนองของชั้นวัสดุเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก ได้แก่ ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และการเสียรูปภายใต้น้ำหนักบรรทุก

การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตู่มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)



- คาคณะสมรรถนะของถนน เช่น รอยแตกร้าว ร่องล้อ และการแอ่นตัว ฯลฯ เป็นต้น ที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณรถบรรทุกและปริมาณจราจร ภายใต้อายุออกแบบของผิวทางที่กำหนดไว้ จากแบบจำลองทำนายอายุการใช้งาน เช่น กำหนดให้มีอายุใช้งาน 10 ปี เกิดร่องล้อไม่เกิน 20 มิลลิเมตร และมีปริมาณรอยแตกร้าวไม่เกินร้อยละ 5 ฯลฯ เป็นต้น
- ตรวจสอบอายุใช้งานและอายุคงเหลือ หากปริมาณจราจรที่รองรับได้ มีค่าน้อยกว่าปริมาณจราจรที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ต้องทำการออกแบบใหม่ โดยเพิ่มความหนาของชั้นทาง หรือเปลี่ยนมาใช้วัสดุทางที่แข็งแรงกว่า
- ออกแบบผิวทางและโครงสร้างทางให้สอดคล้องกับปริมาณปริมาณจราจร อายุของผิวทาง และวัสดุงานทาง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

- แอสฟัลต์คอนกรีต
 - แอสฟัลต์คอนกรีต เป็นวัสดุแบบสารยืดหยุ่น (Visco-elastic Material) ที่มีคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงและการเสียรูป เปลี่ยนแปลงตามเวลา อุณหภูมิ สถานะความเค้น (Stress State) และอัตราการเกิดความเครียด (Strain Rate) อาจจำลองแอสฟัลต์คอนกรีตให้มีคุณสมบัติเป็นแบบวัสดุยืดหยุ่น (Elastic Material)
 - ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของแอสฟัลต์คอนกรีต ให้มีคุณสมบัติตามสภาวะความเสียหาย ขนาดผละของวัสดุ และอุณหภูมิ โดยกำหนดให้ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) มีค่าคงที่ โมดูลัสอยู่ในช่วงระหว่าง 2,500 MPa ถึง 13,500 MPa

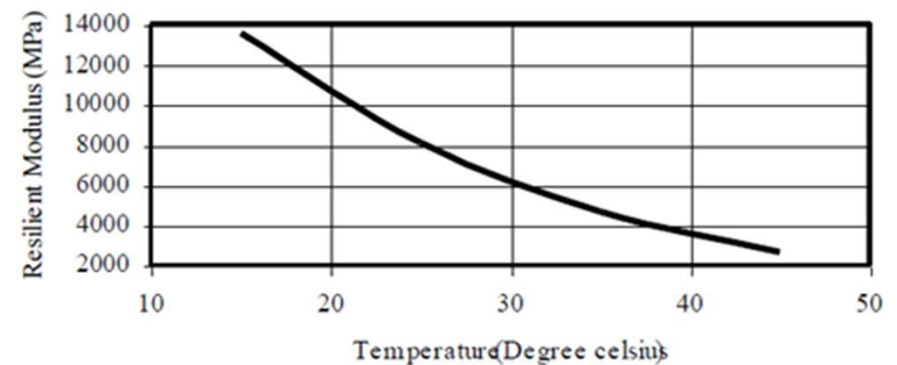


การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตัมน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

- คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ (ต่อ)
- แอสฟัลต์คอนกรีต (ต่อ)

Material grading	Depth from surface (mm)	Stiffness values (MPa) based on temperature and material condition					
		Good condition or new material		Stiff, dry mixture		Very cracked condition	
		20° C	40° C	20° C	40° C	20° C	40° C
Values suggested by Freeme (11) in 1983							
Gap-graded	0 - 50	4000	1500	5000	1800	1000	500
	50 - 150	6000	3500	7000	4000	1000	500
	150 - 250	7000	5500	8000	6000	1000	500
Continuously graded	0 - 50	6000	2200	7000	4000	750	500
	50 - 150	8000	5500	9000	6000	1000	750
	150 - 250	9000	7500	10000	8000	1000	750



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยต้อน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

- วัสดุพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์
 - สำหรับค่าโมดูลัสของดินซีเมนต์ ที่สัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1993) ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ ระหว่างค่าโมดูลัสของดินซีเมนต์ (Elastic Modulus of Cement Material, E_{cm}) กับค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

$$UCS = 4.46 \left[\frac{E_{cm}}{10,000} \right]^2 ; \text{หน่วย MPa}$$



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

- คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ (ต่อ)
- วัสดุพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (ต่อ)
 - ทั้งนี้ Queensland Main Road (1982) อธิบายสมการความสัมพันธ์ ระหว่างค่า โมดูลัสของดินซีเมนต์ (E_{cm}) กับค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) ของหินคลุก (Crushed Rock) กับกรวด (Gravel) ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ซึ่งมีค่าแตกต่างกัน

$$E_{cm} = 1814[UCS]^{0.88} + 3500 ; \text{หน่วย MPa}$$

$$E_{cm} = 2240[UCS]^{0.88} + 3500 ; \text{หน่วย MPa}$$



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

➤ วัสดุรวมสำหรับพื้นทาง

- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม (วัสดุเม็ดหยาบ) หาได้ โดยการทดสอบจากเครื่องมือหากล้างอัดสามแกนแบบสลับทิศ (AASHTO T307) ส่วนค่าโมดูลัสดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, MR จะขึ้นอยู่กับระดับความเค้น และอยู่ในรูปสมการในแบบจำลองกำลังของวัสดุ ที่แปรผันกับความแกร่ง (Stress-dependent Stiffness Model)

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{k_3}$$

โดยที่ M_r = ค่าโมดูลัสคืนตัว

P_a = ความดันชั้นบรรยากาศ

k_1, k_2 และ k_3 = สัมประสิทธิ์จากห้องปฏิบัติการ

τ_{oct} = ความเค้นเฉือนออกตะฮีดรัล (Octahedral Shear Stress)



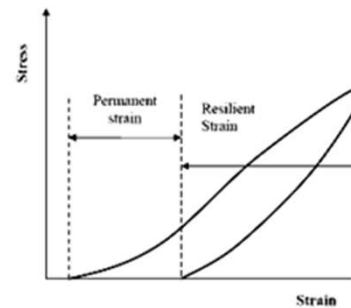
การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

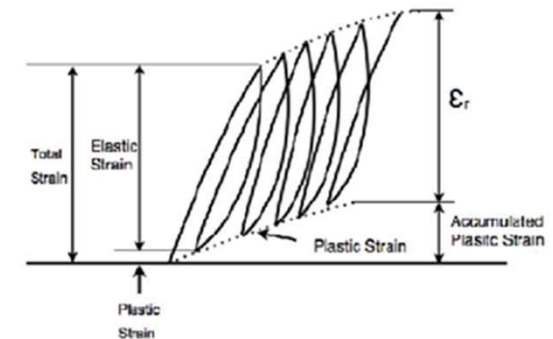
- วัสดุรวมสำหรับพื้นทาง (ต่อ)
- นอกจากนี้ AUSTROADS (1992) ได้นำเสนอค่าอัตราดักพารามิเตอร์ของวัสดุรวมที่ใช้ในงานทางของประเทศออสเตรเลีย โดยแบ่งตามคุณภาพของวัสดุ และพลังงานการบดอัด

Property	High Quality Crushed Rock		Base Quality Crushed Rock		Sub-Base Gravel	
	Over Granular Material	Over Stiff Cemented Material	Over Granular Material	Over Stiff Cemented Material	Over Granular Material	Over Stiff Cemented Material
Range of E (MPa)	150 – 550	200 – 700	150 – 500	200 – 500	150 – 400	150 – 450
Typical E (MPa)	500* 350	500* 350	400* 300	400* 300	300* 250	300* 250
Range of ν	0.25 – 0.40	0.25 – 0.40	0.25 – 0.40	0.25 – 0.40	0.25 – 0.40	0.25 – 0.40
Typical ν	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

* Where material is compacted using Modified Compaction, other value for Standard Compaction.



ก) 1 รอบการให้แรง (Kancherika 2004)



ข) การให้แรงแบบสลับทิศ (Huang 2004)



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

- กรมทางหลวง (2545) ได้สรุปค่าอิลาสติกโมดูลัสทั่วไป ของวัสดุงานทางในประเทศไทย โดยแบ่งตามวัสดุที่ใช้ก่อสร้างผิวทาง ได้แก่ ชั้นดินซีเมนต์ ชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทางและชั้นดินเดิม

Pavement Materials	Asphalt Grade/ Cement Content	Elastic Modulus at 35°C MPa
Asphalt Materials		
Surface Treatment	AC 60/70 or 80/100	0
	Cutback RC 3000 or 800	0
Cold Mixed Asphalt	Asphalt Emulsion	0
Asphalt Concrete	AC 25/35 or 40/70	3000
AC surfacing on stabilized based layers		2000
Unbound Granular Base		
Crushed rock base		250 – 650
Steel slag		300 – 400
Crushed gravel base		150 – 500
Natural gravel base		120 – 300
Cement-modified base		
Mod. Crushed rock	2 %	200 – 400
Mod. Gravel	2 %	150 – 300
Stabilized soil cement	4 %	100 – 400
Stabilized laterite		300 – 600
Subbase Materials		
Sand		100 – 150
Clay		10 × CBR(%)



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

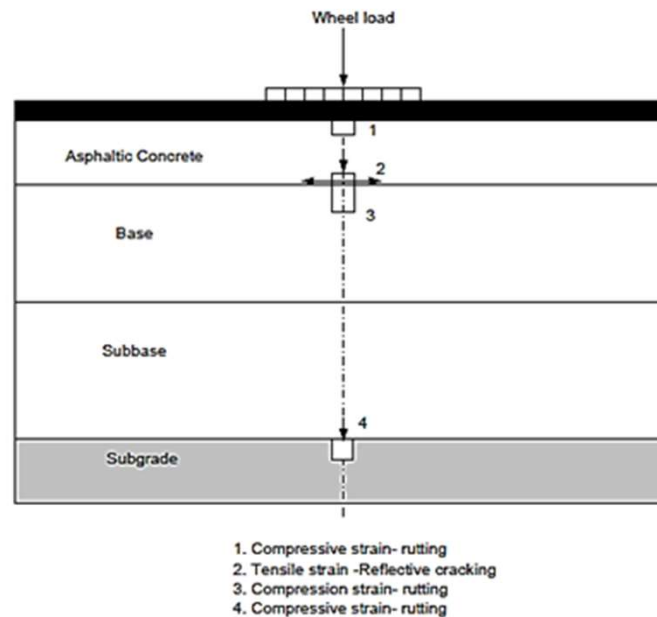
- การประเมินอายุของโครงสร้างทางผิวแอสฟัลต์ส่วนใหญ่ จะพิจารณาจากโอกาสการเกิดความเสียหายเนื่องจากการล้าของแอสฟัลต์ (Fatigue Cracking) และการเสียรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) ของวัสดุโครงสร้างทางในแต่ละชั้น
- ความเสียหายเหล่านี้ มีสาเหตุหลักมาจากความเค้นและความเครียด ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก และปริมาณการจราจรสะสมที่มากเกินไป และอาจเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ เช่น การออกแบบส่วนผสม อุณหภูมิ ความชื้น ฯลฯ เป็นต้น ที่มีผลทั้งทางตรงและทางอ้อม ต่อความเสียหายของวัสดุในโครงสร้างชั้นทาง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตู่้ำน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

- ในการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design) จะพิจารณาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุก (Wheel Load) ในชั้นโครงสร้างทาง ตำแหน่งที่ 2 3 และ 4
- โดยค่าขีดจำกัดของค่าความเครียดในแต่ละตำแหน่ง จะถูกนำมาใช้เพื่อทำนายความเสียหาย เช่น ความเสียหายของโครงสร้างทางที่เกิดจากการล้าและการเสียรูปถาวร



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

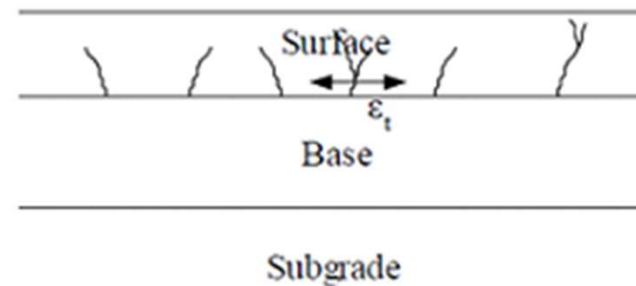
- ความเครียดที่มีอิทธิพลต่อความเสียหายในลักษณะดังกล่าว ได้แก่ 1) ความเครียดดึงแนวราบใต้ผิวทางแอสฟัลต์ ($\epsilon_{t,ac}$) 2) ค่าความเครียดอัดแนวตั้งในชั้นพื้นทางหรือรองพื้นทาง ($\epsilon_{c,b}$) และ 3) ค่าความเครียดอัดแนวตั้งในชั้นดินเดิมคันทาง ($\epsilon_{c,sg}$) โดยค่า $\epsilon_{t,ac}$ มีผลต่อการล้าของผิวทาง ในขณะที่ค่า $\epsilon_{c,b}$ และ $\epsilon_{c,sg}$ แสดงถึงการเกิดการเสียรูปถาวรในชั้นพื้นทางและชั้นดินเดิม



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตู่มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

- ความเสียหายที่เกิดจากการล้า จะแสดงออกมาเป็นรอยแตก (Fatigue Cracking) ของชั้นผิวทางแอสฟัลต์ หรือชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ มีสาเหตุมาจากการรองรับปริมาณการจราจรมากเกินไป



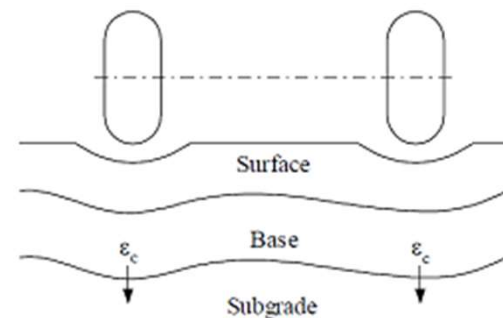
รอยแตกที่เกิดบนผิวทาง

ข) ความเครียดแนวราบใต้ชั้นผิวทางมีมากเกินไป

การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

- รอยแตกนี้เป็นผลมาจากบริเวณใต้ชั้นผิวทางแอสฟัลต์ หรือชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ เกิดความเค้นและความเครียดถึงมากจนเกิดรอยแตก และลามไปถึงผิว ดังจะเห็นจากผิวทางแอสฟัลต์เกิดรอยแตกคล้ายผิวจระเข้ หรืออาจทำให้เกิดการเสียรูปถาวรในลักษณะร่องล้อ



ก) ความเสียหายที่แสดงบนผิวทาง

ข) ความเครียดแนวตั้งของวัสดุในชั้นทาง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

- สมการเพื่อทำนายอายุของถนน จะพิจารณาจากความเสียหายเนื่องจากการล้าเป็นเกณฑ์ โดยสมการดังกล่าว จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจราจรที่ยอมให้ และค่าความเครียดดึงใต้ผิวทางแอสฟัลต์
- ค่าสัมประสิทธิ์ k_1 , k_2 , และ k_3 จะแปรผันตามสมบัติของวัสดุ และขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบหรือผู้นำเสนอ



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

$$N_f = k_1 (\epsilon_{t,ac})^{-k_2} (E_{ac})^{-k_3}$$

โดยที่ N_f = ปริมาณการจราจรที่ยอมให้ (ESAL)
 $\epsilon_{t,ac}$ = ค่าความเครียดดึงใต้ผิวแอสฟัลต์ ($\mu\epsilon$)
 E_{ac} = ค่าอิลาสติกโมดูลัสของผิวแอสฟัลต์ (MPa)
 k_1, k_2 , และ k_3 = สัมประสิทธิ์เพื่อทำนายปริมาณการจราจรที่ยอมให้

อ้างอิงจาก	ตัวแปรสัมประสิทธิ์		
	k_1	k_2	k_3
Asphalt Institute	0.0796	3.291	0.854
Transport Research Laboratory	0.0685	5.671	2.363



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

- ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดอัดบนชั้นพื้นทาง กับความเสียหายเนื่องจากการเสียรูปแบบถาวร
 - ร่องล้อ (Rutting) หรือ การเสียรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) เป็นความเสียหายอีกชนิดหนึ่ง ที่มักเกิดขึ้นในโครงสร้างทางยึดหยุ่น มีลักษณะเป็นร่องล้อ เกิดจากการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตไม่ได้มาตรฐาน หรือสภาพแวดล้อมมีอุณหภูมิสูงเกินไป หรือวัสดุที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless Material) ที่ใช้ก่อสร้างชั้นทาง ได้รับแรงกระทำ (ปริมาณการจราจร) มากกว่าที่ออกแบบไว้ จนเกิดการเสียรูปแบบถาวรเป็นร่องล้อ



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

- ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดอัดบนชั้นพื้นทาง กับความเสียหายเนื่องจากการเสียรูปแบบถาวร
 - ซึ่งการเสียรูปแบบถาวรของวัสดุที่ไม่มีความเชื่อมแน่นที่ใช้ก่อสร้างชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง และชั้นดินเดิม พิจารณาได้จากสมการความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความเครียดอัดแนวตั้ง (ϵ_c) บนชั้นดังกล่าว (พื้นทาง ($\epsilon_{c,b}$) รองพื้นทาง ($\epsilon_{c,rb}$) และดินเดิม ($\epsilon_{c,sg}$)) กับปริมาณการจราจรที่ยอมให้



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

- ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดอัดบนชั้นพื้นทาง กับความเสียหายเนื่องจากการเสียรูปแบบถาวร (ต่อ)
 - เกณฑ์ที่ใช้กำหนดความเสียหายแบบร่องล้อ อาจแตกต่างกันไปตามแต่ละผู้นำเสนอ เช่น Asphalt Institute (1996) และ Transport Research Laboratory (1985) กำหนดเกณฑ์ความเสียหายของชั้นดินเดิม โดยต้องมีระยะร่องล้อไม่เกิน 0.5 นิ้ว (12.5 มิลลิเมตร) และ 0.4 นิ้ว (10.2 มิลลิเมตร) ตามลำดับ จึงทำให้ค่า k_4 และ k_5 มีค่าต่างกัน



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

$$N_f = k_4 (\epsilon_c)^{-k_5}$$

โดยที่ N_f = ปริมาณการจราจรที่ขอมให้ (ESAL)
 ϵ_c = ค่าความเครียดอัดแนวตั้ง ($\mu\epsilon$)
 k_4 และ k_5 = สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ

นำเสนอโดย	ตัวแปรสัมประสิทธิ์	
	k_4	k_5
Asphalt Institute	1.365×10^{-9}	4.477
Transport Research Laboratory	6.18×10^{-8}	3.950



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การทำนายอายุคงเหลือของถนน

- ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดอดบนชั้นพื้นทาง กับความเสียหายเนื่องจากการเสียรูปแบบถาวร (ต่อ)
- กรมทางหลวงนำเสนอสมการ เพื่อใช้ออกแบบและทำนายอายุของถนน ที่ใช้เกณฑ์การล่า และเกณฑ์การเกิดร่องล้อเช่นกัน

$$\varepsilon_{t,ac} = 180 \left(\frac{N_f}{10^6} \right)^{-0.2} x \left(\frac{E_{ac}}{10000} \right)^{-0.4}$$

$$\varepsilon_c = 885 \left(\frac{N_f}{10^6} \right)^{-0.25}$$

- สมการเพื่อใช้ออกแบบและทำนายอายุของถนนของกรมทางหลวง มีรูปแบบเหมือนกับสมการของ Asphalt Institute และ Transport Research Laboratory แตกต่างกันเพียงค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุงานทางของท้องถิ่นนั้น ๆ

การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของผิวทางและโครงสร้างทางภายใต้น้ำหนักบรรทุก

- วิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ชั้นทาง เพื่อหาค่าตอบสนอง ได้แก่ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model, FEM) และ วิธี Multi-Layer Elastic (M-LET) เพื่อจำลองน้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างทาง และทำนายพฤติกรรม หรือค่าตอบสนองของชั้นทาง
- ด้วยวิธี Multi-Layer Elastic ซึ่งเป็นวิธีที่มีพื้นฐานจากงานวิจัยหลาย ๆ งาน เช่น Boussinesq (1886) Burmister (1943) Schiffman (1962) ฯลฯ เป็นต้น โดย Boussinesq (1886) ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาความเค้น ความเครียด และการแอ่นตัวบนชั้นโครงสร้างทาง ที่เกิดจากน้ำหนักกระทำเป็นจุด (Point Load)



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของผิวทางและโครงสร้างทาง ด้วยวิธี Multi-Layer Elastic

- Schiffman (1962) นำเสนอสมการทั่วไป ในการคำนวณความเค้น ความเครียด และการแอ่นตัวสำหรับโครงสร้างทาง ที่มีชั้นวัสดุหลายชั้น โดยมีสมมติฐาน ดังต่อไปนี้
 1. วัสดุในแต่ละชั้น มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) และมีพฤติกรรมแบบอีลาสติก ที่จำลองโดยค่าอีลาสติกโมดูลัส (Elastic Modulus, E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, ν)
 2. ความหนาของแต่ละชั้น มีค่าที่จำกัดยกเว้น ชั้นล่างสุด และความกว้างของโครงสร้างทางมีไม่จำกัด
 3. การให้น้ำหนัก จะจำลองโดยให้น้ำหนักกระทำเป็นจุด (Point Load) ที่แปลงเป็นแรงดันกระจาย (Uniformly Distributed Load) ลักษณะวงกลม
 4. ไม่คิคน้ำหนักของวัสดุ แรงเฉือนบนผิวทาง อิทธิพลที่เกิดจากอุณหภูมิ และผลกระทบทางพลศาสตร์
 5. ไม่มีความแตกต่างบนรอยต่อของแต่ละชั้น

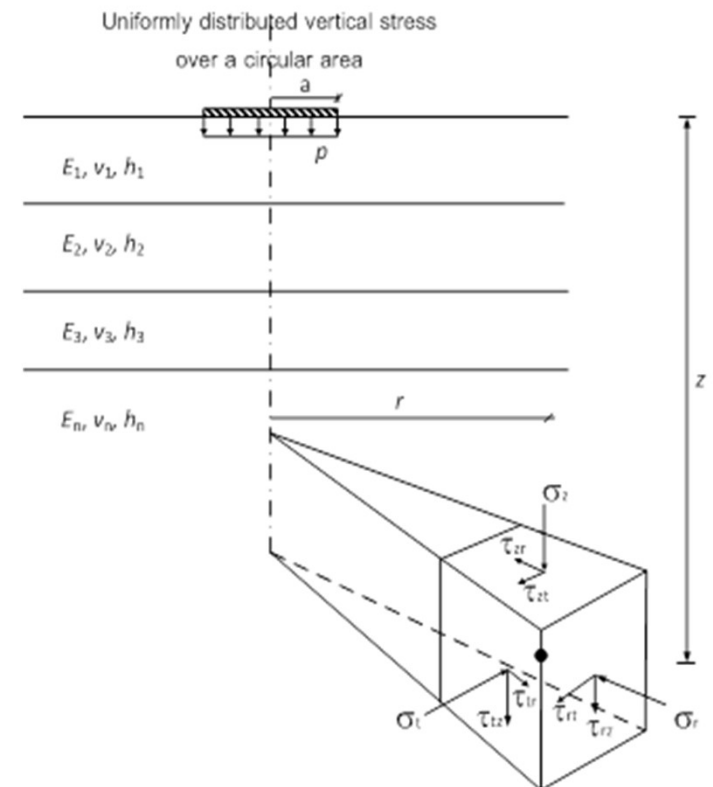
การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตู่มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- สมมติฐานดังกล่าว แสดงแรงกระจายแบบวงกลม ที่มีรัศมี a กระทำบนโครงสร้างชั้นทางที่มีหลายชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีค่าอีลาสติคโมดูลัส (E) อัตราส่วนปัวซอง (ν) และความหนา (h) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น สำหรับเอลิเมนต์เล็ก ๆ ที่มีจุดศูนย์กลางห่างจากแกนสมมาตรเป็นระยะ r และลึกเป็นระยะ z โดยสามารถคำนวณได้จากกฎของ Hook ซึ่งอยู่ในรูปสามมิติ

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_t)]$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_t + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \nu(\sigma_z + \sigma_r)]$$



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การประยุกต์ใช้ข้อมูลจากเครื่อง FWD มาออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล

- ผลจากการทดสอบด้วยเครื่อง FWD จะถูกจัดเก็บในรูปแบบของค่าการแอ่นตัวของเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ในคานทดสอบการแอ่นตัว (Geophone) และความเค้นใต้ศูนย์กลางของแผ่นทดสอบ
- ข้อมูลดิบดังกล่าว จะยังไม่สามารถนำมาประเมินคุณสมบัติของชั้นโครงสร้างทางได้โดยตรง ดังนั้น ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลอื่น ๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประเมินความแข็งแรงโดยรวมของชั้นโครงสร้างทาง ด้วยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back Calculation Method) ทำให้ทราบถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ความหนา และอายุคงเหลือของชั้นโครงสร้างต่าง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การประยุกต์ใช้ข้อมูลจากเครื่อง FWD มาออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล

- นำข้อมูลมาประเมินเพื่อออกแบบขีกระดืบ หรือออกแบบขยายช่องจราจร ให้เหมาะสมกับความแข็งแรงของโครงสร้างทางปัจจุบัน และปริมาณจราจรที่จะเกิดขึ้นในอนาคต
- การวิเคราะห์ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างทางนั้น จะทำการแบ่งเป็นตอน (Section) ตามชนิดโครงสร้างทาง เช่น ผิวแอสฟัลต์คอนกรีต ผิวคอนกรีต ฯลฯ เป็นต้น และตามการซ่อมบำรุง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การประยุกต์ใช้ข้อมูลจากเครื่อง FWD มาออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล

- โดยค่าการยุบตัว จากวิธีทดสอบที่ศูนย์กลางของโครงสร้างผิวทางที่ได้รับการแบ่งช่วงแล้ว จะถูกนำไปใช้วิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลประกอบอื่น ๆ เพื่อประเมินความแข็งแรงโดยรวมของชั้นโครงสร้างทาง ด้วยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back Calculation Method)
- โดยค่าแอมการยุบตัว จะถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับตัวแปรอื่น ๆ ของแบบจำลองโครงสร้างทาง (Pavement Model) ที่วิศวกรสร้างขึ้นตามหลักการทางวิศวกรรม
- ซึ่งตัวแปรนำเข้าพื้นฐานในการคำนวณย้อนกลับ คือ ค่าแอมการยุบตัวจากเครื่องมือ FWD ค่าความหนาแน่นทางของแบบจำลองผิวทาง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

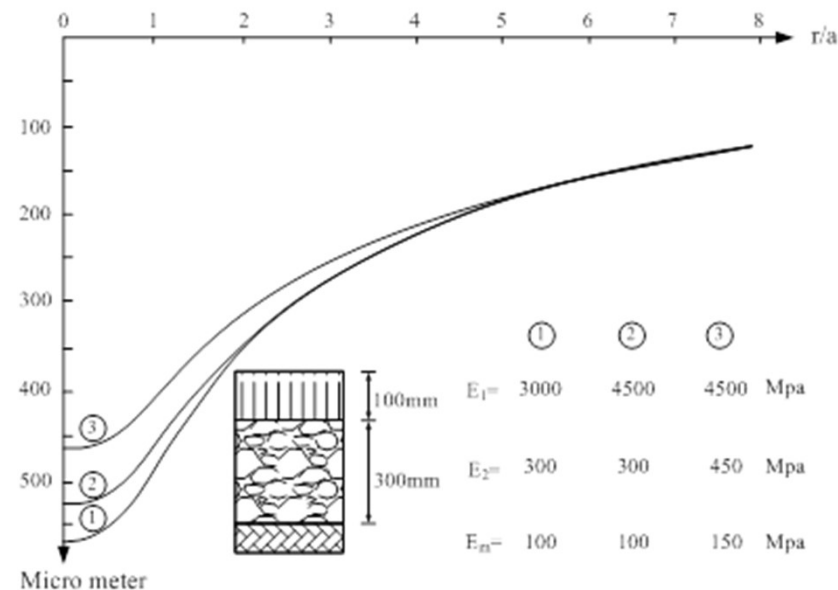
การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างเดิมจากการสำรวจด้วยเครื่อง FWD

1. กำหนดแบบจำลองโครงสร้างทาง ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว จะนิยามกำหนดให้มีชั้นโครงสร้างทางไม่เกิน 4 ชั้น สอดคล้องกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ส่วนใหญ่ ที่ใช้คำนวณย้อนกลับ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณย้อนกลับที่ชื่อว่า DYNATEST ELMOD ที่ ระบุค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตั้งต้น (Seed Layer Moduli) โดยอาศัยช่วงค่าความแข็งแรงของวัสดุ ตามความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม
2. คำนวณหาค่าการยุบตัวจากทฤษฎีโครงสร้างผิวทาง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการยุบตัวที่คำนวณได้ โดยเริ่มต้นจากการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินคันทาง จากค่ายุบตัวที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตัวไกลที่สุดจากศูนย์กลางแผ่นเหล็ก ซึ่งจะทำให้ด้านนอกของเส้นแ่งการยุบตัว ปรับตัวลู่เข้าหาเส้นแ่งการยุบตัวที่ได้จากการวัดในภาคสนาม

การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างเดิมจากการสำรวจด้วยเครื่อง FWD

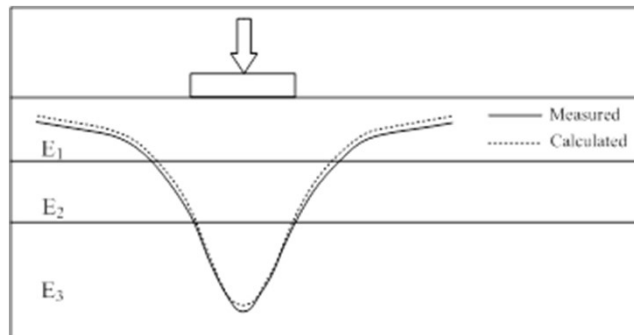
2. ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดินคันทางที่คำนวณได้ ร่วมกับการแปรผันค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผิวทางด้านบน เพื่อปรับค่าเส้นแ่งการยุบตัวที่ได้จากการคำนวณ ให้เข้าสู่เส้นแ่งการยุบตัวที่วัดได้



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างเดิมจากการสำรวจด้วยเครื่อง FWD

4. เปรียบเทียบค่าแองการยุบตัวที่คำนวณได้ กับค่าแองการยุบตัวที่วัดได้ จนกว่าแองการยุบตัวทั้งสองจะมีความสอดคล้องกันตามข้อกำหนด
กล่าวอีกอย่าง คือ มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้
5. ปรับแก้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางด้านบนสุดที่คำนวณได้ ซึ่งเป็นชั้นทางแบบเชื่อมแน่น (Uppermost Bound Layer) ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิมากที่สุด ให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางที่อุณหภูมิมาตรฐานโดยใช้แบบจำลองการปรับแก้ที่เหมาะสม



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างเดิมจากการสำรวจด้วยเครื่อง FWD

6. ระบุให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณย้อนกลับได้ เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อุณหภูมิมาตรฐานของชั้นทางที่ใช้ในแบบจำลอง ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีบอกค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางที่ทดสอบได้
 - โดยทฤษฎีทางกลศาสตร์วิศวกรรมผิวทางที่ใช้ เป็นพื้นฐานในการคำนวณวิเคราะห์พฤติกรรมของแบบจำลองผิวทาง ภายใต้น้ำหนักที่กำหนดให้เท่ากับน้ำหนักจากเครื่องมือ FWD ที่ใช้ในโครงการนี้



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างเดิมจากการสำรวจด้วยเครื่อง FWD

- ซึ่งเป็นทฤษฎีที่คิดค้นและนำเสนอโดย Kirk and Odemark (1949) เป็นการใช้สมการสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างดินแบบชั้นเดียวของบูชีเนส (Boussinesq Equation) และวิธีค่าความหนาเทียบเท่า (Method of Equivalent Thickness, MET) เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างหลายชั้นทางได้
- ทั้งนี้ ขั้นตอนในการวิเคราะห์ขั้นต้น คือ การปรับแบบจำลองหลายชั้นทาง ให้เป็นแบบจำลองชั้นเดียวแบบกึ่งอนันต์ (Half-space Model) โดยใช้เทคนิคของ MET



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างเดิมจากการสำรวจด้วยเครื่อง FWD

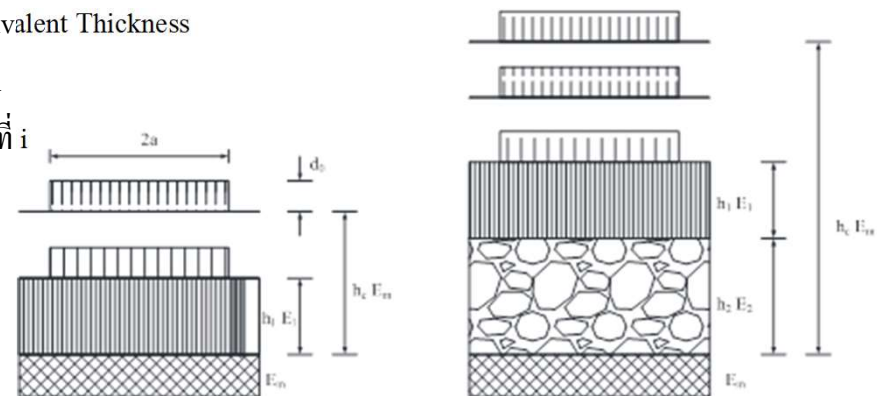
6. ระบุให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณย้อนกลับได้ (ต่อ)

- ทั้งนี้ Kirk and Odemark (1949) มีสมมุติฐานว่า การแปลงความหนาของวัสดุ จะไม่มีผลต่อค่า Stress หรือ Strain ของวัสดุ ที่อยู่ใต้เส้นรอยต่อ ถ้าหากว่าสมการนี้เป็นจริง

$$\frac{h_1^3 E_1}{1-\nu_1^2} = \frac{h_e^3 E_2}{1-\nu_2^2} \quad \text{หรือ} \quad h_e = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2} \frac{1-\nu_2^2}{1-\nu_1^2}}$$

โดยที่

- h_e = ความหนาเทียบเท่า หรือ Equivalent Thickness
- E_i = โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางที่ i
- ν_i = อัตราส่วนปัวซองของชั้นทางที่ i
- h_i = ความหนาของชั้นทางที่ i



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างเดิมจากการสำรวจด้วยเครื่อง FWD

6. ระบุให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณย้อนกลับได้ (ต่อ)

- ทั้งนี้พบว่า สมมุติฐานของ Kirk and Odemark (1949) ยังไม่ถูกต้องนัก เนื่องจากค่าที่ได้จากการคำนวณ ยังคลาดเคลื่อนจากค่าที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างแบบยืดหยุ่นหลายชั้นทาง (Multi-Layered Elastic) ดังนั้น จึงต้องคูณปรับแก้ค่าที่คำนวณได้ ด้วยสัมประสิทธิ์การปรับแก้ f (Correction Factor) ก่อน
- นอกจากนี้ ค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) มีผลน้อยต่อค่า Strain ที่วิเคราะห์ได้ และเป็นค่าที่ทดสอบได้ค่อนข้างยากในทางปฏิบัติ จึงมักสมมติให้วัสดุทุกชั้นมีค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากัน ดังนั้น จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$h_e = fxh_1^3 \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}$$

โดยที่

ยกเว้นในวัสดุชั้นบนสุด

$f = 0.8$ ในชั้นวัสดุทั่วไป

$f = 0.9$ (ถ้าระบบมีวัสดุมากกว่า 2 ชั้น)

$f = 1.0$ (ถ้าระบบมีวัสดุมากกว่า 3 ชั้น)



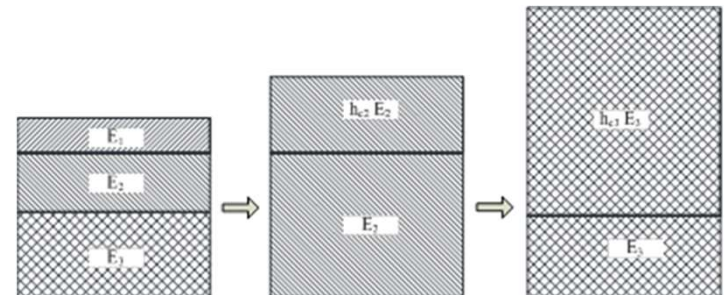
การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างเดิมจากการสำรวจด้วยเครื่อง FWD

6. ระบุให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณย้อนกลับได้ (ต่อ)
- สำหรับระบบที่มี n ชั้น สามารถคำนวณตามวิธีข้างต้นทีละชั้น ทั้งนี้ ความหนาเทียบเท่าของวัสดุชั้นที่ n สามารถคำนวณได้จาก

$$h_{e,n} = fx \sum_{i=1}^{n-1} h_i \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_n}}$$

$$h_{e,n} = fx \left\{ \dots \left[\left(h_3 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} + h_2 x \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} + h_3 \right) x \dots + h_{n-1} \right] \right\}$$



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างเดิมจากการสำรวจด้วยเครื่อง FWD

7. หลังจากแปลงความหนาชั้นวัสดุแล้ว วัสดุทั้งระบบจะเสมือนว่าเป็นวัสดุเนื้อเดียวกันสามารถใช้สมการของ Boussinesq คำนวณ Stress และ Strain ต่อไปได้ แต่ต้องเป็นค่าในชั้นวัสดุใต้เส้นรอยต่อเท่านั้น นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ที่ได้ จะมีค่าใกล้เคียงกับวิธี Multi-Layered Elastic
 - ถ้าโมดูลัสของชั้นวัสดุมีค่าลดลงตามความลึก กล่าวคือ อัตราส่วน $E_i + E_{i+1} > 2$ และความหนาเทียบเท่า ควรจะมากกว่ารัศมีของแรงกระทำ สำหรับค่าโมดูลัสยึดหยุ่นชั้นดินคันทาง จะคำนวณจากสมการของ Boussinesq โดยใช้ค่าการยุบตัวของตำแหน่งที่ไกลที่สุดจากศูนย์กลางแผ่นเหล็ก



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างเดิมจากการสำรวจด้วยเครื่อง FWD

7. หลังจากแปลงความหนาชั้นวัสดุแล้ว วัสดุทั้งระบบจะเสมือนว่าเป็นวัสดุเนื้อเดียวกันสามารถใช้สมการของ Boussinesq คำนวณ Stress และ Strain ต่อไปได้ (ต่อ)
- ขั้นตอนวิธีการคำนวณย้อนกลับ มีดังนี้ (ต่อ)

$$E_{subgrade} = \frac{(1 - \mu^2) * \sigma_0 * a^2}{d_i * \gamma_i}$$

โดยที่	$E_{subgrade}$	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินคันทาง
	μ	=	ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง
	σ_0	=	ค่าหน่วยแรงเค้นสมำเสมอบนแผ่นเหล็ก
	a	=	ค่ารัศมีของแผ่นเหล็ก
	d_i	=	ค่าการยุบตัว



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างเดิมจากการสำรวจด้วยเครื่อง FWD

- สำหรับการวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสชั้นทางชั้นอื่น ๆ ที่อยู่ด้านบน สามารถใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเดียวกัน มาปรับใช้กับค่าการยุบตัวที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ที่อยู่ด้านใกล้ตำแหน่งศูนย์กลางแรงกระทำเข้ามา จนเส้นแอ่งการยุบตัวที่คำนวณได้ อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

1. การออกแบบโครงสร้างทางและผิวทางใหม่

- เหมาะสมสำหรับการออกแบบเพื่อขยายช่องจราจร เนื่องจากไม่สามารถนำโครงสร้างทางและผิวทางเดิมมาใช้ในการก่อสร้างได้
- ดังนั้น การออกแบบผิวทางใหม่ จึงไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทาง ที่ได้จากทดสอบด้วยเครื่อง FWD มาประกอบการออกแบบ
- โดยจะเลือกใช้วัสดุโครงสร้างทางในท้องถิ่น มาปรับปรุงคุณภาพ และกำหนดความหนาโครงสร้างทางชั้นต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสม
- โดยมีขั้นตอนการออกแบบ ดังนี้
 - 1) กำหนดคุณสมบัติและความหนาของชั้นวัสดุที่จะใช้ก่อสร้างทาง ประกอบด้วย ชั้นคันทาง ชั้นวัสดุคัดเลือก รองพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง และชั้นผิวทาง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

1. การออกแบบโครงสร้างทางและผิวทางใหม่ (ต่อ)

➤ ขั้นตอนการออกแบบ (ต่อ)

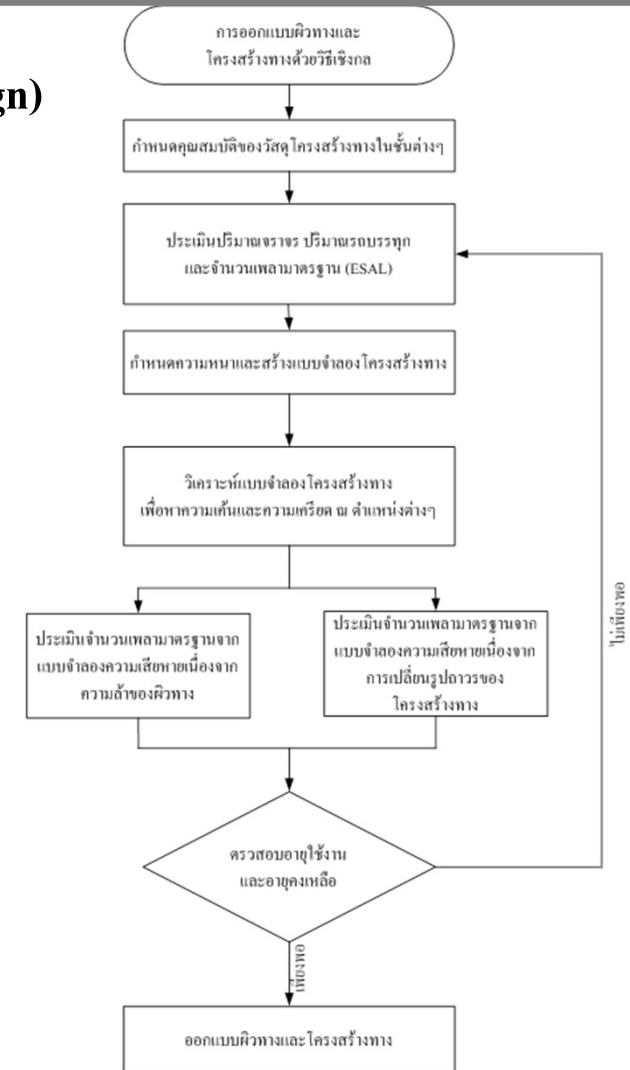
- 2) กำหนดคุณสมบัติของรถบรรทุกที่จะใช้ในการออกแบบ เพื่อจำลองหน่วยแรงกดภายใต้ล้อรถบรรทุก ที่จะกระทำต่อโครงสร้างทางชั้นต่าง ๆ
- 3) สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของชั้นโครงสร้างทาง และจำลองน้ำหนักบรรทุก พร้อมทั้งวิเคราะห์หาผลตอบสนอง (หน่วยแรงและความเครียด) ที่เกิดขึ้นในชั้นโครงสร้างทาง
- 4) ทำนายอายุการใช้งานของถนน จากผลตอบสนองของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในรูปแบบของจำนวนเพลามาตรฐาน (ESAL) ที่โครงสร้างทางจะสามารถรองรับได้ จากโอกาสการเกิดความเสียหาย เนื่องจากการล้าของแอสฟัลต์ (Fatigue Cracking) และการเสียรูปแบบถาวร (Permanent Deformation)



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- การออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (ต่อ)
 1. การออกแบบโครงสร้างทางและผิวทางใหม่ (ต่อ)
 - ขั้นตอนการออกแบบ (ต่อ)
 - 5) เปรียบเทียบจำนวนเพลามาตรฐานที่ถนนจะรองรับได้ กับจำนวนเพลามาตรฐานที่จะเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน หากชั้นสร้างทางไม่สามารถรองรับปริมาณจราจรที่จะเกิดขึ้นได้ ให้ทำการปรับคุณภาพวัสดุ หรือเพิ่มความหนาของโครงสร้างทาง แล้วจึงวิเคราะห์ความสามารถในการรองรับปริมาณจราจรอีกครั้ง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

2. การออกแบบเพื่อซ่อมบำรุงและบูรณะโครงสร้างทางและผิวทาง
 - การออกแบบจะนำผลการทดสอบการแอ่นตัวด้วยเครื่อง FWD ของถนนมาพิจารณาประกอบการออกแบบ
 - โดยผลการทดสอบจะถูกนำมาคำนวณย้อนกลับ เพื่อประเมินความหนาและคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทาง แล้วจึงทำการคำนวณอายุคงเหลือของโครงสร้างทาง จากเกณฑ์ความเสียหายด้านความล้าที่ผิวทาง และการเสียรูปถาวรที่ชั้นโครงสร้างทาง
 - หากผิวทางและโครงสร้างทางไม่สามารถรองรับปริมาณจราจรที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ โครงสร้างทางจะถูกบูรณะด้วยการเสริมผิวทาง หรือถูกบูรณะโครงสร้างทางในชั้นต่าง ๆ ให้สามารถรองรับปริมาณจราจรที่จะเกิดขึ้นได้



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

2. การออกแบบเพื่อซ่อมบำรุงและบูรณะ โครงสร้างทางและผิวทาง (ต่อ)
 - 1) ศึกษาประวัติการออกแบบ การก่อสร้าง และการซ่อมบำรุง เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาประกอบการประเมินความหนา และความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างทาง
 - 2) ทำการคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุ และความหนาของชั้นโครงสร้างทางจากผลการทดสอบด้วยเครื่อง FWD
 - 3) วิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างทาง เพื่อหาอายุคงเหลือของโครงสร้างทางจากเกณฑ์ความเสียหายด้านความล้าที่ผิวทาง และการเสียรูปถาวรที่ชั้นโครงสร้างทาง
 - 4) ประเมินอายุคงเหลือและจำนวนเพลามาตรฐานของโครงสร้างทางที่รองรับได้ และเปรียบเทียบกับปริมาณจราจรที่จะเกิดขึ้นในอนาคต หากไม่เพียงพอ จะต้องออกแบบเพื่อบูรณะโครงสร้างทาง

การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

2. การออกแบบเพื่อซ่อมบำรุงและบูรณะโครงสร้างทางและผิวทาง (ต่อ)
 - 5) กำหนดคุณสมบัติและความหนาของชั้นวัสดุที่จะบูรณะโครงสร้างทาง ประกอบด้วย ชั้นคันทาง ชั้นวัสดุคัดเลือก ชั้นรองพื้นทาง และชั้นผิวทาง
 - 6) สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของชั้นโครงสร้างทาง และจำลองน้ำหนักบรรทุก พร้อมทั้งวิเคราะห์หาผลตอบสนอง (หน่วยแรงและความเครียด) ที่เกิดขึ้นในชั้นโครงสร้างทาง
 - 7) วิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างทางที่ถูกบูรณะ เพื่อทำนายอายุการใช้งานของถนน จากผลการตอบสนองของแบบจำลองคณิตศาสตร์ ในรูปแบบของจำนวนเพลามาตรฐาน (ESAL) อีกครั้ง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

การออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

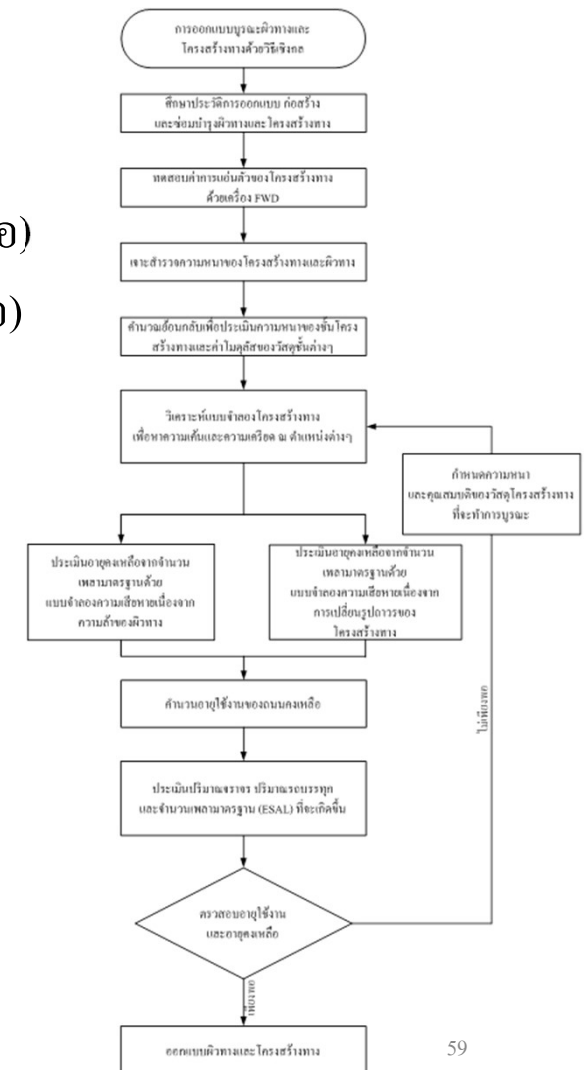
2. การออกแบบเพื่อซ่อมบำรุงและบูรณะโครงสร้างทางและผิวทาง (ต่อ)

➤ ขั้นตอนการออกแบบเพื่อบูรณะผิวทางและโครงสร้างทาง (ต่อ)

8) เปรียบเทียบจำนวนเพลามาตรฐานที่ถนนจะรองรับ
ได้ กับจำนวนเพลามาตรฐานที่จะเกิดขึ้น

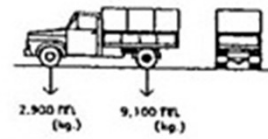
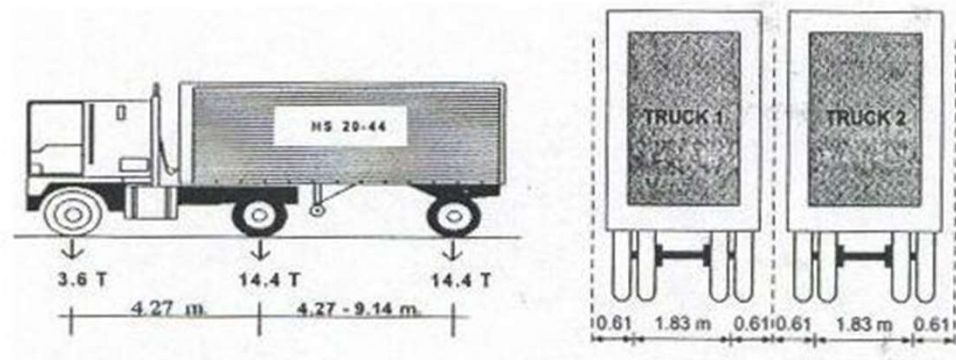
ระหว่างการใช้งาน หากชั้นโครงสร้างทางไม่สามารถ
รองรับปริมาณจราจรที่จะเกิดขึ้นได้ ให้ทำ

การปรับปรุงสภาพวัสดุ หรือเพิ่มความหนาของ
โครงสร้างทาง แล้วจึงวิเคราะห์ความสามารถ
ในการรองรับปริมาณจราจรอีกครั้ง

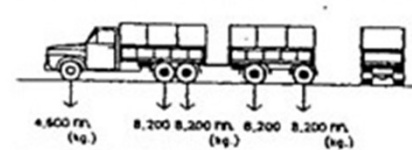


การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตู่มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

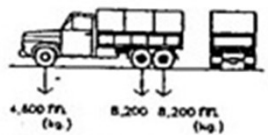
ตัวอย่างการออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)



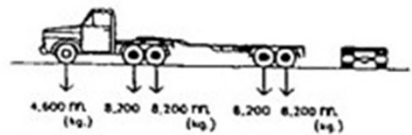
6 ล้อ



18 ล้อพวง



10 ล้อ



18 ล้อทั้งพวง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

ตัวอย่างการออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

1. การออกแบบเพื่อบูรณะโครงสร้างทาง

- มีวัตถุประสงค์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างทาง ให้สามารถรองรับปริมาณจราจรและน้ำหนักรถบรรทุกได้สูงขึ้น ช่วยลดงบประมาณในการซ่อมบำรุง ที่เกิดเนื่องจากความแข็งแรงของโครงสร้างทางไม่เพียงพอ
- การออกแบบก่อสร้าง จะดำเนินการบนคันทางเดิม โดยจะนำข้อมูลจากการคำนวณย้อนกลับด้วยเครื่อง FWD ที่ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติและอายุคงเหลือของโครงสร้างทาง มาประกอบการออกแบบ
- โดยจะออกแบบปรับปรุงชั้นโครงสร้างทางบางชั้น หรือเสริมความหนาผิวทางให้สอดคล้องกับอายุคงเหลือ และปริมาณจราจรที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคต



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

ตัวอย่างการออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

2. การออกแบบเพื่อขยายผิวจราจร

- เพื่อเพิ่มความกว้างถนน จากเดิมที่ช่องจราจรกว้าง 3 ถึง 3.5 เมตร ไหล่ทางกว้างข้างละ 0.5 ถึง 1 เมตร (มาตรฐาน 6/8 หรือ 6/9 เดิม) เป็นช่องจราจรกว้าง 3.5 เมตร และไหล่ทางกว้างข้างละ 2.5 เมตร (มาตรฐาน 7/12) รวมทั้งเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างทาง ให้สามารถรองรับปริมาณจราจรและน้ำหนักบรรทุกได้สูงขึ้น
- โดยนำข้อมูลจากเครื่อง FWD มาประกอบการออกแบบเช่นเดียวกับการออกแบบเพื่อบูรณะโครงสร้างทาง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตู่มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

ตัวอย่างการออกแบบถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

3. การออกแบบเพื่อขยายช่องจราจร

- เพื่อปรับปรุงถนนจาก 2 ช่องจราจร เป็น 4 ช่องจราจร ให้สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกและปริมาณจราจรได้สูงขึ้น บนแนวคันทางเดิม ซึ่งอาจต้องมีการจัดหาหรือเวนคืนที่ดินเพิ่มเติม เพื่อให้เหมาะสมกับถนนขนาด 4 ช่องจราจร



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล
 - การออกแบบด้วยวิธีเชิงกล จะใช้ปริมาณการจราจร เพื่อประมาณอายุของถนน ตามเกณฑ์ความเสียหายที่จะเกิดขึ้น โดยมีขั้นตอน ดังนี้
 1. หาค่าปริมาณการจราจรที่ใช้ในการออกแบบ ที่แสดงอยู่ในรูปแบบจำนวนเพลามาตรฐาน (Equivalent Single Axle Load, ESAL)
 - โดยตัวอย่างการออกแบบ กำหนดให้ถนนมี 4 ช่องจราจร (2 ช่องจราจรต่อ 1 ทิศทาง) เปิดให้บริการใน 3 ปีข้างหน้า โดยมีปริมาณจราจรที่สมมติขึ้น

Car	Light Bus (LB)	Medium Bus (MB)	Heavy Bus (HB)	Light Truck (LT)	Medium Truck (MT)	Heavy Truck (HT)	Semi- Trailer (ST)	Full Trailer (FT)
24,458	571	247	665	6,305	2,561	2,223	1,846	1,943

- รายละเอียดการคำนวณ เป็นดังนี้
 - น้ำหนักเพลามาตรฐานสำหรับออกแบบ (Standard Axle) เท่ากับ 10 ตัน ชนิดเพลาคี่วล้อคู่ (Single Axle, Dual Wheels)



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (ต่อ)
- การออกแบบด้วยวิธีเชิงกล มีขั้นตอน ดังนี้ (ต่อ)
 1. หาค่าปริมาณการจราจรที่ใช้ในการออกแบบ (ต่อ)
 - รายละเอียดการคำนวณ (ต่อ)
 - แรงดันลมยาง 100 ปอนด์/ตารางนิ้ว (psi)
 - ตัวคูณปริมาณรถบรรทุก (Truck Factor) เท่ากับ 1.5
 - อัตราการเติบโตของปริมาณจราจร (Traffic Growth Rate) เท่ากับ ร้อยละ 5 ต่อปี
 - ระยะเวลาใช้งานของถนน (Design Period) เท่ากับ 15 ปี
 - ดังนั้น ปริมาณจราจรของพาหนะทุกชนิด ทั้งสองทิศทาง เฉลี่ยรายวันตลอดปี (AADT) เท่ากับ $24,458 + 571 + 247 + 665 + 6,305 + 2,561 + 2,223 + 1,846 + 1,943$ เท่ากับ 40,819 คันต่อวัน



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (ต่อ)
- การออกแบบด้วยวิธีเชิงกล มีขั้นตอน ดังนี้ (ต่อ)
 1. หาค่าปริมาณการจราจรที่ใช้ในการออกแบบ (ต่อ)

- ร้อยละรถบรรทุกหนัก คำนวณได้จาก

$$\frac{MB + HB + MT + HT + ST + FT}{Total} \times 100$$

$$\frac{247 + 665 + 2,561 + 2,223 + 1,846 + 1,943}{40,819} \times 100 = 23.24\%$$

- ร้อยละของรถบรรทุกในช่องจราจรที่ออกแบบ (Percentage of Truck in Design Lane) กำหนดให้ เท่ากับ ร้อยละ 40
- ดังนั้น จำนวนรถบรรทุกหนักในช่องจราจรที่ออกแบบในปีฐาน พ.ศ. 2558 เท่ากับ $40,819 \times 0.2324 \times 0.40 = 3,795$ คัน/ช่องจราจร
- จำนวนรถบรรทุกหนักในช่องจราจรออกแบบในปี พ.ศ. 2561 จึงเท่ากับ $3,795 \times (1 + 0.05)^3 = 4,394$ คัน/ช่องจราจร



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

➤ ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (ต่อ)

➤ การออกแบบด้วยวิธีเชิงกล มีขั้นตอน ดังนี้ (ต่อ)

1. หาค่าปริมาณการจราจรที่ใช้ในการออกแบบ (ต่อ)

➤ จำนวนเที่ยวสะสมของรถบรรทุกที่แล่นผ่านช่องจราจร ตลอดอายุการออกแบบ เท่ากับ

$$4,394 \times 365 \times \frac{(1 + 0.05)^{15} - 1}{0.05} = 34.6 \times 10^6 \text{ คัน/ช่องจราจร}$$

➤ ดังนั้น จำนวนเพลามาตรฐาน เท่ากับ $1.5 \times 34.6 \times 10^6 = 51.9 \times 10^6$ ESAL

2. กำหนดค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชนิด ตามความแข็งแรงของวัสดุ กรณีที่ไม่ทราบค่า

โมดูลัสของวัสดุนั้น เช่น ชั้น

ดินเดิมสามารถประมาณค่า

โดยใช้สมการ $E = 10 \times \text{CBR}$

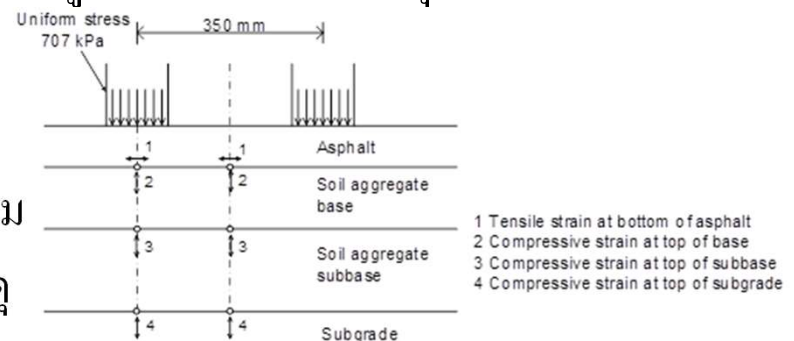
(MPa) ได้

วัสดุ	Modulus (MPa)	Poisson's Ratio
ผิวทางแอสฟัลต์	2,500	0.35
พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์	850	0.20
พื้นทางหินคลุก	350	0.35
ชั้นรองทางพื้นทาง	150	0.35
ชั้นวัสดุตัดเลือก A	100	0.35
พื้นทางหินคลุก B	60	0.35



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยต้อน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (ต่อ)
- การออกแบบด้วยวิธีเชิงกล มีขั้นตอน ดังนี้ (ต่อ)
 3. วิเคราะห์ค่าหน่วยแรง โดยค่าความเครียดในตำแหน่งที่พิจารณาออกแบบ เป็นดังนี้
 - ตำแหน่งที่ 1 คือ Tensile Strain at Bottom of Asphalt เพื่อพิจารณาอายุที่เหลือของผิวทาง จากการล้าของวัสดุ
 - ตำแหน่งที่ 2 คือ Compressive Strain at Top of Base เพื่อพิจารณาอายุที่เหลือของชั้นพื้นทาง จากการเสียรูปแบบถาวรของวัสดุ
 - ตำแหน่งที่ 3 คือ Compressive Strain at Top of Subbase เพื่อพิจารณาอายุที่เหลือของชั้นรองพื้นทาง จากการเสียรูปแบบถาวรของวัสดุ
 - ตำแหน่งที่ 4 คือ Compressive Strain at Top of Subgrade เพื่อพิจารณาอายุที่เหลือของชั้นดินเดิม จากการเสียรูปแบบถาวรของวัสดุ



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (ต่อ)
- การออกแบบด้วยวิธีเชิงกล มีขั้นตอน ดังนี้ (ต่อ)
 4. ตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักจราจรจากเกณฑ์การล้าและเกณฑ์การเกิด ร่องล้อ ตามที่กรมทางหลวงได้เสนอไว้ โดยสามารถหาค่าจำนวนครั้งของแรง กระทำ ที่ทำให้วัสดุเกิดความเสียหาย จนเกินค่าที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ ดังสมการ สำหรับส่วนที่เกิด Tensile Strain

$$N_f = \left[\frac{180}{\mu\epsilon_t} \times \left(\frac{E_{ac}}{10000} \right)^{-0.4} \right] \times 10^6$$

สำหรับส่วนที่เกิด Compressive Strain เพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการจราจรที่ใช้ ออกแบบ คำนวณได้ดังสมการ

$$N_f = \left(\frac{885}{\epsilon_c} \right)^4 \times 10^6$$



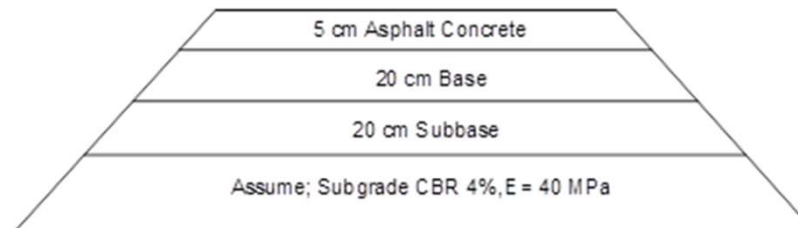
การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตู่้ำน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (ต่อ)
- การออกแบบด้วยวิธีเชิงกล มีขั้นตอน ดังนี้ (ต่อ)
 5. วิเคราะห์โครงสร้างถนน เพื่อหาผลตอบสนอง หลังจากสร้างแบบจำลองของวัสดุของชั้นโครงสร้างทาง น้ำหนักบรรทุก และปริมาณจราจรแล้ว แบบจำลองต่าง ๆ ดังกล่าว จะถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม KENPAVE เพื่อวิเคราะห์หาผลตอบสนอง



การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (ต่อ)
- การสร้างแบบจำลองชั้นโครงสร้างทาง แสดงตัวอย่าง ได้ดังนี้
 1. โครงสร้างทั่วไป ของกรมทางหลวงชนบท แสดงได้ ดังรูป



- ผลการคำนวณค่าตอบสนองของโครงสร้าง ที่ตำแหน่งกึ่งกลางล้อ เป็นดังนี้
 - Bottom of Asphalt Layer; Tensile Strain = 355.7 $\mu\epsilon$
 - Top of Base Layer; Compression Strain = 1628 $\mu\epsilon$
 - Top of Subbase Layer; Compression Strain = 689.2 $\mu\epsilon$
 - Top of Subgrade Layer; Compression Strain = 642.9 $\mu\epsilon$

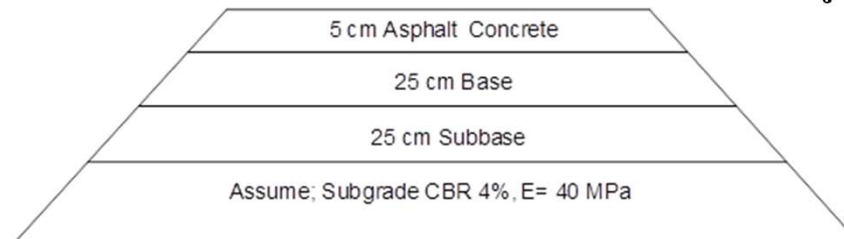


การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (ต่อ)
- การสร้างแบบจำลองชั้นโครงสร้างทาง แสดงตัวอย่าง ได้ดังนี้ (ต่อ)
 1. โครงสร้างทั่วไป ของกรมทางหลวงชนบท (ต่อ)
 - ผลการคำนวณค่าตอบสนองของโครงสร้าง ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อ เป็นดังนี้
 - Bottom of Asphalt Layer; Tensile Strain = $182.9 \mu\epsilon$
 - Top of Base Layer; Compression Strain = $142.9 \mu\epsilon$
 - Top of Subbase Layer; Compression Strain = $622.7 \mu\epsilon$
 - Top of Subgrade Layer; Compression Strain = $700.6 \mu\epsilon$
 - หลังจากนั้น นำค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่ง ไปคำนวณในสมการเพื่อหาค่า ESAL และเลือกค่าน้อยที่สุด เพื่อเป็นเกณฑ์สำหรับโครงสร้างนั้น ๆ
 - ซึ่งจะพบว่า โครงสร้างทางนี้ สามารถรับปริมาณจราจรได้ไม่เกิน 8.73×10^4 ESAL

การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (ต่อ)
 - การสร้างแบบจำลองชั้นโครงสร้างทาง แสดงตัวอย่าง ได้ดังนี้ (ต่อ)
2. โครงสร้างทางใหม่ มีการขยายช่องจราจร แสดงได้ ดังรูป



- ผลการคำนวณค่าตอบสนองของโครงสร้าง ที่ตำแหน่งกึ่งกลางล้อ เป็นดังนี้
 - Bottom of Asphalt Layer; Tensile Strain = 252.4 $\mu\epsilon$
 - Top of Base Layer; Compression Strain = 1175 $\mu\epsilon$
 - Top of Subbase Layer; Compression Strain = 389.4 $\mu\epsilon$
 - Top of Subgrade Layer; Compression Strain = 343.9 $\mu\epsilon$
- ผลการคำนวณค่าตอบสนองของโครงสร้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อ พบว่า
 - Bottom of Asphalt Layer; Tensile Strain = 128.0 $\mu\epsilon$

การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic Design)

- ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (ต่อ)
- การสร้างแบบจำลองชั้นโครงสร้างทาง แสดงตัวอย่าง ได้ดังนี้ (ต่อ)
 2. โครงสร้างทางใหม่ มีการขยายช่องจราจร (ต่อ)
 - ผลการคำนวณค่าตอบสนองของโครงสร้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อ (ต่อ)
 - Top of Base Layer; Compression Strain = 105.1 $\mu\epsilon$
 - Top of Subbase Layer; Compression Strain = 384.9 $\mu\epsilon$
 - Top of Subgrade Layer; Compression Strain = 375.3 $\mu\epsilon$
 - หลังจากนั้น นำค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่ง ไปคำนวณในสมการเพื่อหาค่า ESAL และเลือกค่าน้อยที่สุด เพื่อเป็นเกณฑ์สำหรับโครงสร้างนั้น ๆ
 - สำหรับโครงสร้างทางนี้ สามารถรับปริมาณจราจรได้ไม่เกิน 3.22×10^5 ESAL
- ผลการวิเคราะห์โครงสร้างถนนโดยทั่วไปขนาด 2 ช่องจราจร ของกรมทางหลวงชนบทพบว่า โครงสร้างทางและผิวทาง สามารถรองรับปริมาณรถบรรทุกได้ 300 ถึง 500 คันต่อวัน ที่ระยะเวลาการออกแบบใช้งาน 5 ถึง 7 ปี

ขอบคุณครับ/ค่ะ

