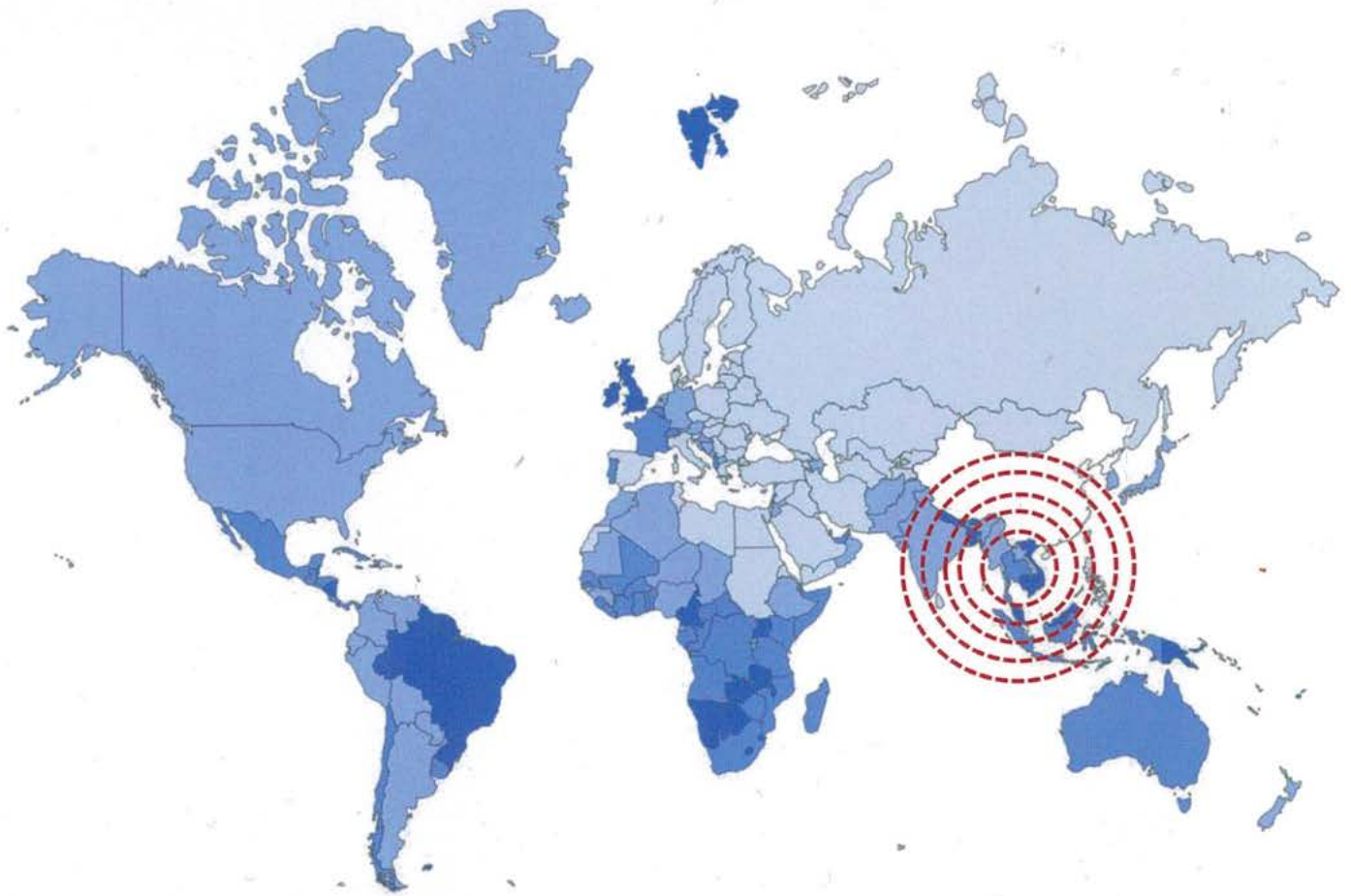




คู่มือ

การออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว



คณะกรรมการ และคณะทำงานคู่มือออกแบบสะพาน
และถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว

สิงหาคม 2559

คำนำ

สืบเนื่องจากกรณีเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด ๖.๓ M ซึ่งมีศูนย์กลางอยู่ในบริเวณอำเภอพาน จังหวัดเชียงราย เมื่อวันที่ ๕ พฤษภาคม ๒๕๕๗ สร้างความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือน และสิ่งปลูกสร้างต่างๆในพื้นที่ จ.เชียงราย ค่อนข้างมาก ในส่วนของถนนและสะพานในความรับผิดชอบของทางหลวง ได้มีการลงพื้นที่ตรวจสอบความเสียหายอย่างละเอียด โดยรัฐมนตรีว่าการกระทรวงคมนาคม และเจ้าหน้าที่ของกรมทางหลวง พบว่ามีถนนได้รับความเสียหาย เกิดรอยแยกและทรุดตัว จำนวน ๒ แห่ง ส่วนโครงสร้างสะพานบางแห่งที่อยู่ใกล้แนวศูนย์กลางแผ่นดินไหวได้รับความเสียหายเล็กน้อยในส่วนโครงสร้างส่วนบนซึ่งเกิดจากการขยับตัวกระทบกัน แต่ไม่พบความเสียหายต่อโครงสร้างหลัก

จากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นถึงแม้ว่างานถนนและสะพานในความรับผิดชอบของกระทรวงคมนาคมมิได้เกิดความเสียหายมากนัก โดยเฉพาะโครงสร้างหลักของสะพาน แต่ก็ป็นสัญญาณที่แสดงให้เห็นถึงความเสี่ยงต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวรุนแรงที่อาจจะเกิดขึ้นได้ และมีโอกาสเกิดความเสียหายมากกว่าที่เคยเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถนนและสะพานซึ่งเป็นสาธารณูปโภคที่มีความสำคัญหากเกิดความเสียหายจะทำให้เป็นอุปสรรคในการคมนาคมขนส่ง สร้างความเสียหายในวงกว้าง เพื่อเป็นการป้องกันและลดความเสี่ยงต่อความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นดังกล่าว รัฐมนตรีว่าการกระทรวงคมนาคมจึงได้สั่งการให้กรมทางหลวงแต่งตั้งคณะกรรมการและคณะทำงานโดยมีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้แก่ กรมทางหลวงชนบท การทางพิเศษแห่งประเทศไทย กรมโยธาธิการและผังเมือง และหน่วยงานจากภาคมหาวิทยาลัย ร่วมเป็นคณะกรรมการและคณะทำงาน เพื่อพิจารณาทบทวนและปรับปรุงแนวทางและหลักเกณฑ์ในการออกแบบถนนและสะพานให้สามารถรองรับแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวได้โดยไม่เกิดความเสียหายรุนแรง และให้จัดทำมาตรฐานคู่มือการออกแบบสะพานและถนนต้านแรงแผ่นดินไหว เพื่อให้หน่วยงานต่างๆสามารถนำไปใช้ปฏิบัติให้เป็นไปในแนวทางเดียวกัน

โดยปัจจุบันกฎกระทรวง ว่าด้วยข้อกำหนดการรับน้ำหนักความต้านทานความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคาร ในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550 อันมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 30 พฤศจิกายน 2550 ระบุให้ผู้คำนวณและออกแบบโครงสร้างอาคารที่อยู่ภายในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวจะต้องพิจารณาผลของแผ่นดินไหว โดยวิธีคำนวณต้องเป็นไปตามมาตรฐานว่าด้วยการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ที่สภาวิศวกรรองรับหรือจัดทำโดยส่วนราชการหรือนิติบุคคลที่มีคุณสมบัติตามที่กฎกระทรวงกำหนด โดยกฎกระทรวงดังกล่าวและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกันได้แก่ มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. 1302 ที่จัดทำและเผยแพร่โดยกรมโยธาธิการและผังเมือง ได้ให้ข้อเสนอแนะและขั้นตอนการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวได้อย่างค่อนข้างสมบูรณ์สามารถที่วิศวกรออกแบบสามารถนำไปวิเคราะห์และออกแบบอาคารในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้ อย่างไรก็ตามกฎกระทรวงและมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวในปัจจุบันยังไม่มี การให้ข้อเสนอแนะหรือขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างประเภทสะพานและถนนเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้อย่างครบถ้วนและเพียงพอต่อวิศวกรและผู้ออกแบบสามารถที่จะนำไปใช้อ้างอิงในการทำงาน



ดังนั้นการจัดทำคู่มือออกแบบนี้ จะช่วยให้ผู้คำนวณและออกแบบโครงสร้างสะพานและถนนสามารถนำไปใช้อ้างอิงและเป็นแนวทางปฏิบัติให้การออกแบบก่อสร้างสะพานและถนนเป็นไปตามหลักมาตรฐานสากล ซึ่งจะทำให้การก่อสร้างสะพานและถนนในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทยมีความมั่นคงแข็งแรง และเกิดความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนและความมั่นคงของประเทศต่อไป

คณะกรรมการและคณะทำงานคู่มือการออกแบบสะพานและถนนภายใต้แรงแผ่นดินไหว

สิงหาคม พ.ศ. 2559

คำนำ

สารบัญ

บทที่ 1 หลักเกณฑ์การออกแบบสะพานด้านทานแผ่นดินไหว

- 1.1 วัตถุประสงค์
- 1.2 ประเภทการวิเคราะห์และออกแบบ
- 1.3 ข้อกำหนดการใช้งานแนวทางการออกแบบฯ

บทที่ 2 แรงที่ใช้ในการออกแบบ

- 2.1 คาบแผ่นดินไหวและระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว
- 2.2 ประเภทของสะพานและความสำคัญของสะพานและประเภทของสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหว
- 2.3 การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวจากทิศทางต่างๆ
- 2.4 การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวกับแรงอื่นๆ

บทที่ 3 ข้อพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างสะพานด้านทานแผ่นดินไหว

- 3.1 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างสะพาน
- 3.2 ตัวประกอบปรับค่าผลตอบสนอง (Response Modification Factor)
- 3.3 การคำนวณหาผลตอบสนองภายในโครงสร้างเพื่อใช้ในการออกแบบ
- 3.4 แรงที่ใช้ออกแบบอุปกรณ์ยึดรั้งตามยาวของสะพาน
- 3.5 แรงที่ใช้ออกแบบอุปกรณ์เพื่อป้องกันการยกตัวของฐานรองรับสะพาน (Hold-Down Devices)
- 3.6 ข้อพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบสำหรับสะพานชั่วคราวและสะพานระหว่างการก่อสร้าง

บทที่ 4 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้านทานแผ่นดินไหว

- 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน
- 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Method)
- 4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีเชิงพลศาสตร์โดยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (Response Spectrum Analysis)
- 4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีเชิงพลศาสตร์เพื่อหาผลตอบสนองแบบประวัติเวลา (Time History Analysis Method)



**บทที่ 5 รายละเอียดการออกแบบโครงสร้าง การเสริมเหล็กและอุปกรณ์เพิ่มเติม
เพื่อเพิ่มความเหนียวและประสิทธิภาพของโครงสร้าง**

5.1 ทัวไป

5.2 พื้นที่แผ่นดินไหวระดับ 1 (Seismic Performance Zone 1)

5.3 พื้นที่แผ่นดินไหวระดับ 2 (Seismic Performance Zone 2A และ 2B)

5.4 พื้นที่แผ่นดินไหวระดับ 3 (Seismic Performance Zone 3)

**5.5 ตัวอย่างการให้รายละเอียดเหล็กเสริมในโครงสร้างสะพานในพื้นที่แผ่นดินไหวระดับ 1-3
(Seismic Performance Zone 1-3)**

บทที่ 6 แนวทางการออกแบบโครงสร้างชั้นทางของถนนเพื่อป้องกันแรงแผ่นดินไหว

6.1 ทัวไป

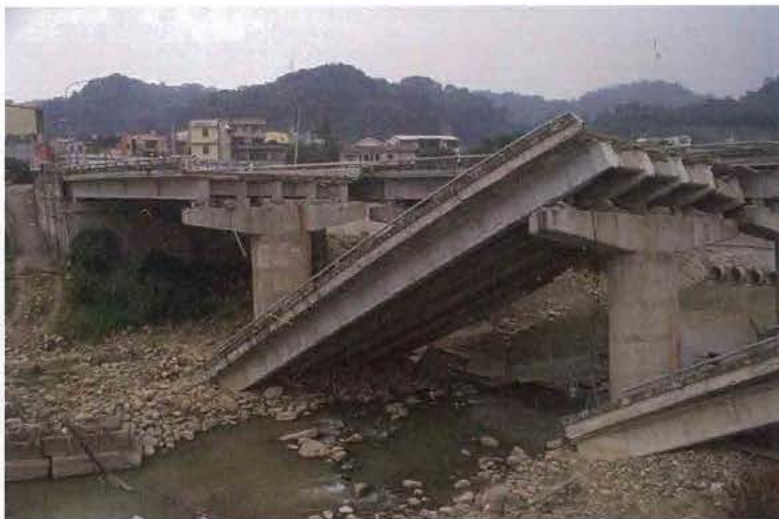
6.2 ความเสี่ยงทางธรณีวิทยาจากแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างชั้นทางและแนวทางออกแบบ

ภาคผนวก ก แนวทางการเลือกระบบโครงสร้างสะพานเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

ภาคผนวก ข แนวทางการสร้างแบบจำลองของระบบโครงสร้างสะพานโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ภาคผนวก ค แนวทางการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น
ของสะพานภายใต้แผ่นดินไหว

เอกสารอ้างอิง



บทที่ ๑

หลักเกณฑ์การออกแบบสะพานต้านทานแผ่นดินไหว

1.1 วัตถุประสงค์

เอกสารนี้เสนอแนวทางและวิธีการออกแบบสะพานต้านทานแรงแผ่นดินไหวสำหรับสะพานในประเทศไทย โดยในการออกแบบสะพานเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวนี้ได้อ้างอิงหลักการออกแบบสะพานตาม AASHTO LRFD Bridge Design Specification ฉบับปี ค.ศ. 2010 กำหนดให้สะพานทั่วไปที่ออกแบบโดยคู่มือนี้มีโอกาสที่จะวิบัติหลังเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ได้น้อยโดยยอมให้มีความเสียหายของสะพานได้มากในระดับที่อาจซ่อมแซมไม่ได้หรือมีความจำเป็นต้องก่อสร้างทดแทนบางส่วนหรือก่อสร้างใหม่ทั้งสะพาน อย่างไรก็ตามสะพานที่มีความสำคัญในระดับสูงเช่น ระดับที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงและภารกิจทางทหาร และ ระดับที่เกี่ยวข้องความปลอดภัยกับชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในประเทศ คู่มือนี้จะลดความเสียหายลงให้สามารถซ่อมแซมได้และสามารถเปิดใช้งานได้ในทันทีหรือภายหลังการซ่อมแล้ว จากความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของสะพานข้างต้นนั้นสะพานต้องมีความเหนียวเพียงพอที่ทำให้เกิดการเสียรูปและสลายพลังงานจากการสั่นไหวในช่วงพฤติกรรมหลังจุดครากได้ ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างสะพานจะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดการออกแบบการให้ความสำคัญกับส่วนประกอบของสะพาน ข้อต่อและวิธีการก่อสร้าง

1.2 ประเภทการวิเคราะห์และออกแบบ

การวิเคราะห์สะพานที่ใช้ในคู่มือนี้ได้แก่วิธีอีลาสติกเชิงเส้น (Linear Elastic Analysis) สำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิตศาสตร์และวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบหลายโหมด (Multi Mode Spectrum Analysis) สำหรับการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์



1.3 ข้อกำหนดการใช้งานแนวทางการออกแบบฯ

- 1.3.1 เอกสารนี้ได้กำหนดวิธีการคำนวณผลตอบแทนของสะพาน
- 1.3.2 ข้อกำหนดต่างๆในคู่มือนี้เป็นขั้นต่ำสุดที่จำเป็นต่อการออกแบบสะพานเพื่อให้สะพานมีความปลอดภัยและเพื่อจำกัดผลกระทบในรูปต่างๆจากแผ่นดินไหวที่มีต่อสะพานให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์มาตรฐานสากล
- 1.3.3 การใช้งานของคู่มือนี้ครอบคลุมถึงการออกแบบสะพานที่เป็นประเภททั่วไป ดังนี้
 - ก. สะพานพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Slab Bridge)
 - ข. สะพานพื้นคานสำเร็จรูปวางเรียงติดกัน (Adjacent Plank Beam Bridge)
 - ค. สะพานพื้นคานหน้าตัดรูปกล่องวางเรียงติดกัน (Adjacent Box Beam Bridge)
 - ง. สะพานพื้นคานหน้าตัดรูปกล่องหรือตัวไอวางห่างกัน (Spread Box or I Girder Bridge)
 - จ. สะพานหน้าตัดรูปกล่องหล่อสำเร็จหรือหล่อในที่ (Precast Segmental or Cast in Situ Box Girder Bridge)
 - ฉ. สะพานหน้าตัดรูปกล่องก่อสร้างแบบคานยื่นสมดุล (Balanced Cantilever Bridge)
 - ช. โครงสร้างส่วนล่างหรือตอม่อสะพานประเภท เสาเดี่ยว (Single Column) เสาหลายต้น (Multiple Column)
 - ซ. โครงสร้างส่วนล่างของสะพานเป็นลักษณะกำแพง (Wall Type Pier)
 - ณ. โครงสร้างส่วนล่างของสะพานเป็นลักษณะเข็มรับแรงดันข้าง (Pile Bent)

อย่างไรก็ตามเอกสารนี้ไม่ครอบคลุมการออกแบบเสริมกำลังหรือปรับปรุงประสิทธิภาพของสะพานเดิมหรือการออกแบบสะพานพิเศษที่ก่อสร้างใหม่ดังนี้

- ญ. สะพานขึง (Cable-Stayed Bridge)
- ฎ. สะพานแขวน (Suspension Bridge)
- ฏ. สะพานโครงถัก (Truss Bridge)
- ฐ. ทางลอดและอุโมงค์ (Underpass และ Tunnel)
- ท. สะพานที่ตั้งอยู่ใกล้รอยเลื่อนแผ่นดินไหวน้อยกว่า 10 กิโลเมตร
- ฒ. สะพานประเภทอาร์ค (Arch Bridge)



แรงที่ใช้ในการออกแบบ

2.1 คาบแผ่นดินไหว และระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว

2.1.1 คาบแผ่นดินไหว และระดับภัยแผ่นดินไหว

คาบแผ่นดินไหว (Return Period) ที่ใช้ในการออกแบบสะพานในคู่มือนี้มีค่าประมาณ 1,000 ปี ซึ่งเทียบเท่ากับโอกาสที่แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความรุนแรงที่ใช้ในการออกแบบสะพานนี้ 7% ภายในระยะเวลา 75 ปี

ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Acceleration Response Spectrum) สำหรับการออกแบบที่ใช้ประกอบการคำนวณหาค่าแรงในโครงสร้างสะพานในประเทศไทยให้อ้างอิงจากมาตรฐานการการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2552 (มยผ. 1302-52) หรือฉบับล่าสุด โดยมาตรฐานดังกล่าวได้ระบุความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบไว้แล้ว สำหรับการประมาณหาค่าของคาบการสั่นและวิธีการวิเคราะห์และออกแบบรวมทั้งการให้รายละเอียดความเหนียวของสะพานให้อ้างอิงตามเอกสารนี้

2.1.2 ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว (Seismic Ground Motion Values)

โครงสร้างสะพานเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวจะมีผลตอบสนองที่แตกต่างกันโดยจะขึ้นกับคาบธรรมชาติของโครงสร้าง แรงกระทำจะนำเสนอในรูปของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ขึ้นกับคาบธรรมชาติของโครงสร้างสอดคล้องกับ มยผ.1302-52 หรือ ฉบับล่าสุด



โดยมีค่าที่ใช้คือ S_{D1} คือค่าของผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของสะพานที่ใช้ในการออกแบบที่คาบการสั่นเท่ากับ 1.0 วินาที และ S_{D5} คือค่าของผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของสะพานที่ใช้ในการออกแบบที่คาบการสั่นเท่ากับ 0.2 วินาที

2.2 ประเภทของสะพานและความสำคัญของสะพานและประเภทของสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหว

คู่มือนี้ได้จำแนกประเภทของสะพานและความสำคัญของสะพานรวมทั้งประเภทของสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหวที่จำเป็นไว้ดังนี้

1. สะพานที่สำคัญที่สุด (Critical Bridges)
2. สะพานสำคัญ (Essential Bridges)
3. สะพานทั่วไป (Other Bridges)

สะพานที่สำคัญที่สุด (Critical Bridges) คือสะพานที่อยู่ในเส้นทางยุทธศาสตร์และเกี่ยวข้องกับความมั่นคงของประเทศ และใช้เป็นเส้นทางหลักเพื่อการช่วยเหลือ/อพยพฉุกเฉินเมื่อเกิดภัยพิบัติอย่างรุนแรง ตัวอย่างของสะพานประเภทนี้ ได้แก่ สะพานที่มีช่วงความยาวสะพานมากกว่า 120 เมตร สะพานเชื่อมต่อระหว่างพรหมแดนของประเทศ เป็นต้น

สะพานสำคัญ (Essential Bridges) คือสะพานที่อยู่ในเส้นทางสายหลักระหว่างจังหวัด ระหว่างสถานที่สำคัญและใช้เป็นเส้นทางเพื่อการช่วยเหลือ/อพยพฉุกเฉินเมื่อเกิดภัยพิบัติอย่างรุนแรง ตัวอย่างของสะพานประเภทนี้ ได้แก่ สะพานที่มีช่วงความยาวสะพานมากกว่า 60 เมตร สะพานที่อยู่ในโครงข่ายของทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง (Motorway) สะพานหรือทางยกระดับที่อยู่ในโครงข่ายของทางด่วน (Expressway) สะพานที่อยู่ในโครงข่ายของทางหลวงอาเซียน (ASEAN Highways) สะพานที่เป็นโครงข่ายของถนนที่รองรับปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันมากกว่า 1,000 คันต่อวัน เป็นต้น

สะพานทั่วไป (Other Bridges) คือสะพานที่ไม่เข้าข่ายสะพานประเภทที่สำคัญที่สุดและสะพานสำคัญ โดยเป็นสะพานที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงข่ายทางหลวง ทางหลวงชนบท ทางหลวงสัมปทาน

ทั้งนี้ประเภทของสมรรถนะด้านทานแรงแผ่นดินไหวของสะพานขึ้นกับผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมโดยจำแนกไว้ดังตารางที่ 2.2-1

ตารางที่ 2.2-1 ประเภทสมรรถนะด้านแรงแผ่นดินไหวที่สัมพันธ์กับผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม

ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (S_{D1})	ประเภทสมรรถนะด้านทานแรงแผ่นดินไหว
$S_{D1} \leq 0.15$	1
$0.15 < S_{D1} \leq 0.20$	2A
$0.20 < S_{D1} \leq 0.30$	2B
$0.30 < S_{D1} \leq 0.50$	3

โดยเพื่อให้เหมาะสมกับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวในประเทศไทย ประเภทของสมรรถนะด้านทานแรงแผ่นดินไหวของสะพาน (Seismic Performance Zone) ได้ปรับใช้เพียง 3 ระดับดังแสดงในตารางข้างต้น โดยสะพานที่มีค่าของผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมอยู่ในช่วงของสมรรถนะด้านทานแรงแผ่นดินไหวใด จะต้องออกแบบและวิเคราะห์ รวมทั้งให้รายละเอียดความเหนียวให้เหมาะสมตามประเภทของสมรรถนะนั้น โดยวิธีวิเคราะห์และออกแบบ รวมทั้งการให้รายละเอียดความเหนียวที่เหมาะสมได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

2.3 การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวจากทิศทางต่างๆ

การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวในทิศทางต่างๆ ที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานให้ดำเนินการดังนี้

1. ทิศทางของแรงแผ่นดินไหวที่พิจารณาการออกแบบต้องทำให้เกิดผลที่วิกฤติที่สุด
2. การรวมแรงในทิศทางที่ตั้งฉากกัน เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีแรงด้านข้างเทียบเท่า หรือ วิธีสเปกตรัมการตอบสนองเชิงโหมด โดยให้แรงในสองทิศทางที่ตั้งฉากกันซึ่งไม่ได้กระทำพร้อมกันให้รวมผลของแรงโดยใช้ 100% ของผลจากแรงในทิศทางหนึ่งกับ 30% ของผลจากแรงในทิศทางที่ตั้งฉากกันแล้วใช้ผลของแรงที่มากที่สุดในการออกแบบส่วนของโครงสร้างสะพานและฐานราก

2.4 การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวกับแรงอื่นๆ

การรวมผลของของแรงแผ่นดินไหวกับแรงอื่นๆ สำหรับส่วนประกอบของโครงสร้างสะพาน จะต้องพิจารณาร่วมกับแรงประเภทอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหว โดยการรวมผลแรงแผ่นดินไหวกำหนดไว้ดังนี้

1. สำหรับการออกแบบโดยวิธีกำลัง

การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวกับแรงอื่นๆ ด้วยตัวประกอบแรง (Load Factor) ตามตารางที่ 2.4-1



ตารางที่ 2.4-1 ค่า Load Factor สำหรับคูณปรับค่าแรงต่างๆที่ใช้ในการรวมผลแบบเชิงเส้น

LOAD COMBINATION LIMIT STATE	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	EQ
EXTREME EVENT I	γ_p	γ^{EQ}	1.00	—	—	1.00	—	—	—	1.00
SERVICE EQ	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	0.70

โดยที่ แรงที่ใช้ในการออกแบบสะพานตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ได้แก่

- DC คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักสะพานและวัสดุ,
- DD คือแรงเนื่องจาก Down Drag,
- DW คือแรงเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุปูผิวพื้นสะพานและอุปกรณ์ประกอบสะพาน,
- EH คือแรงเนื่องจากแรงดันดินด้านข้าง,
- EV คือแรงดันดินในแนวตั้ง,
- ES คือแรงแผ่กระจายของดิน,
- EL คือแรงเนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างและผลของ secondary effect ของลวดอัดแรง,
- PS คือแรงเนื่องจากลวดอัดแรง,
- CR คือแรงเนื่องจากการคืบ,
- SH คือแรงเนื่องจากการหดตัว,
- LL คือแรงเนื่องจากน้ำหนักจร,
- IM คือแรงเนื่องจากการกระทบ,
- CE คือแรงเนื่องจากการหนีศูนย์กลางของน้ำหนักจร,
- BR คือแรงเนื่องจากการหยุดของยานพาหนะ,
- PL คือแรงเนื่องจากผู้ใช้สะพาน,



- LS คือแรงแผ่กระจายเนื่องจากยานพาหนะ,
- WA คือแรงเนื่องจากน้ำและกระแสน้ำ,
- WS คือแรงลมกระทำต่อโครงสร้าง,
- WL คือแรงลมกระทำต่อยานพาหนะบนสะพาน,
- FR คือแรงเสียดทาน,
- TU คือแรงหรือการเคลื่อนตัวเนื่องจาก Uniform Temperature,
- TG คือแรงหรือการเคลื่อนตัวเนื่องจาก Temperature Gradient,
- SE คือการทรุดตัว,
- EQ คือแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว

โดยค่าของ γ^{EQ} ที่ใช้ในการปรับค่าเนื่องจาก น้ำหนักบรรทุกจร ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว แนะนำให้
ใช้ไม่น้อยกว่า 0.50



บทที่ ๓

ข้อพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างสะพานต้านทานแผ่นดินไหว

3.1 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างสะพาน

ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างสะพานเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในคู่มือนี้ได้กำหนดไว้ดังนี้

1. พิจารณาดำเนินการที่ตั้งสะพานและประเภทของชั้นดิน
 2. สร้างค่าของสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบสะพาน
 3. กำหนดประเภทของสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวของสะพาน (Seismic Performance Zone 1,2,3)
 4. พิจารณาลักษณะของโครงสร้างสะพานและคำนวณตัวประกอบลดผลตอบสนอง (Response Modification Factor)
 5. พิจารณาความสำคัญและลักษณะของโครงสร้างสะพานและกำหนดวิธีการวิเคราะห์โครงสร้าง
 6. คำนวณหาค่าของแรงภายในและค่าของการเคลื่อนตัวของสะพาน
 7. รวมแรงภายในของสะพานเนื่องจากแผ่นดินไหวในทิศทางตามยาวและตามขวางของสะพาน
 8. รวมแรงแผ่นดินไหวกับแรงประเภทอื่นๆตามสภาวะขีดจำกัดที่กำหนด
 9. นำแรงภายในและการเคลื่อนตัวตามสภาวะขีดจำกัดไปทำการออกแบบโครงสร้างสะพาน
 10. ให้รายละเอียดการเสริมเหล็กเพิ่มความเหนียวและอุปกรณ์ป้องกันโครงสร้างต่างๆจาก
- ขั้นตอนข้างต้น สรุปได้ดังรูปที่ 3.2-1

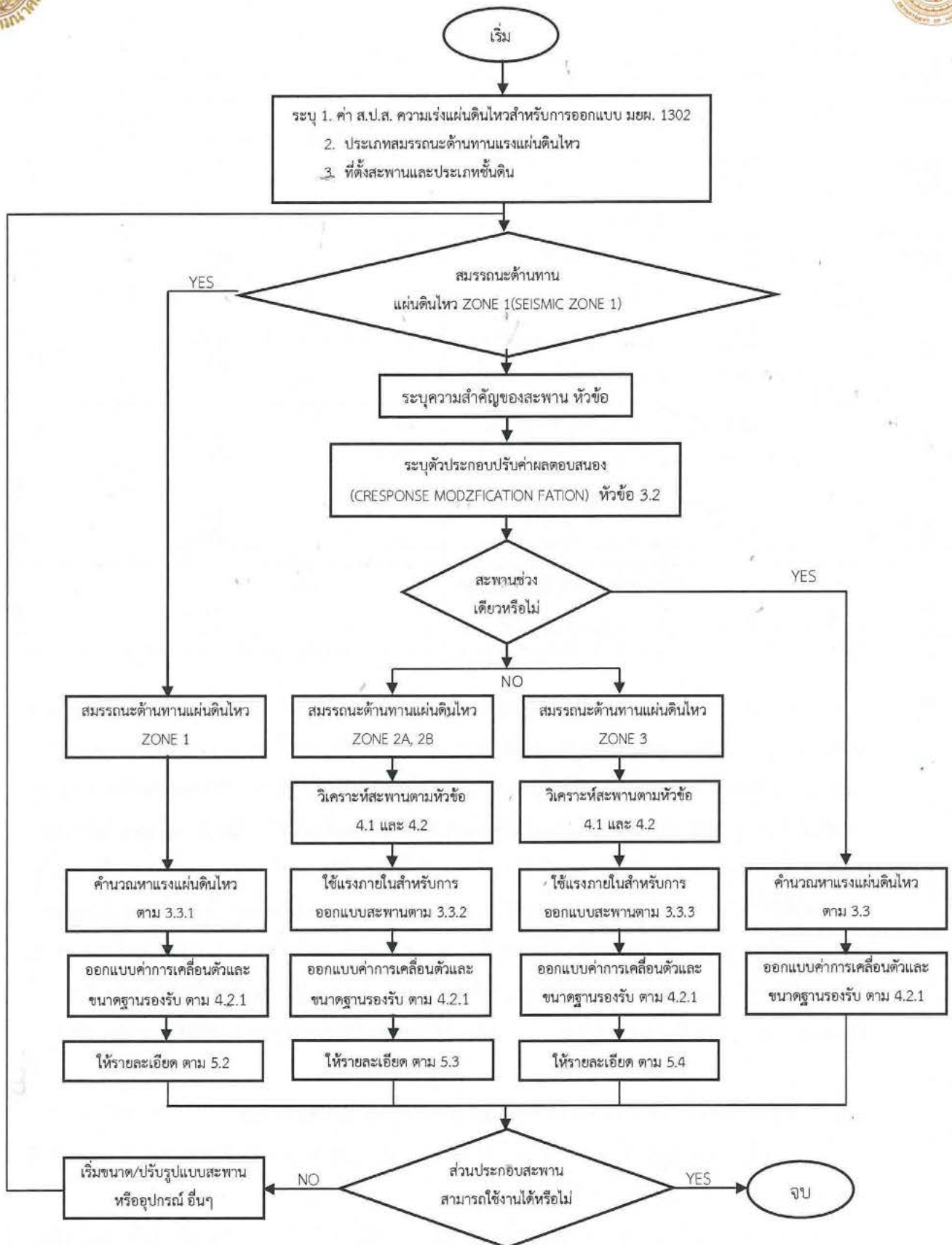


3.2 ตัวประกอบปรับค่าผลตอบสนอง (Response Modification Factor)

ในการออกแบบสะพานเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในระดับต่าง ๆ นั้นเป็นที่ทราบกันว่าหากออกแบบให้สะพานมีพฤติกรรมที่ไม่ถึงจุดครากหรือไม่มีความเสียหายภายหลังการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ย่อมเป็นการไม่ประหยัด ดังนั้นส่วนประกอบของโครงสร้างสะพานบางส่วนเช่น เสาหรือคานจะถูกออกแบบให้ยอมให้เกิดความเสียหายที่ควบคุมได้ภายหลังการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ โดยการลดทอนผลตอบสนองจากแผ่นดินไหวด้วยตัวประกอบปรับค่าผลตอบสนอง จะเป็นค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง อย่างไรก็ตามค่าของตัวประกอบปรับค่าผลตอบสนองสำหรับรอยต่อของสะพานเช่นแผ่นยางรองรับสะพาน รอยต่อคานเสา, รอยต่อระหว่างเสาเชื่อมกับฐานราก จะใช้ค่าการลดทอนที่น้อยลงซึ่งยอมให้เกิดความเสียหายในระดับที่น้อยกว่าหรือในบางกรณีไม่ยอมให้เกิดความเสียหายต่อรอยต่อของสะพานต่างๆ

ตาราง 3.2-1ก แสดงค่าของ R-Factor สำหรับโครงสร้างส่วนล่าง

ประเภทโครงสร้างส่วนล่าง	ลำดับความสำคัญของสะพาน		
	สะพานที่สำคัญที่สุด	สะพานสำคัญ	สะพานทั่วไป
ตอม่อแบบกำแพงด้านแกนแข็ง (Wall type piers)	(Critical Bridges)	(Essential Bridges)	Other Bridges
	1.5	1.5	2.0
ตอม่อตักเสาเข็ม (Reinforced Concrete Pile Bents) ก. เสาเข็มตอกในแนวตั้ง (Vertical Pile Only) ข. เสาเข็มตอกเอียง (With Batter Piles)	1.5	2.0	3.0
	1.5	1.5	2.0
	1.5	2.0	3.0
ตอม่อเสาเดี่ยว (Single Columns)	1.5	2.0	3.0
ตอม่อตักเสาเข็มหน้าตัดเหล็กรูปพรรณหรือหน้าตัดคอมโพสิต เหล็กรูปพรรณและคอนกรีต (Steel or Composite Steel and Concrete Pile Bents) ก. เสาเข็มตอกในแนวตั้ง (Vertical Pile Only) ข. เสาเข็มตอกเอียง (With Batter Piles)	1.5	3.5	5.0
	1.5	2.0	3.0
	1.5	3.5	5.0
ตอม่อเสาคู่หรือหลายเสา (Multiple Column Bents)	1.5	3.5	5.0



รูปที่ 3.2-1 แสดง Flowchart ขั้นตอนการออกแบบสะพานต้านทานแรงแผ่นดินไหว



ตาราง 3.2-1ข แสดงค่าของ R-Factor สำหรับรอยต่อสะพาน

ประเภทของรอยต่อ (Connection)	ทุกลำดับความสำคัญของสะพาน (All Operational Categories)
รอยต่อระหว่างโครงสร้างส่วนบนกับตอม่อริม (Superstructure to Abutment)	0.8
รอยต่อเพื่อการขยายตัวภายในช่องความยาวสะพาน (Expansion Joints within a Span of the Superstructure)	0.8
รอยต่อระหว่างเสา, ตอม่อสะพาน หรือต๊อปตอม่อ เสาเข็ม กับ คานรัด หัวเสา หรือ โครงสร้างส่วนบน (Columns, Piers, or Pile Bents to Cap Beam or Superstructure)	1.0
รอยต่อระหว่าง เสา หรือตอม่อสะพาน กับฐานราก (Columns or Piers to Foundations)	1.0

การนำค่า R-Factor ไปใช้ในการลดทอนแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทางหลักของสะพานเช่นในทิศทางตามยาว (Longitudinal Direction) และ ตามขวาง (Transverse Direction) ของสะพานกรณีสะพานอยู่ในแนวตรง สำหรับสะพานที่อยู่ในแนวโค้งราบทิศทางหลักของสะพานขึ้นกับการกำหนดทิศของฐานรองรับสะพานซึ่งอาจเป็นทิศของเส้นตรงเชื่อมต่อกับตอม่อริม เป็นต้น โดยในแต่ละทิศทางหลักของสะพานให้พิจารณาลักษณะของพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานในทิศทางนั้นๆ เพื่อกำหนดใช้ค่า R-Factor ที่เหมาะสมเช่นกรณี wall type pier ค่า R-Factor ในทิศทางตามยาวของสะพานจะพิจารณาเป็นเสาหากอยู่ในด้านแกนอ่อน (weak direction) ของ pier ส่วนในทิศทางตามขวางของสะพานนั้นค่า R-Factor จะพิจารณาเป็นของ wall type pier ซึ่งอยู่ในด้านแกนแข็ง (Strong Direction) ของ Pier ซึ่งจะพบว่าค่าของ R-Factor กรณีเสามีค่าสูงกว่ากรณี wall type pier เป็นต้น

3.3 การคำนวณหาผลตอบสนองภายในโครงสร้างเพื่อใช้ในการออกแบบ

การคำนวณหาผลตอบสนองภายในโครงสร้างเพื่อใช้ในการออกแบบสำหรับสะพานความยาวช่วงเดียว (Single Span Bridges) กำหนดให้ดังนี้

1. แรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบฐานรองรับหรือการยึดรั้งของสะพานช่วงเดียวจะต้องไม่น้อยกว่าค่าของสเปกตรัมการตอบสนองของสะพานตามหัวข้อ 2.1.1 กับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานที่เกี่ยวข้อง (Tributary Permanent Load)



2. ความยาวของฐานรองรับของสะพานช่วงเดียวจะต้องออกแบบตามหัวข้อ 4.2.2
3. ผลของแรงดันดินด้านข้างกรณีที่มีต่อม่อริมของสะพานช่วงเดียวเป็นกำแพงกันดิน (Retaining Wall) หรือมีแป้นหูช้าง (Wing Wall) ให้พิจารณาในการออกแบบด้วย

สำหรับสะพานที่มีจำนวนช่วงหลายช่วง (Multiple Span Bridges) ให้ดำเนินการตามหัวข้อ 3.3.1 ถึง 3.3.3

3.3.1 โครงสร้างสะพานจำแนกตามสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหวประเภทที่ 1

1. กรณีที่ ค่าของสเปกตรัมการตอบสนองสำหรับการออกแบบน้อยกว่า 0.05 ให้ใช้ค่าของแรงแผ่นดินไหวที่ออกแบบในทิศทางยึดรั้งพิจารณาไม่น้อยกว่า 0.15 เท่าของแรงของฐานรองรับที่เกิดจาก น้ำหนักของโครงสร้าง (Tributary Permanent Load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Tributary Live Loads) $\times \gamma^{EQ}$
2. กรณี ค่าของค่าของสเปกตรัมการตอบสนองสำหรับการออกแบบน้อยกว่า 0.15 ให้ใช้ค่าของแรงแผ่นดินไหวที่ออกแบบในทิศทางยึดรั้งที่พิจารณาไม่น้อยกว่า 0.25 เท่าของแรงของฐานรองรับที่เกิดจาก น้ำหนักของโครงสร้าง (Tributary Permanent Load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Tributary Live Loads) $\times \gamma^{EQ}$
3. การยึดรั้งของฐานรองรับประเภทแผ่นยางธรรมชาติหรือแผ่นยางเสริมเหล็ก (Elastomeric Bearing) ของสะพานไม่ให้นำมาพิจารณาเนื่องจากการยืดหยุ่นตัวของแผ่นยางประเภทนี้ ดังนั้นต้องออกแบบการยึดรั้งโดยอุปกรณ์อื่นเพิ่มเติม
4. ความยาวระหว่างรอยต่อของสะพานในแนวยาวของโครงสร้างสะพานส่วนบนให้นำมาคำนวณเป็นน้ำหนักของโครงสร้าง (Tributary Permanent Load) สำหรับการออกแบบฐานแบบยึดรั้งตามแนวยาวของสะพาน (Fixed Bearing)
5. การออกแบบการยึดรั้งของสะพานในแนวขวาง (Transverse) ของฐานรองรับสะพาน ให้ใช้แรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับนั้นเนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้าง (Permanent Load Reaction)

3.3.2 โครงสร้างสะพานจำแนกตามสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหวประเภทที่ 2A และ 2B

1. ให้วิเคราะห์สะพานที่อยู่ในสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหวนี้ ตามหัวข้อ 4.2
2. แรงภายในของสะพานของโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่างที่ใช้ในการออกแบบแผ่นดินไหว จะต้องพิจารณาจากสเปกตรัมตอบสนองในหัวข้อที่ 2.1.1 และค่าของ R-Factor (Response Modification Factor) ในหัวข้อที่ 3.2



3. แรงที่ใช้ออกแบบฐานรากของสะพานประเภทใดๆ ยกเว้นประเภท ฐานรากของเสาเข็มตลับ (Pile Bent) และ กำแพงกันดิน (Retaining Wall) ให้ใช้สเปกตรัมตอบสนองในหัวข้อที่ 2.1.1 และครึ่งหนึ่งของค่า R-Factor (Response Modification Factor) ในหัวข้อที่ 3.2 นอกจากนั้นค่าของ R/2 จะต้องไม่น้อยกว่า 1.0
4. ในกรณีที่ ผลรวมของแรง (Load Combination) ที่พิจารณาตัวคูณเพิ่มค่า (Factored Load) แล้วตามขีดจำกัดอื่น (Other Limit States) มีค่ามากกว่าค่าของแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (Extreme Event Limit States) ให้ออกแบบฐานรากของสะพานโดยพิจารณาผลของ ตัวคูณเพิ่มกำลังของวัสดุ Over Strength ของเสาหรือตอม่อ

ตาราง 3.3-1 แสดงค่าของตัวคูณเพิ่มกำลังของวัสดุ (Over Strength) ของวัสดุก่อสร้างของเสาและตอม่อที่ใช้ในการคำนวณหา กำลังของหน้าตัด

กรณีของกำลังครากของเหล็ก (f_y)	$1.25f_y$
กรณีของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน (f'_c)	$1.50f'_c$
กรณีของความเครียดของคอนกรีตที่สภาวะประลัย ϵ_c	0.01

3.3.3 โครงสร้างสะพานจำแนกตามสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวประเภทที่ 3

1. ให้วิเคราะห์สะพานที่อยู่ในสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวนี้ ตามหัวข้อ 4.2
2. แรงภายในของสะพานของโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่างที่ใช้ในการออกแบบแผ่นดินไหว จะต้องพิจารณาจากสเปกตรัมตอบสนองในหัวข้อที่ 2.1.1 และค่าของ R-Factor (Response Modification Factor) ในหัวข้อที่ 3.2
3. แรงที่ใช้ออกแบบฐานรากของสะพานประเภทใดๆ ยกเว้นประเภท ฐานรากของเสาเข็มตลับ (Pile Bent) และ กำแพงกันดิน (Retaining Wall) ให้ใช้สเปกตรัมตอบสนองในหัวข้อที่ 2.1.1 และ ~~หนึ่ง~~ ^{ค่า} ~~ค่า~~ ^{ของ} ค่า R-Factor (Response Modification Factor) ในหัวข้อที่ 3.2

หลังจากออกแบบโครงสร้างสะพานจากขั้นตอนข้างต้นแล้วให้พิจารณาผลของ Plastic Hinge ที่อาจเกิดขึ้นในเสาตอม่อของสะพานเพิ่มเติม โดยตำแหน่งของ Plastic Hinge อาจอยู่ที่ด้านบน และ/หรือ ด้านล่างของเสาตอม่อสะพาน โดยควรเป็นตำแหน่งที่สามารถตรวจพบและซ่อมแซมได้ง่าย การคำนวณหา ค่าของกำลังของหน้าตัดของเสาตอม่อสะพานให้ดำเนินการตามบทที่ 5 สำหรับขั้นตอนการพิจารณา Plastic Hinge ในโครงสร้างส่วนล่างต่างๆแสดงดังนี้



3.3.3.1 กรณีตอม่อเสาเดี่ยว (Single Columns and Piers)

1. ให้พิจารณาแรงที่ใช้ในการออกแบบในแกนแข็งและอ่อนของเสา
2. ให้พิจารณาแรงในทิศทางอ่อนของตอม่อ

ขั้นตอน ที่ 1 คำนวณหาค่าของ Overstrength Moment Resistance ของเสา โดยแรงตามแนวแกนของเสาให้ใช้ค่าจาก Extreme Event Limit State

ขั้นตอนที่ 2 นำค่าของ Overstrength Moment Resistance ของเสาไปคำนวณหาค่าของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสา กรณีที่เสาที่ออกแบบมีการขยายหน้าตัดเพิ่มขึ้นที่ปลายให้พิจารณา Moment Resistance ที่ปลายบนและล่างของเสาด้วย นอกจากนั้นกรณีที่ฐานรากของตอม่ออยู่ต่ำลงไปจากระดับผิวดินมากให้พิจารณากรณีที่อาจเกิด Plastic Hinge มากกว่าหนึ่งตำแหน่ง เหนือระดับของฐานรากด้วยโดยความยาวของเสาที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงเฉือนให้ใช้ระยะระหว่าง Plastic Hinge

สรุปแรงที่ใช้ในการออกแบบเสาเดี่ยวภายหลังการเกิด Plastic Hinges

- i. แรงตามแกน (Axial Forces) ให้ใช้ค่าจาก Extreme Event Limit State
- ii. โมเมนต์ดัด (Moments) ใช้จากขั้นตอนที่ 1
- iii. แรงเฉือน (Shear Forces) ใช้จากขั้นตอนที่ 2

3.3.3.2 กรณีตอม่อเสาคู่หรือหลายเสา (Double or Multiple Columns and Piers)

1. แรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับตอม่อหรือตามยาวของสะพานให้ใช้วิธีกรณีเสาเดี่ยว (Single Column)
2. แรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในทิศทางของตอม่อหรือตามขวางของสะพาน ดำเนินการดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่าของ Overstrength Moment Resistance ของเสา โดยแรงตามแนวแกนของเสาให้ใช้ค่าจาก Extreme Event Limit State โดยที่ใช้ค่าของ EQ เท่ากับ 0

ขั้นตอนที่ 2 นำค่าของ Overstrength Moment Resistance ของเสาจากขั้นตอนที่ 1 นำไปหาค่าของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาแต่ละต้นในตอม่อ และนำแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแต่ละเสาไปรวมกันเพื่อหาค่าของแรงเฉือนสูงสุดของตอม่อ ในกรณีที่ตอม่อเสาดับมีบางส่วนเป็นกำแพงให้ใช้ความยาวของเสาที่ไม่รวมกำแพงในการคำนวณหาแรงเฉือน เสา กรณีที่เสาที่ออกแบบมีการขยายหน้าตัดเพิ่มขึ้นที่ปลายให้พิจารณา Moment Resistance ที่ปลายบนและล่างของเสาด้วย



ขั้นตอนที่ 3

กรณีที่เป็นตอม่อสะพานแบบตบเสาเข็ม (Pile Bent) ให้ใช้ความยาวเสาส่วนที่เหนือผิวดินในการคำนวณแรงเฉือน

นำค่าของแรงเฉือนรวมของตบตอม่อกระทำที่ศูนย์กลางมวลของโครงสร้างส่วนบนเหนือตอม่อเพื่อหาค่าของแรงในแนวแกนของเสาเนื่องจากโมเมนต์พลิกคว่ำ (Overturning Moment) ในขณะที่ Plastic Hinges เกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4

นำค่าของแรงในแนวแกนของเสาในขั้นตอนที่ 3 เป็นค่าที่ใช้ออกแบบเสาตาม Extreme Event Limit States และนำไปคำนวณหาค่าของ Overstrength Moment Resistance ของเสา ใหม่ และนำไปหาค่าของแรงเฉือนในตบตอม่ออีกครั้งตามขั้นตอนที่ 2 และหากแรงเฉือนในตบตอม่อที่คำนวณใหม่นี้ ต่างจากค่าที่คำนวณก่อนหน้านี้เกิน 10% ให้ดำเนินการซ้ำในขั้นตอนที่ 3

สรุปแรงที่ใช้ในการออกแบบตอม่อเสาคู่หรือหลายเสาหรือภายหลังการเกิด Plastic Hinges

- แรงตามแกน (Axial Forces) ให้ใช้ค่าจาก Extreme Event Limit State ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ภายหลังที่แรงเฉือนในตบตอม่อไม่มีความแตกต่างกันเกิน 10% แล้ว
- โมเมนต์ดัด (Moments) ใช้จากขั้นตอนที่ 4 ภายหลังที่แรงเฉือนในตบตอม่อไม่มีความแตกต่างกันเกิน 10% แล้ว
- แรงเฉือน (Shear Forces) ใช้จากขั้นตอนที่ 2 ภายหลังที่แรงเฉือนในตบตอม่อไม่มีความแตกต่างกันเกิน 10% แล้ว

3.3.3.3 กรณีตอม่อตบเสาเข็ม (Columns and Pile Bent)

แรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบตอม่อตบเสาเข็มให้ใช้ค่าน้อยกว่าระหว่างแรงภายในที่ได้จากค่าสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบที่ได้ปรับค่าโดยใช้ R-Factor แล้ว กับค่าที่ได้จากการพิจารณาผลของ Plastic Hinge สรุปได้ดังนี้

- แรงตามแกน (Axial Forces) ให้ใช้ค่าจากสูงสุดและต่ำสุดที่ได้จาก Extreme Event Limit State ที่ใช้ค่า EQ จาก i) ค่าสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบที่เป็นอีลาสติก (ไม่หารค่า R-Factor) ที่พิจารณาทิศทางแผ่นดินไหวตามหัวข้อ 2.3 หรือ ii) ค่าแรงตามแกนที่เกิดขึ้นในขณะที่ Plastic Hinge เกิดขึ้นในเสาของตอม่อตบเสาเข็ม
- โมเมนต์ดัด (Moments) จาก Extreme Event Limit State ที่ใช้ค่า EQ จากค่าสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบที่เป็นอีลาสติก (หารค่า R-Factor) ที่พิจารณาทิศทางแผ่นดินไหวตามหัวข้อ 2.3

3. แรงเฉือน (Shear Forces) ให้ใช้ค่าที่น้อยกว่าระหว่างค่าที่ได้จาก Extreme Event Limit State ที่ใช้ค่า EQ จาก i) ค่าสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบที่สมมติให้เสาเป็นอีลาสติก (ค่า R-Factor เท่ากับ 1.0) ที่พิจารณาทิศทางแผ่นดินไหวตามหัวข้อ 2.3 หรือ ii) ค่าแรงตามแกนที่เกิดขึ้นในขณะที่ Plastic Hinge เกิดขึ้นในเสาของตอม่อดับเสาเข็ม

3.3.3.4 กรณีตอม่อแบบกำแพง (Pier)

1. แรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบตอม่อแบบกำแพงในด้านแกนแข็งของตอม่อ (Strong Axis) ให้ใช้ค่าที่แรงภายในที่ได้จากค่าสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบที่ได้ปรับค่าโดยใช้ R-Factor เท่ากับ 2.0 ที่พิจารณาทิศทางแผ่นดินไหวตามหัวข้อ 2.3
2. แรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบตอม่อแบบกำแพงในด้านแกนอ่อนของตอม่อ (Weak Axis) ให้ใช้การออกแบบตามกรณีตอม่อดับเสาเข็ม (Column and Pile Bent)

3.3.3.5 กรณีแรงที่ใช้ในการออกแบบฐานรากสะพาน

แรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบฐานรากสะพาน เช่น ฐานราก (Footing) เสาเข็มต่างๆ (Piles) ให้ใช้ค่าที่มากกว่าระหว่าง Extreme Event Limit State ที่ใช้ค่า EQ จากค่าสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบที่เป็นอีลาสติก (ไม่หารค่า R-Factor) ที่พิจารณาทิศทางแผ่นดินไหวตามหัวข้อ 2.3 กับ ค่าแรงภายในที่เกิดขึ้นในขณะที่ Plastic Hinge เกิดขึ้นในเสาหรือของตอม่อสะพาน

3.4 แรงที่ใช้ออกแบบอุปกรณ์ยึดรั้งตามยาวของสะพาน

แรงที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ยึดรั้งตามยาวของสะพานระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว เช่น Cable Restraints, Seismic Buffer, Fixed Bearing หรืออุปกรณ์ลักษณะเดียวกันประเภทอื่นๆ ให้พิจารณาดังนี้

1. แรงเสียดทานระหว่างผิววัสดุก่อสร้างของสะพาน ไม่ให้พิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ยึดรั้งตามยาวของสะพาน
2. แรงที่ใช้ในการออกแบบให้พิจารณาจาก ค่าของสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบ คูณกับน้ำหนักหรือแรงคงที่ของโครงสร้างสะพาน ในกรณีที่มียาน้ำหนักจากสะพานแต่ละด้านของตอม่อให้น้ำหนักด้านที่เบาว่าในการออกแบบ
3. ในกรณีที่มีการยอมให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างโครงสร้างส่วนบนกับโครงสร้างส่วนล่างหรือระหว่างโครงสร้างส่วนบนด้านกัน เช่น การเคลื่อนตัวเนื่องจากอุณหภูมิ การหดตัว หรือการคืบของคอนกรีตรวมทั้งผลของ Relaxation ของลวดอัดแรง ให้พิจารณาให้อุปกรณ์ยึดรั้งตามยาวของสะพานยอมให้เกิดการเคลื่อนตัวนี้ด้วย



4. อุปกรณ์การยึดรั้งควรออกแบบให้ติดตั้งที่บริเวณต่อมอของสะพานโดยหลีกเลี่ยงการยึดรั้งของอุปกรณ์ระหว่างโครงสร้างส่วนบน
5. ในกรณีที่ออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ที่ต้านทานแผ่นดินไหวตามอัตราเร่งที่เกิดขึ้นของสะพาน (STU: Shock Transmission Unit) ให้ออกแบบโดยใช้ค่าที่มากกว่าระหว่างแรงอิลาสติกจากสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบกับค่าที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิด Plastic Hinges ของโครงสร้างส่วนล่างของสะพาน

3.5 แรงที่ใช้ออกแบบอุปกรณ์เพื่อป้องกันการยกตัวของฐานรองรับสะพาน (Hold-Down Devices)

1. สะพานที่ถูกจำแนกตามสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวประเภทที่ 2A และ 2B หรือ 3 ให้พิจารณาอุปกรณ์เพื่อป้องกันการยกตัวของฐานรองรับสะพานเนื่องจากแรงยก (Uplift) ระหว่างเกิดแผ่นดินไหว หากแรงในแนวดิ่งที่ฐานรองรับเนื่องจากแผ่นดินไหวในแนวนอนเกินกว่า 50% แต่ไม่เกิน 100% แรงในแนวดิ่งที่ฐานรองรับเนื่องจากน้ำหนักถาวรของสะพาน
2. แรงที่ใช้ออกแบบอุปกรณ์เพื่อป้องกันการยกตัวของสะพานใช้เท่ากับ 10% ของแรงในแนวดิ่งที่ฐานรองรับเนื่องจากน้ำหนักถาวรของสะพาน
3. ข้อกำหนดนี้ไม่ยอมให้แรงยกตัวระหว่างเกิดแผ่นดินไหวสูงกว่าแรงในแนวดิ่งที่ฐานรองรับเนื่องจากน้ำหนักถาวรหรือการเกิด Uplift

3.6 ข้อพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบสำหรับสะพานชั่วคราวและสะพานระหว่างการก่อสร้าง สะพานชั่วคราวและสะพานระหว่างการก่อสร้างที่พิจารณาในหัวข้อนี้มีอายุการใช้งานน้อยกว่า 5 ปี โดยหากอายุการใช้งาน 5 ปีขึ้นไปให้พิจารณาออกแบบเป็นโครงสร้างถาวรเพื่อรองรับแผ่นดินไหว นอกจากนั้นหัวข้อนี้ไม่ครอบคลุมถึงโครงสร้างชั่วคราวที่ก่อสร้างใกล้รอยเลื่อนแผ่นดินไหวน้อยกว่า 10 กิโลเมตร

แรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างสะพานชั่วคราวหรือระหว่างการก่อสร้างให้สามารถลดทอนโดยใช้ค่าของ R-Factor (Response Modification Factor) ที่เพิ่มค่าขึ้นจากค่าในตารางได้อีก 1.5 เท่า สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพาน ไม่รวมถึงรอยต่อของสะพาน นอกจากนั้นค่าของความยาวฐานรองรับที่ใช้ในการออกแบบให้เป็นไปตามหัวข้อ 4.2.2



การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานต้านทานแผ่นดินไหว

4.1 วิธีวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานภายใต้แรงแผ่นดินไหวตามเอกสารนี้เป็นการแนะนำวิธีการและขั้นตอนอย่างน้อยที่สุดที่สะพานที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวควรถูกออกแบบและวิเคราะห์โดยตารางที่ 4.1-1 แสดงวิธีการวิเคราะห์ที่ควรดำเนินการสำหรับสะพานในแต่ละประเภท

ตารางที่ 4.1-1 แสดงวิธีการขั้นต่ำสำหรับการวิเคราะห์สะพานประเภทต่างๆภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ประเภทสมรรถนะ ต้านทาน แรงแผ่นดินไหว (SEISMIC ZONE)	สะพานช่วงเดียว (Simple Span)	สะพานต่อเนื่องมากกว่า 1 ช่วง (Multiple Spans Bridges)					
		สะพานทั่วไป		สะพานสำคัญ		สะพานที่สำคัญที่สุด	
		ปกติ	ไม่ปกติ	ปกติ	ไม่ปกติ	ปกติ	ไม่ปกติ
1	ไม่ต้องวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหว*	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*
2 A	ไม่ต้องวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหว*	SM/UL	SM	SM/UL	MM	MM	MM
2 B	ไม่ต้องวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหว*	SM/UL	MM	MM	MM	MM	MM
3	ไม่ต้องวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหว*	SM/UL	MM	MM	MM	MM	TH



หมายเหตุ

- 1) *ให้พิจารณาออกแบบ Seismic Buffer หรืออุปกรณ์อื่นๆ ด้านแรงแผ่นดินไหว ที่ออกแบบโดยใช้หัวข้อ 3.3 เพิ่มเติม
- 2) SM = Single Mode Spectral Method
- UL = Uniform Load Method
- MM = Multimode Spectral Method
- TH = Time History Analysis Method

ข้อแนะนำเบื้องต้นในการวิเคราะห์สะพานแสดงดังนี้

1. สะพานที่ตั้งอยู่ในประเภทสมรรถนะด้านทานแรงแผ่นดินไหวของสะพาน (Seismic Performance Zone) ระดับที่ 1 ไม่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว และ ไม่ต้องพิจารณาประเภทความสำคัญของสะพาน (Operational Classification) หรือรูปแบบและรูปร่างของสะพาน อย่างไรก็ตามสะพานในประเภทสมรรถนะนี้จะต้องออกแบบให้มีความยาวของฐานรองรับตามหัวข้อ 4.1.2 และให้ออกแบบตามหัวข้อ 3.3.1
2. สะพานความยาวช่วงเดียว (Single Span Bridges) ที่เป็นลักษณะสะพานที่มีช่วงเดียวและรองรับโดยตอม่อตัวริมโดยไม่มีตอม่อกลาง สะพานลักษณะนี้ไม่ต้องทำการวิเคราะห์แรงเนื่องจากแผ่นดินไหวในทุกพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตาม แรงที่ถ่ายจากโครงสร้างส่วนบนไปยังตอม่อตัวริมจะต้องออกแบบให้รองรับโดยรอยต่อและฐานรองรับ ตามหัวข้อ 3.3.1 และความกว้างของตอม่อตัวริมจะต้องออกแบบให้ไม่น้อยกว่าค่าตามหัวข้อ 4.1.2
3. สะพานที่มีหลายช่วงความยาว (Multispan Bridges) ที่เป็นสะพานที่มีตอม่อกลางรับให้พิจารณาวิธีการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.1-1 โดยวิธีการวิเคราะห์ขั้นต่ำจะขึ้นกับ ประเภทสมรรถนะด้านทานแรงแผ่นดินไหวของสะพาน (Seismic Performance Zone) ประเภทความสำคัญของสะพาน (Operational Classification) รูปแบบและรูปร่างของสะพาน รวมทั้งจำนวนช่วงต่อของสะพาน
4. รูปแบบและรูปร่างของสะพานแบ่งเป็น 1) ปกติ (Regular) 2) ไม่ปกติ (Irregular) โดยสะพานรูปแบบปกติเป็นสะพานที่มีจำนวนช่วงต่อน้อยกว่า 7 ช่วง มีความสม่ำเสมอของน้ำหนัก (Weight Uniformity) ความแข็งเกร็ง (Stiffness Uniformity) รูปร่าง (Uniform Geometry) เป็นต้น ตารางที่ 4.1-2 แสดงการจำแนกประเภทของรูปแบบของสะพาน
5. สะพานที่มีลักษณะโค้งราบ (Curved Bridges) ที่เป็นลักษณะสะพานช่วงเดียวหลายช่วง (Multiple Simple Spans) จัดเป็นประเภท ไม่ปกติ (Irregular) หากมุมรองรับความยาวโค้งราบของสะพาน (Subtended Angle) มากกว่า 20 องศา ซึ่งจะต้องวิเคราะห์โดยวิธีเชิงพลศาสตร์ที่พิจารณาผลของโหมดของโครงสร้าง

6. สะพานที่มีลักษณะโค้งราบ (Curved Bridge) ที่เป็นลักษณะสะพานต่อเนื่องหลายช่วง (Curved Continuous Girder Bridge) สามารถวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองสะพานที่เป็นลักษณะตรงได้ (Straight Bridge) หากมีมุมรองรับความยาวโค้งราบของสะพาน (subtended angle) น้อยกว่า 90 องศาและมีจำนวนความยาวช่วงมากกว่า 2 โดยการจำลองสะพานตรงให้ใช้ความยาวสะพานในแบบจำลองเท่ากับความยาวส่วนโค้งของสะพาน (Arc Length)

ตารางที่ 4.1-2 แสดงเงื่อนไขของรูปแบบสะพานประเภทปกติ (Regular Bridges)

ปัจจัยที่พิจารณา	ค่าที่ยอมให้				
จำนวนช่วงต่อของสะพาน	2	3	4	5	6
มุมรองรับความยาวโค้งราบสูงสุดของสะพาน	90°	90°	90°	90°	90°
สัดส่วนของความยาวช่วงของสะพานที่ติดกันสูงสุด	3	2	2	1.5	1.5
สัดส่วนของค่าความแข็งแรงเชิงของตอม่อสะพานที่ติดกันสูงสุด (ไม่พิจารณาตอม่อริม)		4	4	3	2

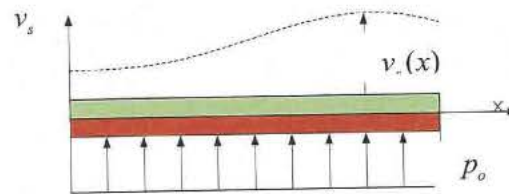
4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Method)

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานในทิศทางตามยาว (Longitudinal) และตามขวางของสะพาน (Transverse) โดยวิธีสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Method) ที่ใช้ในคู่มือนี้สามารถใช้ได้ 2 วิธีคือ

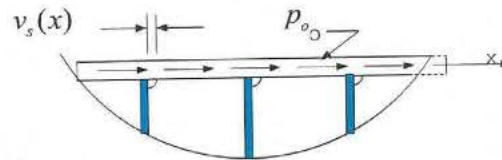
1) Single Mode Spectral Method (SM) และ 2) Uniform Load Method (UM)

วิธี Single Mode Spectral Method (SM) มีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณค่าของสมการการเคลื่อนตัวของสะพานตลอดความยาวของสะพาน $V_s(x)$ เนื่องจากแรงกระทำแบบสม่ำเสมอ p_0 ในทิศทางตามยาวและตามขวางของสะพาน



Plan View, Transverse Loading



Elevation View, Longitudinal Loading

รูปที่ 4.2-1 แสดงการหาสมการการเคลื่อนตัวของสะพานตามยาวและตามขวาง
2. คำนวณค่าพารามิเตอร์ α , β , γ ตามสมการต่อไปนี้

$$\alpha = \int v_s(x) dx \quad (4.2-1)$$

$$\beta = \int w(x) v_s(x) dx \quad (4.2-2)$$

$$\gamma = \int w(x) v_s^2(x) dx \quad (4.2-3)$$

3. คำนวณค่าของคาบการสั่นของโครงสร้างในทิศทางขวางและยาวของสะพานตามสมการต่อไปนี้

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{p_o g \alpha}} \quad (4.2-4)$$

4. คำนวณหาค่าของแรงสถิตเทียบเท่าของแรงแผ่นดินไหวเพื่อใช้ในการวิเคราะห์แรงภายในของโครงสร้างสะพาน

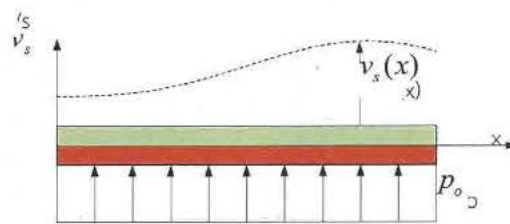
$$p_e(x) = \frac{\beta C_{sm}}{\gamma} w(x) v_s(x) \quad (4.2-5)$$

โดยที่ C_{sm} คือค่าของสเปกตรัมการตอบสนองที่ใช้ในการออกแบบของสะพานที่ได้จากหัวข้อ 2.1.1 ที่สอดคล้องกับคาบการสั่นของโครงสร้างที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 3 ในหัวข้อ 4.2 นี้

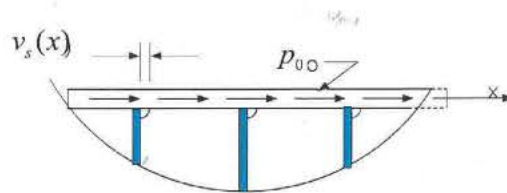
ค่าของแรงสถิตเทียบเท่าของแรงแผ่นดินไหวข้างต้นในทิศทางตามขวางและยาวของสะพานจะนำไปกระทำกับแบบจำลองของสะพานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาแรงภายในของสะพานเพื่อใช้ในการออกแบบรายละเอียดต่อไป

วิธี Uniform Load Method (UM)-มีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณค่าของสมการการเคลื่อนตัวของสะพานตลอดความยาวของสะพาน $V_s(x)$ เนื่องจากแรงกระทำแบบสม่ำเสมอ p_0 ในทิศทางยาวและตามขวางของสะพาน



Plan View, Transverse Loading



Elevation View, Longitudinal Loading

รูปที่ 4.2-2 แสดงการหาสมการการเคลื่อนตัวของสะพานตามยาวและตามขวาง

นำสมการการเคลื่อนตัวของสะพานตลอดความยาวสะพานมาหาค่าของการเคลื่อนตัวสูงสุด $V_{s,max}$ ในแต่ละทิศทางของสะพาน

2. คำนวณค่าความแข็งแรง (K) และ ค่าของ น้ำหนักรวมของโครงสร้างสะพาน ตามสมการต่อไปนี้

$$K = \frac{p_0 L}{v_{s,Max}} \quad (4.2-6)$$

$$W = \int w(x) dx \quad (4.2-7)$$



3. คำนวณค่าของคาบการสั่นของโครงสร้างในทิศทางขวางและยาวของสะพานตามสมการต่อไปนี

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK}} \quad (4.2-8)$$

4. คำนวณหาค่าของแรงสถิตเทียบเท่าของแรงแผ่นดินไหวเพื่อใช้ในการวิเคราะห์แรงภายในของโครงสร้างสะพาน

$$P_e = \frac{C_m}{L} W \quad (4.2-9)$$

ค่าของแรงสถิตเทียบเท่าของแรงแผ่นดินไหวข้างต้นในทิศทางตามขวางและยาวของสะพานจะนำไปกระทำกับแบบจำลองของสะพานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาแรงภายในของสะพานเพื่อใช้ในการออกแบบรายละเอียดต่อไป หรือ อาจใช้ค่าแรงภายในจากแบบจำลองที่เดิมในขั้นตอนที่ i มาคูณปรับค่าด้วย $\frac{P_e}{P_0}$ ก็สามารทำได้เช่นกัน โดยหากพบว่าวิธี Uniform Load Method (UM) ให้ค่าของแรงเฉือนตามแนวราบที่กระทำต่อม่อริมสูงเกินกว่าที่ควรเป็น ควรใช้วิธี Single Mode Spectral Method (SM) แทน

4.2.1 การวิเคราะห์หาค่าความยาวฐานรองรับน้อยสุด (Minimum Seat Length)

ในกรณีพื้นฐานรองรับสะพานบริเวณรอยต่อการขยายตัวของสะพานไม่ได้ยึดรั้งด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้任何一种อย่างหนึ่ง

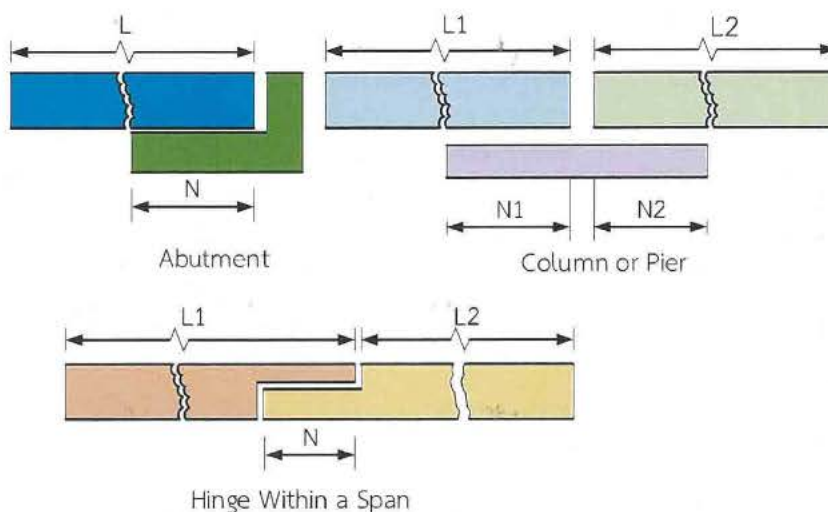
1. ฐานรองรับแบบไม่ให้เคลื่อนตัว (Fixed Bearing, Guided Bearing)
2. แผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กป้องกันการเคลื่อนตัว (Seismic Buffer)
3. โครงสร้างยึดรั้ง (Restrainers)
4. อุปกรณ์สลายพลังงาน (Dampers)

ให้ทำการออกแบบความยาวของฐานรองรับ (Support Length) ในทิศทางการเคลื่อนตัวของสะพานที่พิจารณาแรงแผ่นดินไหวจากค่าที่มากกว่าระหว่าง 1) การเคลื่อนตัวสูงสุดของแบบจำลองจากแรงในหัวข้อ 4.2 หรือ 4.2.2 และ 2) สัดส่วนของค่าของความยาวฐานรองรับที่ต้องการตามสมการดังนี้

$$N = (200 + 0.0017L + 0.0067H)(1 + 0.000125S^2) \quad (4.2-10)$$

โดยที่ N คือค่าของความยาวของฐานรองรับที่ต้องการ มี หน่วยเป็น มม.

- L คือ ความยาวของสะพานที่เคลื่อนตัวได้ระหว่างรอยต่อขยายตัวหรือระหว่างจุดยึดตรึง มีหน่วยเป็น มม.
- H คือ ความสูงของเสาที่ถัดจากรอยต่อขยายตัวกรณีพิจารณาตอม่อริม หรือ ความสูงของตอม่อกลาง หรือ ค่าเฉลี่ยของความสูงของตอม่อที่อยู่ก่อนและหลังจุดยึดตรึงของสะพาน มีหน่วยเป็น มม.
- S คือ ค่าของมุมเอียงของฐานรองรับ



รูปที่ 4.2-3 แสดงความยาวของฐานรองรับของสะพาน

สำหรับสัดส่วนของความยาวฐานรองรับที่ต้องใช้ในการออกแบบขึ้นกับประเภทของสมรรถนะแผ่นดินไหว ค่าของสเปกตรัมการตอบสนองของโครงสร้างและลักษณะของชั้นดิน ดังแสดงในตาราง 4.2-3

ตาราง 4.2-3 แสดงค่าของสัดส่วนที่ใช้ในการออกแบบความยาวของฐานรองรับของสะพาน

ประเภทสมรรถนะ ต้านทาน แรงแผ่นดินไหว (Zone)	ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของสะพาน (Acceleration Coefficient)	ลักษณะชั้นดิน (Soil Type)	% N
1	< 0.025	I หรือ II	≥ 50
1	< 0.025	III หรือ IV	100
1	> 0.025	ทุกประเภท	100
2A	ทุกช่วงค่าของสเปกตรัม	ทุกประเภท	100
2B	ทุกช่วงค่าของสเปกตรัม	ทุกประเภท	100
3	ทุกช่วงค่าของสเปกตรัม	ทุกประเภท	150



4.2.2 การวิเคราะห์ค่าของการเคลื่อนตัวของสะพานมากที่สุด (Maximum Displacement of Bridge System)

ค่าการเคลื่อนตัวของสะพานที่มากที่สุดที่ใช้ในการออกแบบสะพานในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวในคู่มือนี้พิจารณาผลจาก $P-\Delta$ ของโครงสร้างสะพานเป็นหลัก โดยค่าการเคลื่อนตัวในทิศทางใดๆ ของตอม่อสะพานจะต้องไม่มากกว่าค่าดังต่อไปนี้

$$\Delta P_M < 0.25 \phi M_n \quad (4.2-11)$$

โดยที่

$$\Delta = R_d \Delta_e \quad (4.2-12)$$

ถ้า $T < 1.25 T_s$ แล้ว

$$R_d = \left(1 - \frac{1}{R}\right) \frac{1.25 T_s}{T} + \frac{1}{R} \quad (4.2-12ก)$$

ถ้า $T \geq 1.25 T_s$ แล้ว

$$R_d = 1 \quad (4.2-12ข)$$

R คือค่าของ Response Modification Factor

Δ_e ค่าการเคลื่อนตัวของสะพานที่คำนวณจากหัวข้อ 4.2

P_n ค่าของแรงตามแนวแกนของเสาหรือตอม่อสะพานที่คำนวณโดยการรวมแรงที่ขีดจำกัด

ยิ่งยวด

M_b ค่าของกำลังรับโมเมนต์ดัดของเสาหรือตอม่อสะพานภายใต้แรงตามแนวแกน P_n

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีเชิงพลศาสตร์โดยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (Response Spectrum Analysis)

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานที่มีความสำคัญและถูกกำหนดให้ต้องใช้วิธีการวิเคราะห์โดยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (Multi Mode Response Spectrum Analysis, MM) ซึ่งเป็นวิธีเชิงพลศาสตร์ หรือในกรณีที่ผลการวิเคราะห์รูปร่างโหมดธรรมชาติของการสั่นของสะพานในแต่ละโหมดเป็นลักษณะการผสมกันของทิศทางต่างๆ มากกว่าหนึ่งทิศทาง (Coupling Modes) โดยวิธีนี้จะต้องใช้แบบจำลองของสะพานที่พิจารณามวลและสติเฟนส ได้อย่างถูกต้องเพื่อใช้ในการหาค่าคาบธรรมชาติของ



การสั่นไหวและรูปร่างโหมดธรรมชาติของการสั่นไหวของโครงสร้างต่อไป โดยคู่มือนี้ได้กำหนดข้อแนะนำเบื้องต้นประกอบการวิเคราะห์ดังนี้

1. จำนวนโหมดธรรมชาติที่ต้องพิจารณาขั้นต่ำของแบบจำลองโครงสร้างสะพานต้องไม่น้อยกว่า 3 เท่าของจำนวนความยาวช่วงที่ใช้ในแบบจำลอง
2. การคำนวณค่าตอบสนองของสะพานเพื่อใช้ในการออกแบบและให้รายละเอียดเช่นการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพาน (Bridge Movement) แรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ (Support Reaction Forces) หรือแรงภายในส่วนประกอบของโครงสร้างสะพาน (Member forces) สำหรับแต่ละโหมดจะต้องคำนวณโดยใช้คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของแต่ละโหมดและใช้สเปกตรัมการตอบสนองสำหรับการออกแบบในบทที่ 3 ในการวิเคราะห์และออกแบบ
3. การรวมแรงภายในและการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพานจากแต่ละโหมดให้ใช้วิธี Complete Quadratic Combination (CQC) method หากไม่สามารถใช้วิธี CQC ได้ ให้ใช้วิธี SRSS หากพบที่มีความผสมกันของโหมดแต่ละโหมดน้อย (Well Separated Mode) หรือวิธี ผลรวมของค่า Absolute ของแต่ละโหมดแทนในกรณีที่มีความผสมกันของโหมดมาก
4. ค่าแรงภายในที่ใช้สำหรับการออกแบบและให้รายละเอียดของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน ให้ใช้ค่าการตอบสนองสูงสุดของระบบยึดหยุ่นเชิงเส้นหารด้วยค่า R-Factor (Response Modification Factor)
5. การเคลื่อนตัวของสะพานที่ได้จากวิธีในหัวข้อนี้ให้ใช้ในการเปรียบเทียบกับสัดส่วนของค่าของความยาวฐานรองรับที่ต้องการ (Minimum Seat Length) ตามหัวข้อ 4.2.1 เพื่อใช้ค่าที่มากกว่าในการออกแบบความยาวฐานรองรับของสะพาน
6. การเคลื่อนตัวของสะพานหรือการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของโครงสร้างสะพานแบบต่อเนื่องให้ใช้ประกอบการคำนวณหาค่าของการเคลื่อนตัวสูงสุดของสะพานที่ไม่ทำให้เกิดการวิบัติเนื่องจากผลของ $P-\Delta$ ตามหัวข้อที่ 4.2.2

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีเชิงพลศาสตร์เพื่อหาผลตอบสนองแบบประวัติเวลา (Time History Analysis Method)

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานที่มีความสำคัญมากที่สุด (Critical Bridges) และถูกกำหนดให้ต้องใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์เพื่อหาผลตอบสนองแบบประวัติเวลา (Time History Analysis Method, TH) ทั้งกรณีเชิงเส้น (Linear) หรือ ไม่เชิงเส้น (Nonlinear) โดยเป็นการวิเคราะห์หาการตอบสนองที่ทุกขณะเวลาที่เกิดการสั่นไหวของโครงสร้างที่ถูกกระตุ้นด้วยความเร่งของพื้นดินที่ฐานของสะพาน โดยในการวิเคราะห์จะต้องมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างและต้องมีข้อมูล



ประวัติเวลาความเร่งของพื้นดินที่ใช้กระทำที่ฐานของสะพาน ในกรณีเป็นการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น จะต้องมีการจำลองของวัสดุที่ไม่เชิงเส้นแบบวิวิธจักรในโครงสร้างสะพานที่เกิดความเสียหายเกินจุดคราก โดยข้อกำหนดขั้นต่ำในคู่มือนี้แสดงดังนี้

- ให้พิจารณาผลกระทบของขนาดของ Time Step ในการวิเคราะห์
- ให้พิจารณาผลของความผันแปรของคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการสลายพลังงาน กรณีการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น
- กระบวนการเลือกคลื่นความเร่งแบบประวัติเวลาเพื่อการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบประวัติเวลาให้พิจารณา ลักษณะและประเภทของรอยเลื่อน (Tectonic Environment and Type of Fault) ขนาดของแผ่นดินไหว (Earthquake Magnitude) ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ตั้งของสะพาน ลักษณะชั้นดินบริเวณที่ตั้งของสะพาน
- ให้ใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่ได้ปรับค่า (Scaled Ground Motions) ให้สอดคล้องกับ Design Response Spectrum ที่มีคาบแผ่นดินไหว 1000 ปี (Response Spectrum Matching) จำนวนไม่น้อยกว่า 3 คลื่นในแต่ละทิศทางการสั่นไหวที่พิจารณา ในกรณีวิเคราะห์คลื่นประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear time history analysis) ให้พิจารณาทิศทางการสั่นไหวของคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 3 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน (x, y, และ z) โดยให้นำผลตอบสนองที่มากที่สุด ในทิศทางหลักของโครงสร้างสะพานไปใช้ในการออกแบบต่อไป
- ในกรณีที่คลื่นแผ่นดินไหวที่ได้ปรับค่า (Scaled Ground Motions) ให้สอดคล้องกับ Design Response Spectrum ที่มีคาบแผ่นดินไหว 1000 ปี (Response Spectrum Matching) มีจำนวนไม่น้อยกว่า 7 คลื่นในแต่ละทิศทางการสั่นไหวที่พิจารณาให้นำผลตอบสนองเฉลี่ยในทิศทางหลักของโครงสร้างสะพานไปใช้ในการออกแบบต่อไป



รายละเอียดการออกแบบโครงสร้าง การเสริมเหล็กและอุปกรณ์เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความเหนียวและประสิทธิภาพของโครงสร้าง

5.1 ทัวไป

รายละเอียดในหัวข้อนี้ใช้ได้กับสถานะขีดสุดของเหตุการณ์รุนแรงเท่านั้น นอกเหนือจากข้อกำหนดอื่นที่ระบุในหัวข้อ 5.10 ของมาตรฐาน AASHTO LRFD (AASHTO LRFD, 2010) เหล็กเสริมโครงสร้างต้องสอดคล้องตามข้อกำหนดเรื่องของการต้านแผ่นดินไหวที่ระบุในหัวข้อนี้ ทั้งนี้ข้อกำหนดเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ซึ่งระบุในหัวข้อ 4.1.2 หรือ อุปกรณ์ยึดรั้งตามแนวยาว (Longitudinal Restrainers) ซึ่งระบุในหัวข้อ 3.4 ต้องนำมาพิจารณาร่วมในหัวข้อนี้ด้วย ทั้งนี้สะพานที่ตั้งอยู่บนพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 2A และ 2B ให้ดำเนินการออกแบบตามข้อกำหนดในหัวข้อ 5.3 ในขณะที่สะพานที่ตั้งอยู่บนพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 3 ให้ดำเนินการออกแบบตามข้อกำหนดในหัวข้อ 5.4 โดยในรูปที่ 5.1-1 แสดงผังขั้นตอนที่สรุปลำดับการให้ละเอียดโครงสร้างสะพานต้านทานแรงแผ่นดินไหว

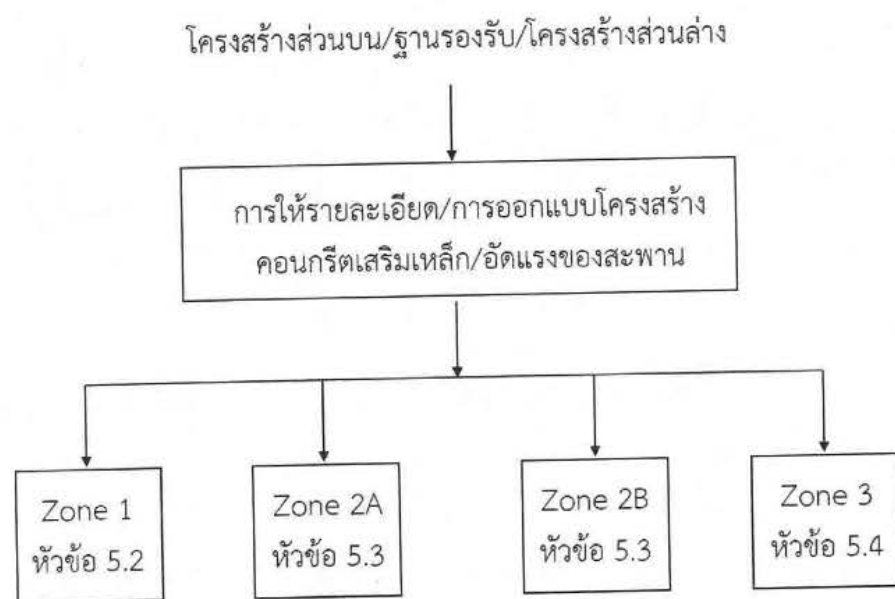
5.2 พื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 1

สะพานที่อยู่ในพื้นที่แผ่นดินไหวระดับ 1 หรือพื้นที่แผ่นดินไหวระดับต่ำที่ครอบคลุมในหัวข้อนี้มีความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมออกแบบที่คาบการสั่น 1.0 วินาที (S_{d1}) ซึ่งระบุใน หัวข้อ 2.1.1 น้อยกว่า 0.15



สำหรับสะพานที่ตั้งอยู่บนพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 1 ที่มี S_{d1} น้อยกว่า 0.10 ให้ผลของแผ่นดินไหวในการคำนวณออกแบบองค์อาคารต่างๆ และอาจละเว้นการออกแบบรอยต่อระหว่างโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างตามข้อกำหนดในหัวข้อ 3.3 ได้

สำหรับสะพานที่ตั้งอยู่บนพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 1 ซึ่งมี S_{d1} มากกว่าหรือเท่ากับ 0.10 แต่ไม่เกินกว่าหรือเท่ากับ 0.15 ให้ผลของแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหวในการออกแบบองค์อาคารต่างๆ ของโครงสร้าง แต่ต้อง (ก) ทำการออกแบบรอยต่อระหว่างโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่างซึ่งมีขั้นตอนกำหนดไว้ในหัวข้อ 3.3 และ (ข) พิจารณาปริมาณของเหล็กเสริมตามขวางที่ต้องการที่ปลายบนและล่างตามข้อกำหนดในหัวข้อ 5.4.1 (4) และ 5.4.1 (5)



รูปที่ 5.1-1 ผังขั้นตอนสำหรับการให้รายละเอียดโครงสร้างสะพานต้านทานแรงแผ่นดินไหว

5.3 พื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 2

สะพานที่อยู่ในพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 2 หรือพื้นที่แผ่นดินไหวระดับกลางที่ครอบคลุมในหัวข้อนี้มี S_{d1} มากกว่า 0.15 แต่ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.30 ข้อกำหนดต่างๆ สำหรับสะพานในพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 2 นี้ ให้ใช้ตามหัวข้อ 5.4 ยกเว้นปริมาณเหล็กเสริมตามแนวยาว (Longitudinal Reinforcement) ต้องไม่น้อยกว่า 0.01 แต่ไม่เกิน 0.06 เท่าของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (Gross Section, A_g)

5.4 พื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 3

สะพานที่อยู่ในพื้นที่แผ่นดินไหวระดับ 3 หรือพื้นที่แผ่นดินไหวระดับสูงที่ครอบคลุมในหัวข้อนี้มี S_{d1} มากกว่า 0.30 โดยข้อกำหนดของการทำรายละเอียดของเหล็กเสริมของสะพานเพื่อต้านแผ่นดินไหวในพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 3 นี้ มีดังนี้

5.4.1 ข้อกำหนดของเสา

ในหัวข้อนี้จะกำหนดความต้องการพื้นที่ในเสา (Column Requirements) เพื่อให้สะพานมีสมรรถนะในการต้านแผ่นดินไหวได้ตามที่ต้องการ โดยเริ่มจากนิยามองค์อาคารที่ใช้รองรับน้ำหนักในแนวตั้งว่าเป็นเสา (Column) ก็ต่อเมื่อสัดส่วน (Ratio) ของความสูงเว้นว่าง (Clear Height) ต่อมิติมากที่สุดของหน้าตัด ไม่น้อยกว่า 2.5 สำหรับเสาที่ปลายผายออก (Flared Column) มิติมากที่สุดข้างต้น ให้พิจารณาจากมิติน้อยสุดของหน้าตัดที่ผายออก สำหรับกรณีสัดส่วนข้างต้นน้อยกว่า 2.5 ให้พิจารณาออกแบบตามข้อกำหนดในหัวข้อ 5.4.2 ในขณะที่ตอม่อ (Pier) ของสะพานให้ออกแบบเช่นเดียวกับกำแพงในทิศทางด้านข้าง และให้ออกแบบเช่นเสาในทิศทางด้านอ่อน

1. ปริมาณเหล็กเสริมตามแนวยาว (Longitudinal Reinforcement)

ปริมาณเหล็กเสริมตามแนวยาวต้องไม่น้อยกว่า 0.01 แต่ไม่เกินกว่า 0.04 เท่าของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด

2. ความต้านทานการดัด (Flexural Resistance)

กำลังดัดสองแกน (Biaxial Strength) ของเสาต้องไม่น้อยกว่าแรงดัดที่กระทำตามที่ระบุในหัวข้อ 3.3.3 ทั้งนี้เสาข้างต้นให้ตรวจสอบ ณ สภาวะขีดสุดของเหตุการณ์รุนแรง โดยตัวประกอบลดกำลัง (Resistance Factor) ให้ใช้เท่ากับ 0.90 สำหรับทั้งเสาปลอกเกลียว (Spiral Column) และเสาปลอกเดี่ยว (Tie Column)

3. แรงเฉือนในเสาและปริมาณเหล็กเสริมตามขวาง (Column Shear And Transverse Reinforcement)

แรงเฉือนเพิ่มค่า (Factored Shear Force, V_u) ที่กระทำในแต่ละแกนของหน้าตัดเสา รวมถึงเสาเข็มตลับ (Pile bent) ให้คำนวณตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3 ทั้งนี้ปริมาณของเหล็กเสริมตามขวางต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุในหัวข้อ 5.8.3 ของมาตรฐาน AASHTO LRFD (AASHTO LRFD, 2010) โดยข้อกำหนดต่อไปนี้ให้พิจารณา ณ หน้าตัดในส่วนปลายบนและล่างของเสา และเสาเข็มตลับ

ก. ในบริเวณปลาย (End Region) ของเสา ค่ากำลังต้านแรงเฉือนจากคอนกรีตล้วน (V_c) ให้คำนวณตามข้อกำหนดในหัวข้อ 5.8.3 ของมาตรฐาน AASHTO LRFD (AASHTO LRFD, 2010) สำหรับกรณีที่แรงอัดเพิ่มค่า (Factored Axial Compression) เกินกว่า $0.10f'_cA_g$ แต่หากค่าดังกล่าว



น้อยกว่า $0.10f'_cA_g$ ให้ปรับลด V_c แบบเชิงเส้นจากที่คำนวณได้ตามข้อกำหนดในหัวข้อ 5.8.3 ของมาตรฐาน AASHTO LRFD (AASHTO LRFD, 2010) จนเหลือศูนย์ ณ ภาวะที่แรงอัดเพิ่มค่าดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์

ข. บริเวณปลายตามข้อ ก ให้วัดออกจากขอบคานรัด (Cap Beam) หรือหลังของฐาน (Footing) สำหรับส่วนบนและส่วนล่างของเสาตามลำดับ ทั้งนี้ความยาวของบริเวณดังกล่าวให้พิจารณาจากค่าที่มากกว่าระหว่าง (1) มิติมากที่สุดของหน้าตัดเสา (2) หนึ่งใน 6 เท่า ของระยะเว้นว่าง (Clear Height) ของเสา หรือ (3) 450 มม.

ค. บริเวณปลายของเสาเข็มตัก กรณีส่วนบนให้พิจารณาเหมือนเสาทั่วไป ในขณะที่ส่วนล่างให้วัดเริ่มต้นต่ำลงไปเป็นระยะ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มตักจากจุดที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดในเสาเข็มตัก จนมีความยาวเท่ากับ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มตัก โดยบริเวณดังกล่าวต้องวัดต่ำลงไปจากระดับดินไม่น้อยกว่า 450 มม. (กรณีที่เสาเข็มไม่ได้มีหน้าตัดกลม ให้ใช้มิติด้านที่มากที่สุดของเสาเข็มในการคำนวณ)

4. เหล็กเสริมตามขวางสำหรับการโอบรัดในบริเวณจุดหมุนพลาสติก (Transverse Reinforcement For Confinement At Plastic Hinges)

แกน (Core) ของเสารวมถึงเสาเข็มตักในบริเวณที่เป็นจุดหมุนพลาสติก ต้องถูกโอบรัดโดยเหล็กเสริมตามขวาง โดยกำลังครากของเหล็กดังกล่าวต้องมีค่าไม่เกินกว่ากำลังคราก (Yield Strength) ของเหล็กเสริมตามยาว และระยะเรียงของเหล็กเสริมดังกล่าวให้คำนวณตามข้อกำหนดในหัวข้อ 5.4.1 (5)

สำหรับเสากลมสัดส่วนปริมาตร (Volumetric Ratio, ρ_s) ของเหล็กปลอกเกลียว (Spiral Reinforcement) หรือเหล็กปลอกกรัดรอบเพื่อต้านแผ่นดินไหว (Seismic Hoop Reinforcement) ต้องสอดคล้องทั้งที่กำหนดใน หัวข้อ 5.7.4.6 ของมาตรฐาน AASHTO LRFD (AASHTO LRFD, 2010) หรือ

$$\rho_s \geq 0.12 \frac{f'_c}{f_y} \quad (5.4-1)$$

เมื่อ	f'_c	คือ	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานอเมริกันที่ 28 วัน เว้นแต่จะระบุเป็นอย่างอื่น (กก./ซม. ²)
	f_y	คือ	กำลังครากของเหล็กเสริมตามขวาง (กก./ซม. ²)



ภายในพื้นที่จุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge Zones) การทาบ (Splices) ของเหล็กปลอกเกลียวควรเกิดจากการเชื่อมเต็ม (Full-Welded Splices) หรือการยึดแน่นด้วยอุปกรณ์ทางกล (Full-Mechanical Connection)

กรณีเสาสี่เหลี่ยม พื้นที่รวมของเหล็กปลอกรัดรอบที่รัดเป็นวงสี่เหลี่ยมรอบเหล็กเสริมเอกในเสา (Rectangular Hoop Reinforcement, A_{sh}) ต้องสอดคล้องกับ

$$A_{sh} \geq 0.30s h_c \frac{f'_c}{f_y} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad (5.4-2)$$

หรือ

$$A_{sh} \geq 0.12s h_c \frac{f'_c}{f_y} \quad (5.4-3)$$

เมื่อ s คือ ระยะเรียงในแนวดิ่งของเหล็กปลอกรัดรอบ (มม.) ซึ่งต้องมีค่าไม่เกินค่ากว่าค่าในตารางที่ 4.2-1

A_c คือ พื้นที่แกนของเสา (มม.²)

A_g คือ พื้นที่รวมของเสา (มม.²)

A_{sh} คือ พื้นที่รวมของเหล็กปลอกรัดรอบ (Hoops) ซึ่งรวมถึงเหล็กรั้ง (Cross Ties) ซึ่งมีระยะเรียง s และคล้องผ่านพื้นที่หน้าตัดซึ่งมีมิติของแกนเสา (Core Dimension) เท่ากับ h_c (มม.²)

h_c คือ มิติของแกนเสาในทิศทางที่พิจารณา (มม.)

ตารางที่ 4.2-1 ระยะเรียงของเหล็กปลอกรัดรอบ (s) ซึ่งแปรผันตามพื้นที่สมรรถนะแผ่นดินไหว

พื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหว	ระยะเรียง (มม.)
1 (สำหรับ $0.10 \leq S_{DI} \leq 0.15$) และ $2A$	150
$2B$ และ 3	100

โดย A_{sh} ต้องคำนวณจากทั้งสองแกนหลักของหน้าตัด

เหล็กปลอกรัดรอบตามขวาง สามารถจัดเป็นแบบวงเดี่ยว (Single Hoop) และแบบเกยกัน (Overlapping Hoop) ทั้งนี้เหล็กรั้งซึ่งมีขนาดเท่ากับเหล็กปลอกรัดรอบอนุญาตใช้ได้ ทั้งนี้ปลายของเหล็กรั้งดังกล่าวต้องยึด (Engage) เข้ากับเหล็กตามแนวยาวที่กระจายอยู่รอบหน้าตัด (Peripheral



Longitudinal Reinforcing Bar) โดยเหล็กทั้งหมดยกเว้นต้องทำการงอเพื่อต้านแผ่นดินไหว (Seismic Hook) ตามที่กำหนดในหัวข้อ 5.10.2.2 ของมาตรฐาน AASHTO LRFD (AASHTO LRFD, 2010)

ข้อกำหนดต่อไปนี้เป็นเกณฑ์เพื่อนิยามคุณสมบัติของเหล็ก

- ก. เหล็กต้องเป็นเหล็กเสริมที่ต่อเนื่อง โดยปลายข้างหนึ่งต้องงอ (Hook) ไม่น้อยกว่า 135 องศา และยื่นออกไปไม่น้อยกว่า 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง แต่ต้องไม่น้อยกว่า 75 มม. และปลายอีกข้างหนึ่งต้องงอไม่น้อยกว่า 90 องศา และยื่นออกไปไม่น้อยกว่า 75 มม.
- ข. ปลายของเหล็กต้องยึดเข้ากับเหล็กตามแนวยาวที่กระจายอยู่รอบหน้าตัด
- ค. เหล็กที่เรียงต่อกัน และยึดเข้ากับเหล็กเสริมตามแนวยาวเส้นเดียว ปลายทั้งอง 90 องศา ของเหล็กเหล่านั้นควรเรียงสลับปลายกัน

ข้อกำหนดต่อไปเป็นเกณฑ์เพื่อนิยามคุณสมบัติของเหล็กปลอกรัดรอบ

- ก. เหล็กปลอกรัดรอบ อาจเป็นเหล็กปลอกเดี่ยวแบบวงปิด (Closed Tie) หรือเหล็กปลอกเดี่ยวรัดต่อเนื่อง (Wound Tie)
- ข. การเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวแบบวงปิด สามารถสร้างจากเหล็กหลายเส้น โดยที่ปลายทั้ง 2 ด้าน ต้องงอ 135 องศา และมีระยะยื่นไม่น้อยกว่า 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือ 75 มม.
- ค. เหล็กปลอกเดี่ยวรัดต่อเนื่อง ต้องยึดเข้ากับเหล็กเสริมตามแนวยาว โดยปลายของเหล็กปลอกเดี่ยวรัดต่อเนื่องดังกล่าว ต้องงอเท่ากับ 135 องศา และที่มีระยะยื่นไม่น้อยกว่า 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือ 75 มม.

5. ระยะเรียงของเหล็กเสริมตามขวางสำหรับการโอบรัด (Spacing Of Transverse Reinforcement For Confinement)

เหล็กเสริมตามขวางเพื่อการโอบรัด จำเป็นต้อง

- ก. จัดวางให้อยู่ในบริเวณปลายบน และปลายล่างของเสาภายในระยะซึ่งไม่น้อยกว่าที่มากกว่าของ (1) มิติด้านมากของเสา (2) $1/6$ ของความสูงเว้นว่างของเสา (Clear Height) หรือ (3) 450 มม.
- ข. ให้เรียงเหล็กเสริมเหล่านี้เข้าไปรอยต่อที่ปลายทั้งสองของเสาตามที่ระบุในหัวข้อ 5.4.3
- ค. ที่ปลายบนของเสาเข็มตัก ให้เรียงเหล็กเสริมตามขวางเหมือนเช่นที่ปฏิบัติกับเสา
- ง. จากข้อ (ค) ณ อีกปลายหนึ่งของเสาเข็มตัก ให้เรียงเหล็กเสริมตามขวางในพื้นที่ที่วัดต่ำลงไปเป็นระยะ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มตักจากจุดที่เกิดโมเมนต์ดัด



สูงสุดในเสาเข็มตัก จนมีความยาวเท่ากับ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มตัก โดยบริเวณดังกล่าวต้องวัดต่ำลงไปจากระดับดินไม่น้อยกว่า 450 มม. (กรณีที่เสาเข็มไม่ได้มีหน้าตัดกลม ให้ใช้มิติด้านที่มากที่สุดของเสาเข็มในการคำนวณ)

- จ. ระยะเรียงแบบศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามขวาง ต้องไม่เกินหนึ่งในสี่ของมิติด้านสั้นของหน้าตัดเสา หรือข้อกำหนดที่แสดงในตารางที่ 4.2-1

6. การทาบ (Splices)

ให้ปฏิบัติตามข้อกำหนดในหัวข้อ 5.11.5 ของมาตรฐาน AASHTO LRFD (AASHTO LRFD, 2010) เมื่อต้องการออกแบบระยะทาบ โดยควรหลีกเลี่ยงการทาบเหล็กเสริมตามแนวยาว

โดยกำหนดให้ระยะเรียงของเหล็กเสริมตามขวางภายในระยะที่เกิดการทาบเหล็กต้องมีค่าไม่เกิน (ก) หนึ่งในสี่ของมิติด้านสั้นของหน้าตัดเสา หรือ (ข) 100 มม.

การทาบด้วยการเชื่อมเต็ม (Full-Welded) หรือต่ออุปกรณ์ทางกล (Full-Mechanical Connection) ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อ 5.11.5 ของมาตรฐาน AASHTO LRFD (AASHTO LRFD, 2010) สามารถกระทำได้ ทั้งนี้จำนวนของการทาบต่อ ณ ตำแหน่งเดียวกันต้องมีไม่เกินครึ่ง และระยะห่างของเหล็กที่ถูกทาบไปก่อนหน้านี้กับเหล็กที่ทำการทาบอีกชุดต้องมากกว่า 600 มม.

5.4.2 ข้อกำหนดของตอม่อแบบกำแพง

รายละเอียดที่กำหนดในหัวข้อนี้ใช้กับการออกแบบตอม่อแบบกำแพง (Wall-Type) ในทิศทางด้านข้าง ทั้งนี้การออกแบบในทิศทางด้านอ่อนของตอม่อตัวเดียวให้พิจารณาค่ายเสา ซึ่งมีข้อแนะนำในการออกแบบแสดงในหัวข้อ 5.4.1 และในขั้นตอนการคำนวณหาแรงกระทำสำหรับด้านอ่อนดังกล่าวให้ใช้ค่าตัวคูณปรับแก้ผลตอบสนองสำหรับเสา

สัดส่วนเหล็กเสริมขั้นต่ำ (Minimum Reinforcing Ratio) ทั้งในแนวนอน (ρ_h) และแนวตั้ง (ρ_v) ของตอม่อต้องไม่น้อยกว่า 0.0025 ทั้งนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ สัดส่วนเหล็กเสริมในแนวตั้งต้องไม่น้อยกว่าแนวนอน

ระยะเรียงของเหล็กเสริมในแนวตั้งและแนวนอนต้องไม่เกินกว่า 450 มม. โดยเหล็กเสริมรับแรงเฉือนต้องมีความต่อเนื่องและกระจายอย่างสม่ำเสมอ

แรงเฉือนเพิ่มค่าที่กระทำต่อกำแพง (V_r) ต้องมีค่าไม่เกินไปกว่าค่าที่น้อยกว่าระหว่าง

$$V_r = 0.021\sqrt{f'_c}bd \quad (5.4-4)$$

$$V_r = \phi V_n \quad (5.4-5)$$



เมื่อ

$$V_n = (0.0052\sqrt{f'_c} + \rho_h f_y)bd \quad (5.4-6)$$

ต้องทำการเสริมเหล็กแนวนอนและแนวดิ่งในแต่ละหน้าของตอม่อ โดยหากมีการทาบทเหล็ก ให้ทาบทแบบเหลื่อม (Staggered) และไม่ควรถาบทเหล็ก ณ ตำแหน่งเดียวกันพร้อมกันทั้ง 2 หน้า

5.4.3 รอยต่อเสา

แรงที่ใช้ในการออกแบบรอยต่อของเสากับคานขวาง (Cap beam) แท่นหัวเข็ม (Pile Cap) หรือฐานแผ่ (Spread Footing) ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในหัวข้อ 3.6.3 ทั้งนี้ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมตามแนวยาวทั้งหมดต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 25 ของที่ต้องการเพื่อพัฒนากำลังครากของเหล็กเสริม ดังกำหนดไว้ในหัวข้อ 5.11 ของมาตรฐาน AASHTO LRFD (AASHTO LRFD, 2010)

เหล็กเสริมตามขวางในเสาซึ่งระบุไว้ใน 5.4.1(5) ต้องเรียงต่อเนื่องเข้าไปในรอยต่อไม่น้อยกว่าระยะ 1.5 เท่าของมิติที่มากที่สุดของเสา หรือ 380 มม. โดยวัดจากหน้าของเสาไปยังชิ้นส่วนที่ติดกัน

กำลังต้านทานการเฉือนระบุ (V_n) เนื่องจากคอนกรีตในจุดต่อของโครงค้ำหรือเสาเข็มตပ်ในทิศทางที่พิจารณาต้องสอดคล้องกับ

1. คอนกรีตมวลปกรติ

$$V_n = 0.032\sqrt{f'_c}bd \quad (5.4-7)$$

2. คอนกรีตมวลเบา

$$V_n = 0.024\sqrt{f'_c}bd \quad (5.4-8)$$

5.4.4 จุดต่อก่อสร้างในตอม่อและเสา

เมื่อแรงเฉือนในจุดต่อก่อสร้าง (Construction Joints) ให้ต้านทานโดยเหล็กเดือย (Dowel) และความเสียดทาน (Friction) เนื่องจากความขรุขระของพื้นผิวจุดต่อเท่านั้น ค่ากำลังต้านแรงเฉือนระบุข้างต้นคำนวณจาก

$$V_n = A_{fv}f_y + 0.75P_u \quad (5.4-9)$$

เมื่อ A_{fv} คือ พื้นที่เหล็กเสริมทั้งหมด รวมถึงเหล็กเสริมด้านการดัดที่ตัดผ่านระนาบของจุดต่อ (มม.²)

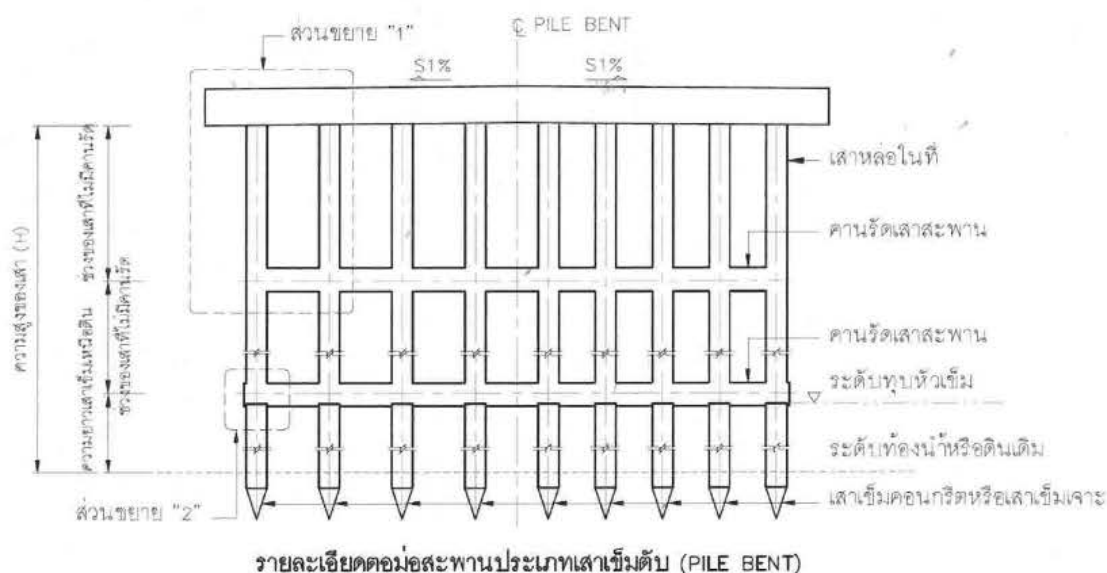
P_u คือ แรงตามแนวแกนเพิ่มค่าต่ำสุดซึ่งเป็นไปตามที่ระบุในหัวข้อ 3.3.3 สำหรับเสาและตอม่อ (N)

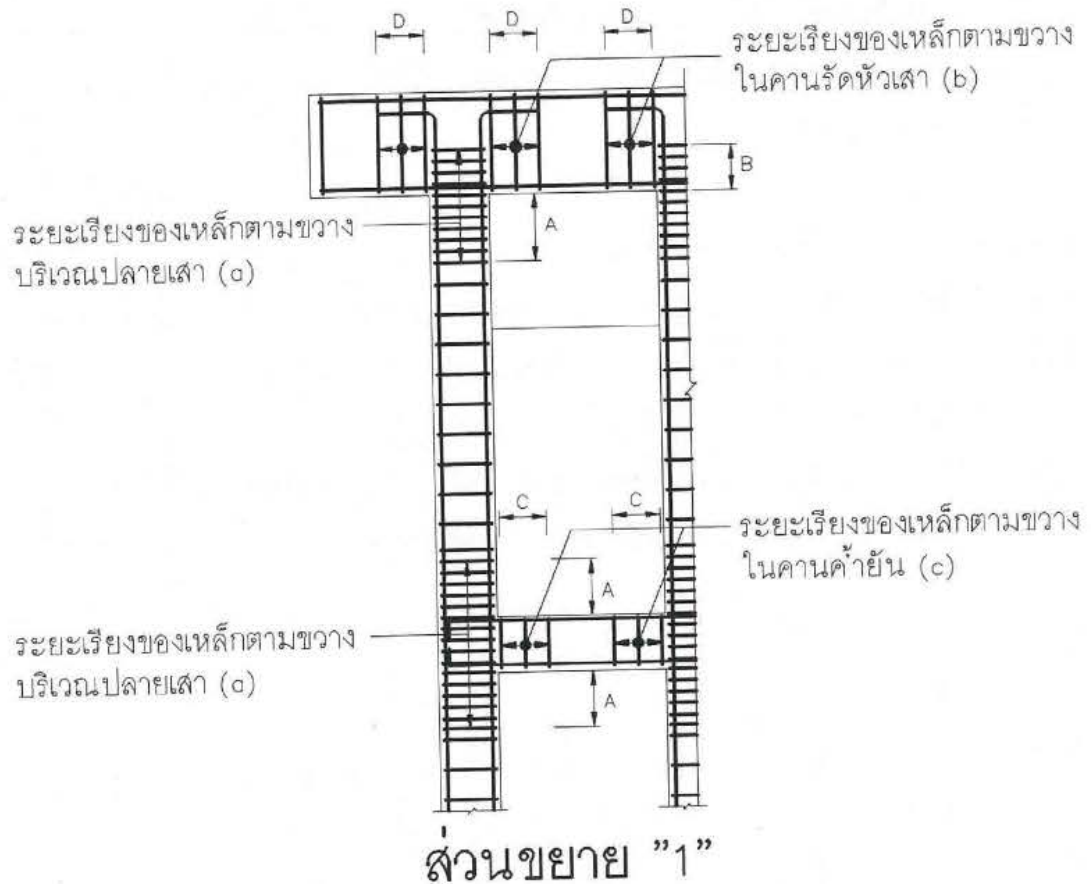
5.5 ตัวอย่างการในรายละเอียดเหล็กเสริมในโครงสร้างสะพานในพื้นที่แผ่นดินไหวระดับ 1-3

5.5.1 การให้รายละเอียดเหล็กเสริมในโครงสร้างสะพานในพื้นที่แผ่นดินไหว สำหรับตอม่อสะพานประเภท Pile Bent

การให้รายละเอียดเหล็กเสริมในโครงสร้างตอม่อสะพานประเภทเสาเข็มตัก เพื่อเพิ่มความเหนียวและรองรับแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหว ควรพิจารณาใช้เหล็กปลอกเดี่ยว ซึ่งมีระยะเรียงตามที่กำหนดในหัวข้อ 5.2-5.4 ในบริเวณช่วงรอยต่อระหว่าง เสาเข็มสำเร็จรูป (Concrete Pile) และเสาคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in-Situ Column) และในช่วงรอยต่อระหว่างเสาคอนกรีตหล่อในที่และคานรัดเสาสะพาน (Cast-In-Situ Bracing Beam) ดังแสดงในรูปที่ 5.5-1

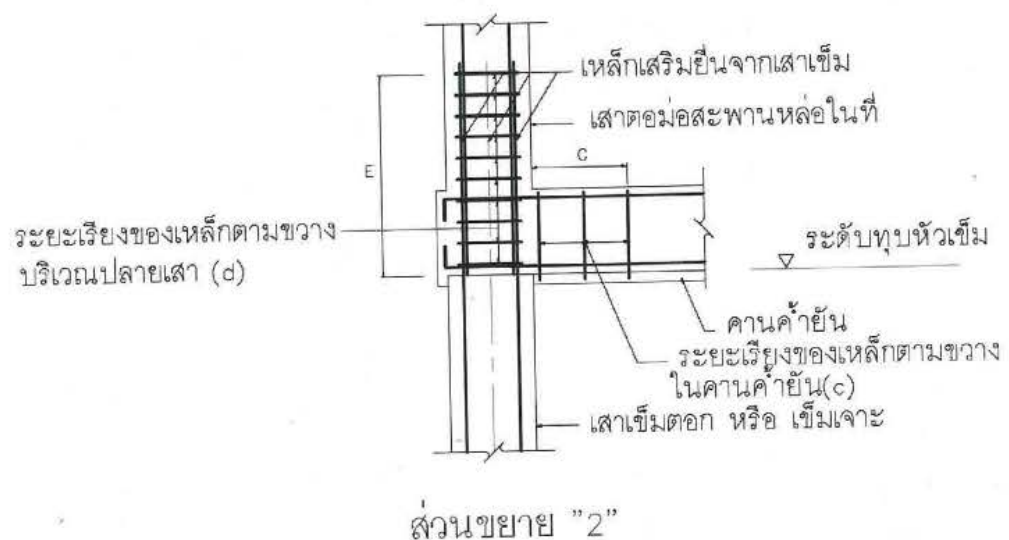
ในกรณีที่สะพานอยู่ในพื้นที่แผ่นดินไหวระดับ 2B ขึ้นไป ให้พิจารณาเพิ่มเหล็กปลอกที่ใช้ระยะห่างตามหัวข้อ 5.2-5.4 ในส่วนของเสาเข็มคอนกรีต หรือเสาเข็มเจาะด้วย





หมายเหตุ

- A = ความยาวบริเวณปลายเสาที่ทำการเสริมเหล็กตามขวาง
- B = ความยาวรอยต่อปลายเสาและคานรัดที่ทำการเสริมเหล็กตามขวาง
- C = ความยาวบริเวณปลายคานรัดที่ทำการเสริมเหล็กตามขวาง
- D = ความยาวในคานรัดหัวเสาที่ทำการเสริมเหล็กตามขวาง
- E = ระยะทับเหล็กระหว่างเหล็กเสริมจากเสาเข็มและเสาหล่อในที่

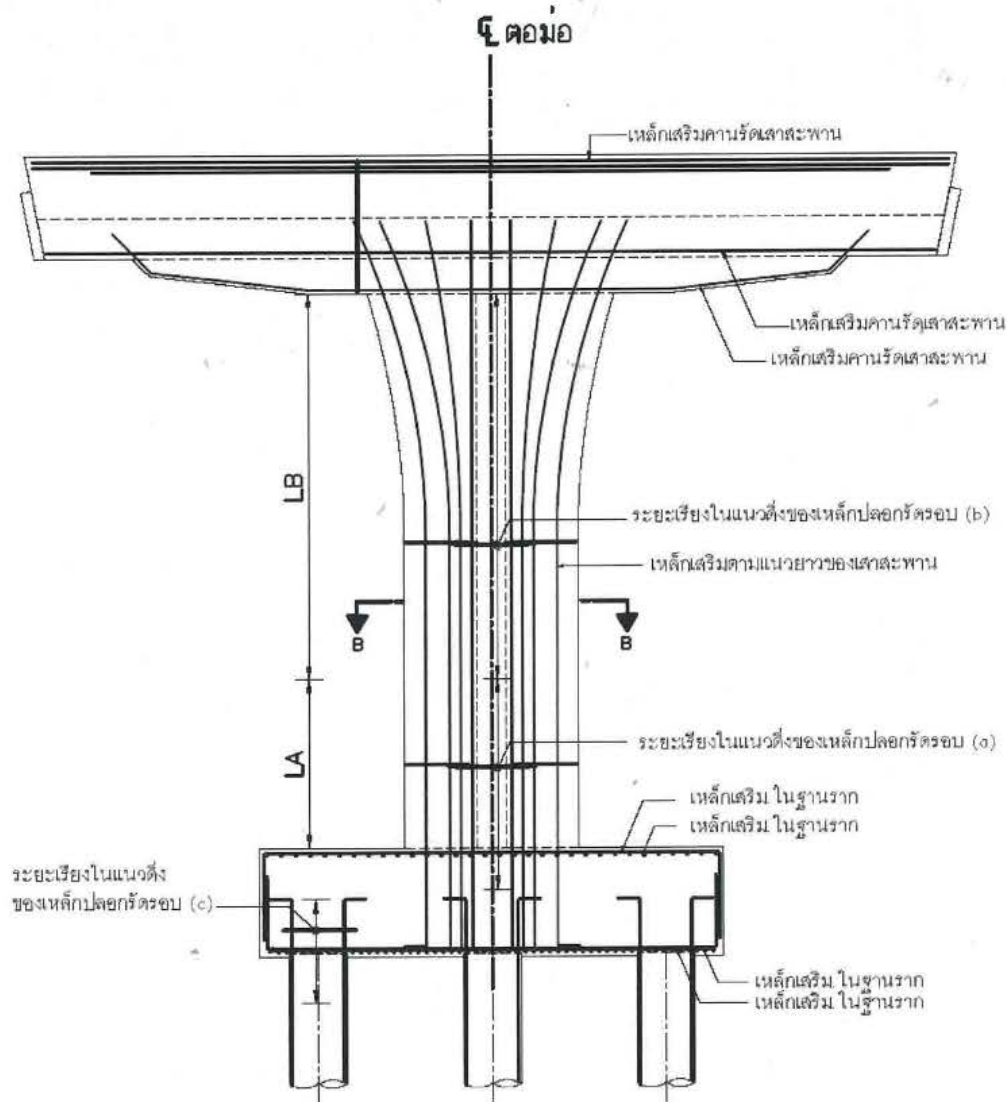


รูปที่ 5.5-1 ตัวอย่างการให้รายละเอียดเหล็กเสริมในตอม่อประเภทเสาเข็มตบ

5.5.2 การให้รายละเอียดเหล็กเสริมในโครงสร้างสะพานในพื้นที่แผ่นดินไหว สำหรับตอม่อสะพานประเภทเสาเดี่ยว

เพื่อเพิ่มความเหนียวและรองรับแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหว ควรพิจารณาใช้เหล็กปลอกเดี่ยวที่มีระยะเรียง และช่วงของโคนเสา (LA) ตามหัวข้อ 5.2-5.4 ดังแสดงในรูปที่ 5.5-2

ในกรณีที่สะพานอยู่ในพื้นที่แผ่นดินไหวระดับ 2B ขึ้นไป ให้พิจารณาเพิ่มเหล็กปลอกที่ใช้ระยะห่างตามหัวข้อ 5.2-5.4 ในส่วนของรอยต่อระหว่างเสาตอม่อและฐานราก และรอยต่อระหว่างเสาเข็มคอนกรีตและเสาเข็มเจาะกับฐานรากด้วย



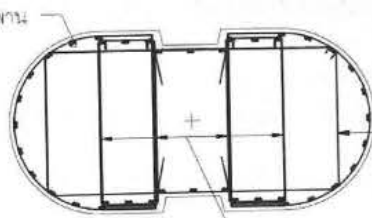
หมายเหตุ

LA = ความยาวบริเวณปลายเสาคานที่ติดกับฐานรากที่ทำการเสริมเหล็กตามขวาง

LB = ความยาวรอยต่อปลายเสาคานบนและคานรัดที่ทำการเสริมเหล็กตามขวาง



เหล็กเสริมตามแนวยาวของเสาสะพาน



เหล็กเสริมปลอกเดี่ยวแบบวงปิด (Closed Tie)



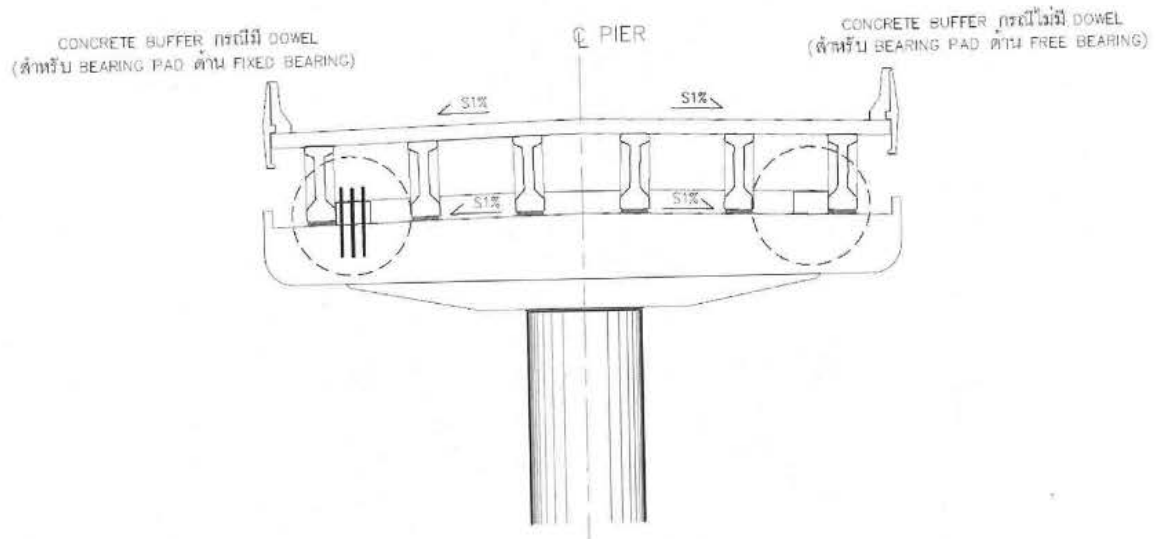
เหล็กเสริมปลอกเดี่ยววัดต่อเนื่อง (Cross Tie)



รูปที่ 5.5-2 ตัวอย่างการให้รายละเอียดเหล็กเสริมในตอม่อประเภทเสาเดี่ยว

5.5.3 การให้รายละเอียดบริเวณ End Diaphragm ของโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่าง สำหรับโครงสร้างส่วนบนแบบ I หรือ U Girder วางห่างกัน และ รอยต่อโครงสร้างส่วนบนถ่ายแรงมายังโครงสร้างส่วนล่างโดย Bearing

ในกรณีที่สะพานมีรอยต่อระหว่างโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่างเป็นแบบฐานรองรับอย่างง่าย (Simple Support) เพื่อรับแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในทิศทางที่ออกแบบยอมให้มีการเคลื่อนตัวในสภาวะใช้งานได้ (Free Bearing) ควรให้ออกแบบให้มีการรองรับแรงแผ่นดินไหวโดยใช้ Concrete Buffer ที่พิจารณาแรงแผ่นดินไหวในหัวข้อ 3.4 ดังแสดงในรูปที่ 5.5-3

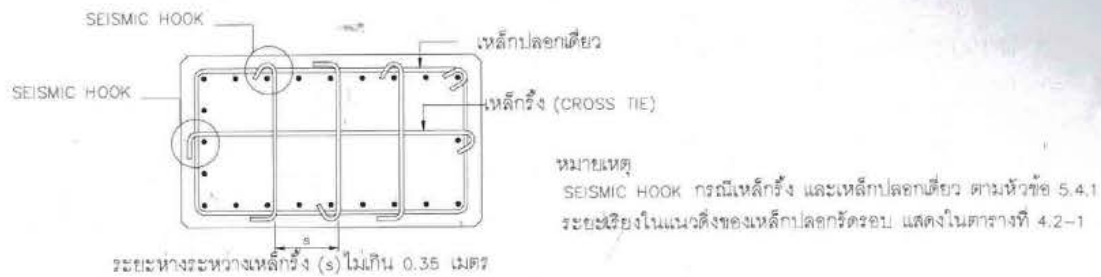


รูปที่ 5.5-3 ตัวอย่างการให้รายละเอียดบริเวณ End Diaphragm

5.5.4 การให้รายละเอียดเหล็กเสริมในเสาและคานรูปแบบต่างๆ (เพิ่มเติม)

การให้รายละเอียดเสริมเหล็กในเสาตอม่อและคานสะพานใดๆ ตามหัวข้อ 5.3 และ 5.4 เพื่อเพิ่มความเหนียวและรองรับแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหวควรพิจารณารายละเอียดเพิ่มเติมดังแสดงในรูปที่ 5.5-4 ถึงรูปที่ 5.5-6

ก. การให้รายละเอียดเหล็กดัดเพื่อต้านแผ่นดินไหว (Seismic Stirrup) และเหล็กรั้ง (Cross Tie หรือ Tie Hook) ในตอม่อสะพาน



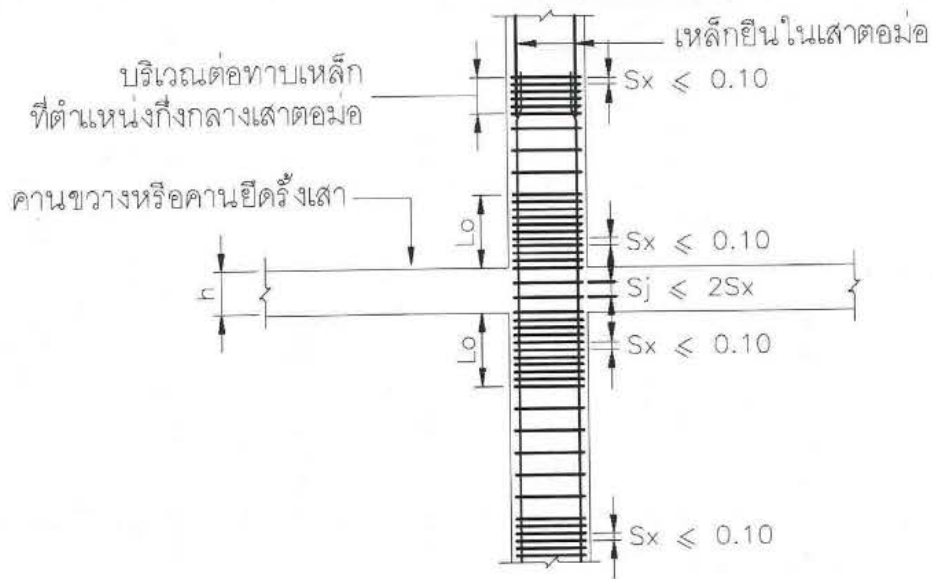
รูปที่ 5.5-4 ตัวอย่างการให้รายละเอียดเหล็กดัดเพื่อต้านแผ่นดินไหว (Seismic Stirrup) และเหล็กรั้ง (Cross Tie หรือ Tie Hook) ในตอม่อสะพาน

ข. การให้รายละเอียดระยะทาประหว่างเหล็กเสริมในคานขวางของตอม่อสะพาน



รูปที่ 5.5-5 ตัวอย่างการให้รายละเอียดระยะทาประหว่างเหล็กเสริมในคานขวางของตอม่อ

ค. การให้รายละเอียดระยะทาประหว่างเหล็กเสริมในเสาตอม่อสะพานและระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกในเสาตอม่อ



หมายเหตุ

h = ความลึกของคานขวางหรือคานยึดเรียงเสา

S_x = ระยะเรียงในแนวตั้งของเหล็กปลอกรัตรอบ

S_j = ระยะเรียงในแนวตั้งของเหล็กปลอกรัตรอบ บริเวณรอยต่อเสาและคาน

L_o = ช่วงความยาวเสาที่คาดว่าจะเกิดจุดหมุนพลาสติก (PLASTIC HINGE)

โดยใช้ค่ามากกว่า (ความลึกของเสาตอม่อ,

หนึ่งใน 6 เท่าของระยะเว้นว่าง (CLEAR HEIGHT) ของเสา, 0.45 เมตร)

รูปที่ 5.5-6 ตัวอย่างการให้รายละเอียดระยะทาบระหว่างเหล็กเสริมในเสาตอม่อสะพาน



บทที่ ๖

แนวทางการออกแบบโครงสร้างชั้นทางของถนนเพื่อป้องกันแผ่นดินไหว

6.1 ทัวไป

หัวข้อนี้แสดงแนวทางและข้อเสนอแนะการออกแบบโครงสร้างชั้นทางของถนนเพื่อป้องกันและลดผลกระทบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวเบื้องต้นที่วิศวกรผู้ออกแบบควรพิจารณาและนำไปประกอบการออกแบบโครงสร้างชั้นทางของถนนที่ผ่านพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว โดยจากข้อมูลความเสียหายของถนนในประเทศไทยภายหลังการเกิดแผ่นดินไหว พบว่าถนนยังไม่มี ความเสียหายโดยตรงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนหรือการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามความเสียหายของถนนที่เกิดภายหลังแผ่นดินไหวที่สำรวจและมีการรายงานส่วนใหญ่เป็นความเสียหายโดยทางอ้อมที่อาจเกิดจากการขาดเสถียรภาพของคันทางอันเนื่องมาจากสภาพของชั้นดินเดิมที่อ่อนตัวหรือบดอัดอย่างไม่มีประสิทธิภาพหรืออาจเกิดจากการมีน้ำใต้ดินไหลผ่านใต้คันทางในบางจุดของถนนจึงอาจทำให้เกิดการขาดเสถียรภาพของคันทางได้โดยง่ายเนื่องจากการสั่นไหวของคลื่นแผ่นดินไหว จากข้อมูลความเสียหายและการพังทลายของถนนที่ผ่านมาในประเทศไทยที่ส่วนใหญ่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวโดยทางอ้อม คู่มือนี้จึงเสนอเฉพาะแนวทางและข้อเสนอแนะเพื่อลดโอกาสความเสียหายของถนนภายหลังการเกิดแผ่นดินไหวที่อาจเกิดเนื่องจากการขาดเสถียรภาพของคันทางเป็นหลัก โดยเนื้อหาไม่ครอบคลุมถึงวิธีการเสริมความแข็งแรงของคันทางเพื่อให้สามารถต้านทานต่อแรงแผ่นดินไหว เนื่องจากปัจจัยด้านค่าก่อสร้างที่อาจสูง โดย



แนวทางลดโอกาสการพังทลายและการพิจารณาบำรุงรักษาและซ่อมแซมความเสียหายของคันทางในบางจุดที่เสียหายภายหลังแผ่นดินไหวจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมและแนะนำในคู่มือเล่มนี้

สำหรับแนวทางและข้อแนะนำในการลดความเสี่ยงของถนนและโครงสร้างชั้นทางเนื่องจากแผ่นดินไหวในคู่มือนี้อ้างอิงบางส่วนมาจาก มยพ. 1303-57 มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

6.2 ความเสี่ยงภัยทางธรณีวิทยาจากแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างชั้นทางและแนวทางออกแบบ

ความเสี่ยงภัยทางธรณีวิทยาต่อโครงสร้างชั้นทางที่อาจเกิดความเสียหายเนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหวในพื้นที่ ทั้งที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน การเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลว (Liquefaction) การอัดตัวของมวลดินที่ไม่สม่ำเสมอ การเกิดดินถล่ม ที่เกิดจากแผ่นดินไหวมีโอกาสเกิดขึ้นได้ สำหรับการประเมินความเสี่ยงภัยทางธรณีวิทยาที่เกิดจากรอยเลื่อนซึ่งเป็นผลจากแผ่นดินไหวนั้น ควรรวบรวมผลการประเมินความเสี่ยงภัยจากหน่วยงานที่เชื่อถือได้

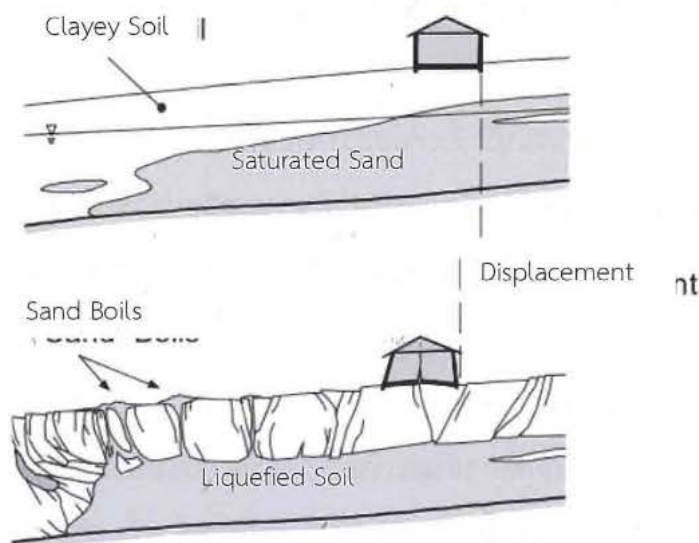
ในกรณีที่ผลกระทบต่างๆจากแผ่นดินไหว ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินในระดับที่ส่งผลต่อสมรรถนะของโครงสร้างชั้นทาง อาจต้องกำหนดให้มีกระบวนการบรรเทาความเสี่ยงภัยที่เหมาะสมโดยข้อพิจารณาเบื้องต้นสำหรับการลดความเสียหายของโครงสร้างชั้นทางตามกรณีต่างๆแสดงดังนี้

6.2.1 รอยเลื่อนทางธรณีวิทยา

การประเมินความเสี่ยงภัยจากรอยเลื่อนมีพลังในพื้นที่ที่ก่อสร้างถนนและโครงสร้างชั้นทางควรอ้างอิงข้อมูลการศึกษาธรณีวิทยาและประเมินความเสี่ยงภัยจากรอยเลื่อนมีพลังของหน่วยงานที่เชื่อถือได้เป็นหลัก โดยควรพิจารณาหลีกเลี่ยงการก่อสร้างถนนและโครงสร้างชั้นทางที่พาดผ่านแนวรอยเลื่อนที่มีพลังเพื่อลดโอกาสที่จะเกิดความเสียหายของโครงสร้างชั้นทางได้ในอนาคต

6.2.2 ปรากฏการณ์ทรายเหลว

ปรากฏการณ์ทรายเหลวเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในทราย เป็นผลมาจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงจากแผ่นดินไหว ทำให้ดินทรายหลวมอัดตัวมีค่าแรงดันน้ำในโพรงดินมีค่าสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับหน่วยแรงประสิทธิผล และในที่สุดทำให้ดินทรายสูญเสียกำลังรับแรงเฉือนและเปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุกึ่งของเหลว



รูปที่ 6.2-1 การเกิดทรายไหลส่งผลให้ดินเหนียวชั้นบนเคลื่อนตัวและโครงสร้างบนผิวดินเกิดความเสียหาย

ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดินและข้อมูลระดับน้ำใต้ดินบริเวณใต้โครงสร้างชั้นทาง เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญที่สุดในการยืนยันการมีอยู่ของวัสดุที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลว ในกรณีที่พบวัสดุที่อาจเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลวในบริเวณที่ก่อสร้างถนนและโครงสร้างชั้นทาง ต้องทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติม ได้แก่ ชนิดของดิน ความหนาแน่นของดิน ระดับน้ำใต้ดิน ความลาดเอียงของพื้นดิน และความแตกต่างของการเคลื่อนที่แนวราบและแนวตั้ง

ในการกำหนดว่าพื้นที่ใดไม่มีความเสี่ยงภัยจากการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลวได้นั้น นอกจากการตรวจสอบประวัติการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลวในพื้นที่ดังกล่าว หรือในพื้นที่ใกล้เคียงแล้ว ต้องตรวจสอบข้อมูลเพิ่มเติมดังต่อไปนี้



- (1) สภาพทางธรณีวิทยาได้ผิวดินประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวแข็งหรือดินตะกอนปนดินเหนียว
- (2) พื้นที่ประกอบด้วยดินที่มีความไวตัวต่ำ
- (3) สภาพทางธรณีวิทยาเป็นดินปนทรายที่มีค่า SPT หรือ $(N_1)_{60}$ อย่างน้อย 30 ครั้งต่อ 300 มิลลิเมตร โดยใช้มาตรฐาน ที่อ้างถึง [11] หรือดินที่มีปริมาณดินเหนียวมากกว่าร้อยละ 20
- (4) ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าส่วนที่ลึกที่สุดของฐานรากอย่างน้อย 10 เมตร หรือต่ำกว่าระดับผิวดินอย่างน้อย 15 เมตร ทั้งนี้ต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินตามฤดูกาล รวมถึงประวัติการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน

ในกรณีที่ข้อมูลต่างๆ ระบุว่าพื้นที่ก่อสร้างถนนและโครงสร้างชั้นทางมีความเสี่ยงภัยต่อการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลว ให้ดำเนินการประเมินการเคลื่อนตัวของมวลดินที่อาจเกิดขึ้นจากการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลว ตามขั้นตอนและข้อกำหนดโดยหน่วยงานที่เชื่อถือได้

6.2.3 การอัดตัวที่ไม่สม่ำเสมอ

ดินแต่ละประเภทเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนด้วยแรงแผ่นดินไหว จะเกิดการยุบตัวที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของดินนั้นๆ สำหรับถนนและโครงสร้างชั้นทางที่ก่อสร้างผ่านแนวรอยเลื่อนหรืออยู่บนพื้นที่ที่ประกอบด้วยชั้นดินที่มีคุณลักษณะการยุบตัวที่ต่างกันมากๆ เมื่อเกิดแผ่นดินไหว อาจส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นในการรวบรวมข้อมูลดินในพื้นที่ที่ก่อสร้างถนนและโครงสร้างชั้นทางเพื่อประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดการอัดแน่นที่ไม่สม่ำเสมอ

พื้นที่ที่สามารถกำหนดให้เป็นพื้นที่ที่ปลอดภัยจากการอัดแน่นที่ไม่สม่ำเสมอได้หากสภาพทางธรณีวิทยาเป็นไปตามเกณฑ์ต่อไปนี้

- (1) วัสดุทางธรณีวิทยาที่ระดับต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ไม่ถูกจัดว่ามีความเสี่ยงต่อการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลว
- (2) วัสดุทางธรณีวิทยาที่มีอายุเก่ากว่า 11,000 ปี ดินเหนียวแข็ง หรือดินตะกอนปนดินเหนียว หรือดินทราย ดินตะกอนและกรวดที่มีค่า SPT หรือ $(N_1)_{60}$ อย่างน้อย 20 ครั้งต่อ 300 มิลลิเมตร



ในกรณีที่สภาพทางธรณีวิทยาของพื้นที่ที่ทำการศึกษามีความเสี่ยงต่อการเกิดอัดแน่นที่ไม่สม่ำเสมอแล้วต้องดำเนินการประเมินผลโดยละเอียด ตามวิธีการที่เหมาะสม

6.2.4 ดินถล่ม

ดินถล่มเป็นปรากฏการณ์ที่มวลดินเคลื่อนตัวลงมาตามลาดดิน ทั้งนี้ ข้อมูลการสำรวจสภาพทางธรณีวิทยาเป็นข้อมูลหลักในการตรวจสอบความเสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มของมวลดินในพื้นที่ที่ก่อสร้างถนนและโครงสร้างชั้นทาง และต้องมีการประเมินเสถียรภาพของลาดดินในกรณีดังต่อไปนี้

- (1) ลาดดินมีความลาดเอียงมากกว่า 18 องศา (แนวราบสามต่อแนวตั้งหนึ่ง)
- (2) ในพื้นที่ที่ก่อสร้างถนนและโครงสร้างชั้นทางหรือในบริเวณใกล้เคียง เคยมีประวัติการเกิดดินถล่มมาก่อน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้วิธีแรงเทียม สามารถใช้ได้ในพื้นที่ที่มวลดินไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลวหรือมวลดินนั้นไม่มีการสูญเสียกำลังรับน้ำหนักในขณะที่รับแรงกระทำ ทั้งนี้ หากมวลดินมีความเสี่ยงต่อการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลว หรือมีความเสี่ยงในการสูญเสียกำลังรับน้ำหนักขณะรับแรงกระทำจากภายนอก ต้องทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยวิธีแบบพลศาสตร์

ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยวิธีแรงเทียม ให้ใช้ค่าระหว่างหนึ่งในห้าเท่าของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่พิจารณาที่คาบ 0.2 วินาที (S_{rs}) จนถึงประมาณครึ่งหนึ่งของอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดินที่ใช้ตามวัตถุประสงค์ของการเสริมความแข็งแรง ในกรณีที่ค่าความปลอดภัยจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพิ่มเติม

ในกรณีที่ค่าความปลอดภัยจากการวิเคราะห์โดยวิธีแรงเทียมมีค่าน้อยกว่า 1.0 ต้องมีการกำหนดมาตรการที่เหมาะสมในการบรรเทาผลกระทบ หรือทำการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบบล็อกรอยเลื่อน (Block Analysis) เพิ่มเติม เพื่อประเมินขนาดของการเคลื่อนตัวของลาดดินและผลกระทบต่อสมรรถนะของโครงสร้างชั้นทางของถนนต่อไป



นอกจากผลกระทบโดยตรงของการถล่มของลาดดินแล้ว ต้องทำการประเมินผลกระทบทางอ้อมที่เกิดขึ้นจากหินร่วงและโคลนถล่มจากลาดดินที่อยู่ใกล้เคียงโดยใช้วิธีการที่เหมาะสมร่วมด้วย

6.2.5 การบรรเทาความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวเนื่องจากสภาพทางธรณีวิทยา

ในกรณีที่มีความจำเป็นที่จะต้องบรรเทาความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวเนื่องจากสภาพทางธรณีวิทยา เพิ่มเติมหลังจากพิจารณาแนวทางและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวของถนนและโครงสร้างชั้นทางตามที่แนะนำไว้เบื้องต้นแล้ว วิศวกรผู้ออกแบบสามารถทำได้โดยการปรับปรุงสถานะของโครงสร้างชั้นดิน รวมถึงการปรับปรุงอื่นๆ ที่ผ่านการรับรองโดยสถาบันที่น่าเชื่อถือของประเทศไทยหรือต่างประเทศ

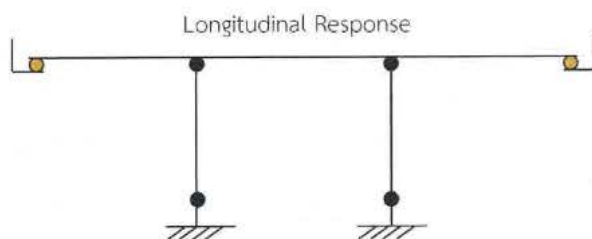


ภาคผนวก ก

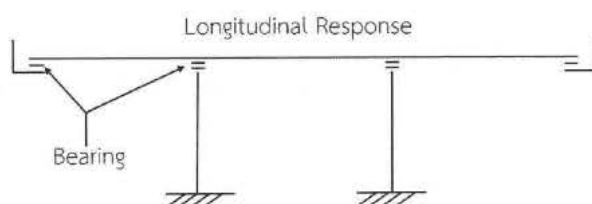
แนวทางการเลือกระบบโครงสร้างสะพานเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

ก.1 การเลือกระบบโครงสร้างสะพาน

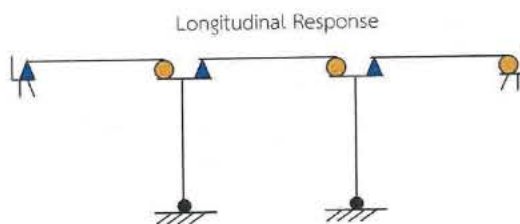
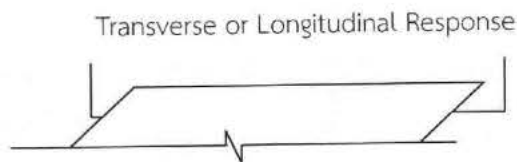
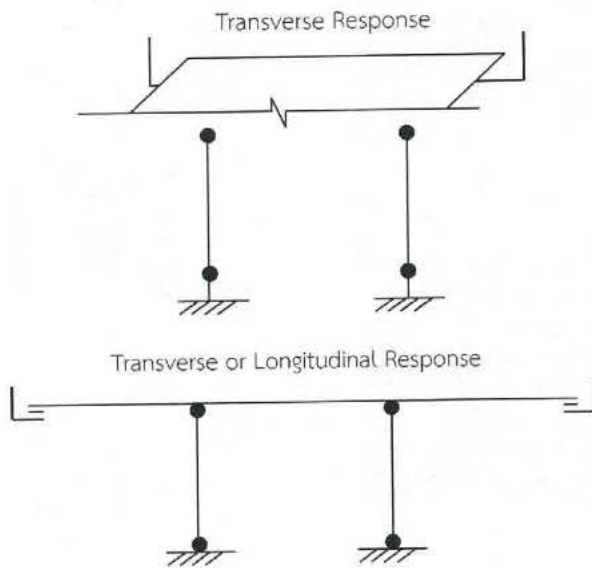
ในการเลือกระบบโครงสร้างสะพานให้มีความแข็งแรงเพียงพอในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวในทิศทางตามยาวและตามขวางของสะพานให้ดำเนินการตามรูปแบบโครงสร้างที่แนะนำในข้อใดข้อหนึ่งจากจำนวน 6 แบบที่แสดงในรูปที่ ก.1-1 ดังนี้



- Plastic Hinges in Inspectable Locations or Elastic Design of Columns.
- Abutment Resistance not Required as Part of ERS



- Isolation Bearings Accommodate Full Displacement
- Abutment not Required as part of ERS



- Plastic Hinges in Inspectable Locations or Elastic Design of Columns.
- Abutment not Required in ERS, Break Away Shear Keys Permissible
- Plastic Hinges in Inspectable Locations or Elastic Design of Columns.
- Isolations Bearings with or without Energy Dissipaters to Limit Overall Displacements
- Abutment Required to Resist the Design Earthquake Elastically
- Longitudinal Passive Soil Pressure Shall be less than 0.70 of the Value Obtained using the Procedure given in [Article 5.2.3](#)
- Multiple Simply-Supported Spans with Adequate Support Lengths
- Plastic Hinges in Inspectable Locations or Elastic Design of Column

รูปที่ ก.1-1 แสดงระบบโครงสร้างสะพานในทิศทางยาวและขวางที่แนะนำในการออกแบบ

- a) รูปแบบที่ 1 ระบบโครงสร้างสะพานตามยาว
สำหรับสะพานแบบต่อเนื่องทั้งโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่าง (Monotonic Connection)



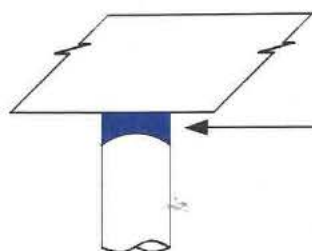
- ในกรณีที่ออกแบบให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ให้เลือกตำแหน่งการเกิด Plastic Hinge เพื่อการสลายพลังงานที่บริเวณที่สามารถตรวจสอบและซ่อมแซมได้ง่าย เช่น ส่วนปลายเสาด้านบนและปลายเสาด้านล่าง
 - ให้ออกแบบให้ตอม่อริม (Abutment) ไม่เกิดความเสียหาย แต่ให้พิจารณาออกแบบรับภาระของโครงสร้างส่วนบนบริเวณ Back Wall ด้วย
- b) รูปแบบที่ 2 ระบบโครงสร้างสะพานตามยาว
สำหรับสะพานแบบเฉพาะโครงสร้างส่วนบน (Continuous Superstructure Only)
- ออกแบบให้เสารองรับการเคลื่อนตัวและแรงแผ่นดินไหวโดยไม่เกิดความเสียหาย
 - ให้ออกแบบให้ Bearings หรือ Isolation Bearing รองรับโครงสร้างส่วนบนรองรับการเคลื่อนตัวและแรงแผ่นดินไหวที่ถ่ายผ่านได้
 - ให้ออกแบบให้ตอม่อริม (Abutment) ไม่เกิดความเสียหาย
- c) รูปแบบที่ 3 ระบบโครงสร้างสะพานตามขวาง
สำหรับสะพานแบบต่อเนื่องทั้งโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่าง (Monotonic Connection)
- ในกรณีที่ออกแบบให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ให้เลือกตำแหน่งการเกิด Plastic Hinge เพื่อการสลายพลังงานที่บริเวณที่สามารถตรวจสอบและซ่อมแซมได้ง่าย เช่น ส่วนปลายเสาด้านบนและปลายเสาด้านล่าง
 - ให้ออกแบบให้ตอม่อริม (Abutment) ไม่เกิดความเสียหาย แต่สามารถพิจารณาออกแบบให้เหล็กเดือยรับแรงด้านข้างของตอม่อริมขาดได้
- d) รูปแบบที่ 4 ระบบโครงสร้างสะพานตามขวางหรือตามยาว
สำหรับสะพานแบบต่อเนื่องทั้งโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่าง (Monotonic Connection)
- ในกรณีที่ออกแบบให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ให้เลือกตำแหน่งการเกิด Plastic Hinge เพื่อการสลายพลังงานที่บริเวณที่สามารถตรวจสอบและซ่อมแซมได้ง่าย เช่น ส่วนปลายเสาด้านบนและปลายเสาด้านล่าง
 - ให้ออกแบบให้ Bearings รองรับโครงสร้างส่วนบนรองรับการเคลื่อนตัวและแรงแผ่นดินไหวที่ถ่ายผ่านได้
 - ในกรณีต้องการลดการเคลื่อนตัวของสะพานให้ออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ช่วยสลายพลังงานหรือใช้ Isolation Bearing



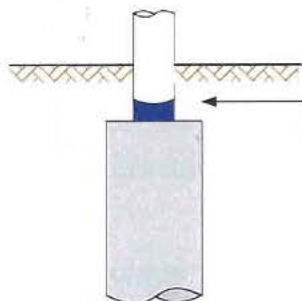
- หากการเคลื่อนตัวของโครงสร้างส่วนบนไม่ทำให้เกิดการชนกับกำแพงกันดินของตอม่อริม ไม่จำเป็นต้องออกแบบรับการชนของโครงสร้างส่วนบนบริเวณ Back Wall
- e) รูปแบบที่ 5 ตอม่อริมรับแรงแผ่นดินไหวตามขวางหรือตามยาวสำหรับสะพานที่มีการก่อสร้างตอม่อริมแบบมีกำแพงกันดิน
 - ออกแบบให้ตอม่อริมรับแรงแผ่นดินไหวแบบไม่เกิดความเสียหาย
 - แรงดินดินด้านข้างตามยาว (Passive Earth Pressure) ของสะพานควรออกแบบให้ไม่เกิน 70% ของค่าที่ยอมให้ตามหัวข้อ 5.2.3 AASHTO LRFD
- f) รูปแบบที่ 6 ระบบโครงสร้างสะพานตามยาวสำหรับสะพานแบบช่วงเดียว (Simple Span)
 - ในกรณีที่ออกแบบให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ให้เลือกตำแหน่งการเกิด Plastic Hinge เพื่อการสลายพลังงานที่บริเวณที่สามารถตรวจสอบและซ่อมแซมได้ง่ายที่ส่วนปลายเสาด้านล่าง
 - ให้ออกแบบให้ความยาวของบารองรับของตอม่อกลางและตอม่อริมสามารถรองรับการเคลื่อนตัวของสะพานได้ หรือ ทำการออกแบบ Restrainer หรือ Seismic Buffer เพื่อถ่ายแรงแผ่นดินไหวไปยังตอม่อและลดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างโครงสร้างส่วนบนและตอม่อ
 - หากการเคลื่อนตัวของโครงสร้างส่วนบนไม่ทำให้เกิดการชนกับกำแพงกันดินของตอม่อริมไม่จำเป็นต้องออกแบบรับการชนของโครงสร้างส่วนบนบริเวณ Back Wall

นอกจากนั้นส่วนของโครงสร้างที่ควรออกแบบให้สลายพลังงานได้ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวแสดงดังนี้

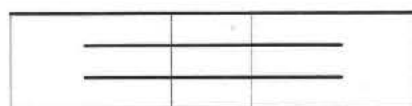
1. ปลายส่วนบนของเสาส่วนที่ต่อจาก Cap beam ในกรณีของ Multiple Column Pier และ Pile Bent
2. ปลายส่วนล่างของเสาที่อยู่เหนือระดับดินหรือต่ำกว่าระดับผิวดินไม่มาก
3. ส่วนของ Isolation Bearing หรือ Bearing ที่ออกแบบรองรับการเคลื่อนตัวของแผ่นดินไหวได้โดยไม่เกิดความเสียหาย
4. ปลายส่วนล่างของเสาที่รองรับด้วยฐานรากเสาเข็มกลุ่ม
5. ปลายล่างของตอม่อแบบกำแพงด้านแกนอ่อน
6. กำแพงกันดินของตอม่อริม



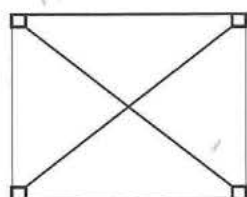
Plastic hinges below cap beams
including pile bent



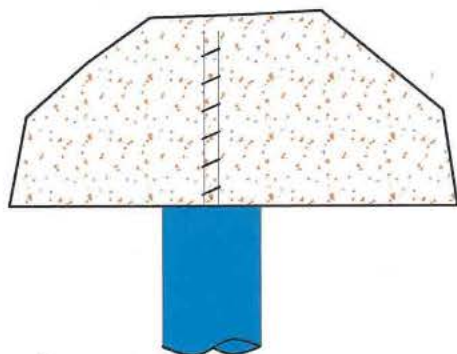
Above ground/near
ground plastic
hinges



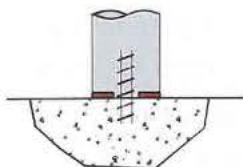
Seismic isolation bearings designed to
accommodate expected seismic
displacements with no damage



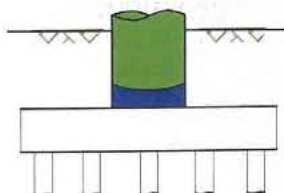
Tensile yielding and inelastic
compression buckling of ductile
centrally braced frames



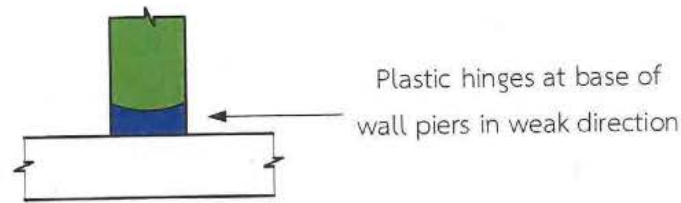
Piles with "pinned-
head" conditions



Columns with moment reducing
or pinned hinge details



Capacity protected pile caps,
including caps with battered piles,
which behave elastically



Plastic hinges at base of wall piers in weak direction



Pier walls with or without pier

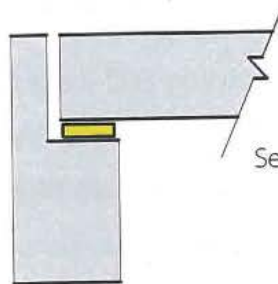


Spread footings that satisfy the overturning criteria of Article 6.3.4

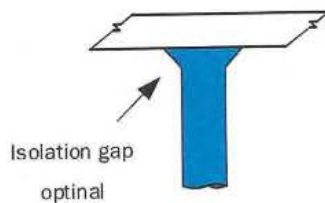


Passive abutment resistance required as part of ERS

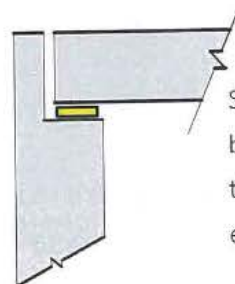
Use 70% of passive soil strength designated in Article 5.2.3



Seat abutments whose backwall is designed to fuse



Columns with architectural flares with or without an isolation gap.

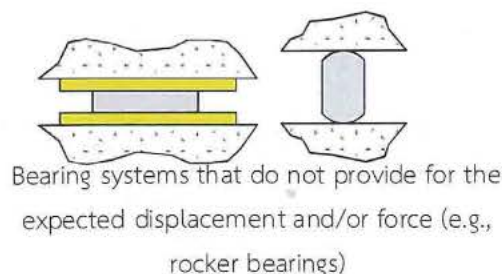
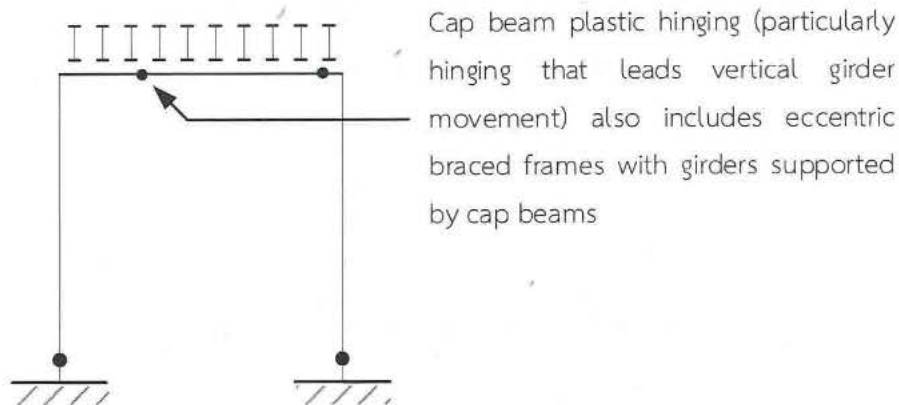
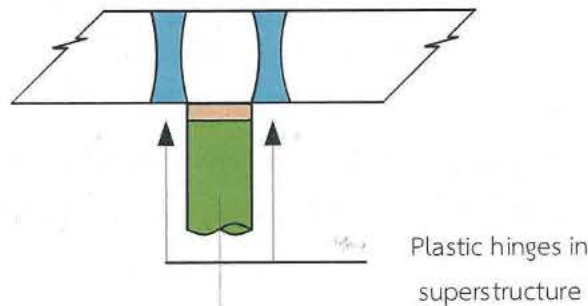


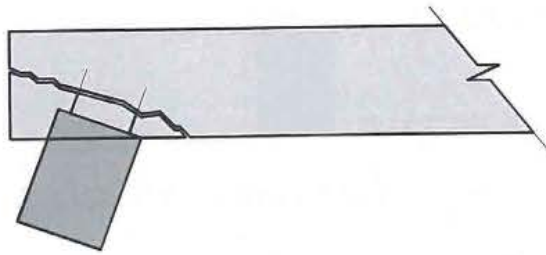
Seat abutments whose backwall is designed to resist the expected impact force in an essentially elastic manner

รูปที่ ก.1-2 ชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพานที่แนะนำในการออกแบบเพื่อสลายพลังงานแผ่นดินไหว

นอกจากนั้นส่วนของโครงสร้างที่ไม่ควรออกแบบให้สลายพลังงานได้ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวแสดงดังนี้

1. การเกิด Plastic Hinges ในโครงสร้างส่วนบน
2. การเกิด Plastic Hinges ใน Cap beam ที่รองรับ Girders ที่ทำให้เกิดการทรุดตัวในแนวตั้งของคานสะพาน
3. ส่วนของ Isolation Bearing หรือ Bearing ที่ไม่ได้ออกแบบรองรับการเคลื่อนตัวหรือแรงของแผ่นดินไหวได้
4. ส่วนของ Battered Pile ที่ไม่ได้ออกแบบให้สลายพลังงานแผ่นดินไหว





Battered-pile systems that are not designed to fuse geotechnically or structurally by elements with adequate ductility capacity

รูปที่ ก.1-3 ชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพานที่ห้ามออกแบบให้สลายพลังงานแผ่นดินไหว

ก.2 สัดส่วนของโครงสร้าง

นอกจากการเลือกระบบและชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานเพื่อรองรับและสลายพลังงานแผ่นดินไหวแล้ว คู่มือนี้ได้แนะนำการออกแบบสัดส่วนของโครงสร้างสะพานที่เหมาะสมเพื่อให้มีคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์และผลตอบสนองระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวที่มีประสิทธิภาพดังนี้

ก.2.1 การจัดให้สะพานมีความสมดุลของความแข็งแกร่ง (Balanced Stiffness)

คู่มือนี้แนะนำให้ผู้ออกแบบจัดสัดส่วนของสะพานให้มีความสมดุลของความแข็งแกร่งดังนี้

1. สำหรับระหว่างตอม่อสองตอม่อใดๆที่รองรับสะพานตามแนวช่วงยาวแบบต่อเนื่อง (Frame) หรือระหว่างเสาสองต้นใดๆภายในตอม่อหนึ่งๆ
 - กรณีความกว้างของ Frame คงที่ สัดส่วนของความแข็งแกร่งควรเป็นดังนี้

$$\frac{k_i^*}{k_j^*} \geq 0.5 \quad (\text{ก-1})$$

- กรณีความกว้างของ Frame ไม่คงที่ สัดส่วนของความแข็งแกร่งควรเป็นดังนี้

$$\frac{k_i^* \cdot m_j}{k_j^* \cdot m_i} \geq 0.5 \quad (\text{ก-2})$$



2. สำหรับระหว่างตอม่อสองระดับที่ติดกันที่รองรับสะพานตามแนวขวางยาว
แบบต่อเนื่องหรือระหว่างเสาสองต้นที่ติดกันภายในตอม่อหนึ่งๆ
- กรณีความกว้างของ Frame คงที่ สัดส่วนของความแข็งแรงควรเป็นดังนี้

$$\frac{k_i^*}{k_j^*} \geq 0.75 \quad (ก-3)$$

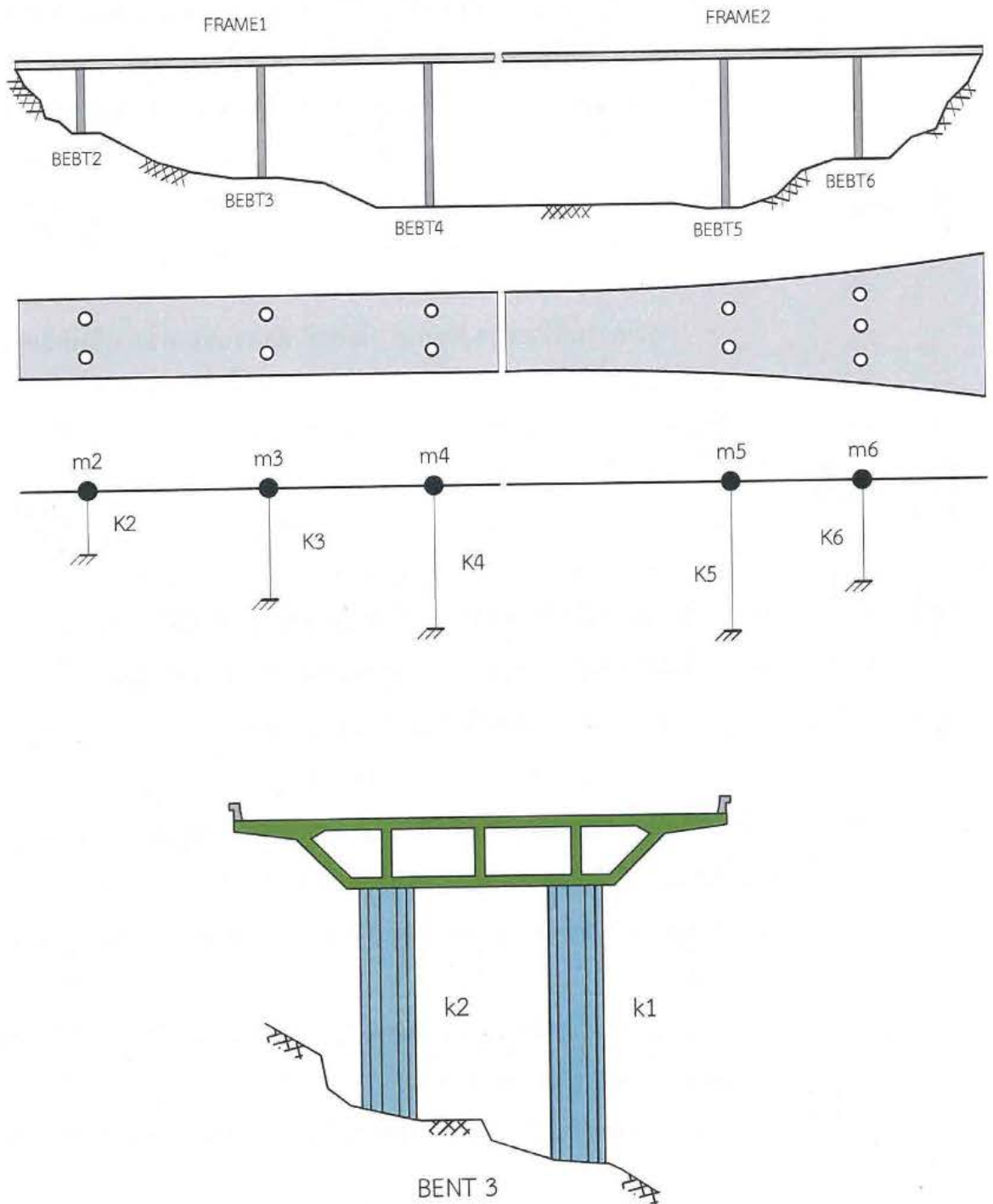
- กรณีความกว้างของ Frame ไม่คงที่ สัดส่วนของความแข็งแรงควรเป็นดังนี้

$$\frac{k_i^* \cdot m_j}{k_j^* \cdot m_i} \geq 0.75 \quad (ก-4)$$

โดยที่ k_i^*	คือ	สติฟเนสประสิทธิภาพที่น้อยกว่าของตอม่อตัวหรือเสาที่พิจารณา
k_j^*	คือ	สติฟเนสประสิทธิภาพที่มากกว่าของตอม่อตัวหรือเสาที่พิจารณา
m_i, m_j	คือ	มวลของโครงสร้างส่วนที่พิจารณา Frame i และ j

โดยการจัดสัดส่วนของสะพานที่เป็น Frame ช่วงใดๆ ที่พิจารณาให้เกิดความสมดุลของความแข็งแรง (Balanced Stiffness) จะมีประโยชน์ดังนี้

- ช่วยลดการเกิดความเสียหายแบบไม่สม่ำเสมอซึ่งจะเกิดกับส่วนโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า
- ช่วยให้เกิดการกระจายตัวของผลตอบสนองของสะพานในช่วงอินอีลาสติกที่สม่ำเสมอตลอดความยาวสะพาน
- ช่วยลดโมเมนต์บิดในเสาเนื่องจากการเกิดการหมุนตัวแบบแข็งของโครงสร้างส่วนบน



รูปที่ ก.2-1 ตัวอย่างการพิจารณา Frame ของสะพานสำหรับการสมดุลของความแข็งเกร็ง (Unbalanced Stiffness)



ก.2.2 การจัดให้สะพานมีความสมดุลของรูปร่าง (Balanced Frame Geometry)

คู่มือนี้แนะนำให้ผู้ออกแบบจัดสัดส่วนของสะพานให้มีความสมดุลของรูปร่างดังนี้

1. สำหรับระหว่างตอม่อสองตอม่อที่ติดกันที่รองรับสะพานตามแนวช่วงยาวแบบต่อเนื่อง (Frame) ให้คาบการสั่นพื้นฐานในทิศทางตามยาว (Longitudinal) และตามขวางเป็นไปดังนี้

$$\frac{T_i}{T_j} \geq 0.70$$

(ก-5)

โดยที่ T_i คือ คาบการสั่นพื้นฐานในทิศทางยาวหรือขวางของ Frame ที่อ่อนกว่า
 T_j คือ คาบการสั่นพื้นฐานในทิศทางยาวหรือขวางของ Frame ที่แข็งแกร่งกว่า

โดยการจัดความสมดุลของรูปร่างของสะพานที่เป็น Frame ช่วงใดๆ จะมีประโยชน์ดังนี้

- ช่วยลดการถ่ายแรงที่ไม่สม่ำเสมอจาก Frame ที่อ่อนกว่าไปยัง Frame ที่แข็งแกร่งกว่าระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว
- ในกรณีที่ สัดส่วนของคาบการสั่นพื้นฐานในทิศทางยาวและขวางน้อยกว่า 0.70 และสะพานประกอบด้วย Frame ต่อกันหลายๆช่วงเกิน 5 frame แบบจำลองควรสร้างขึ้นโดยพิจารณา Frame ต่อกันอย่างน้อย 5 Frame โดย Frame ที่ 1 และ ที่ 5 ใช้ออกแบบสำหรับ Boundary Frame และใช้ Frame 2 ถึง 4 ออกแบบ Interior Frame
- ในกรณีที่ สัดส่วนของคาบการสั่นพื้นฐานในทิศทางยาวและขวางมากกว่า 0.70 แต่น้อยกว่า 1.0 และสะพานประกอบด้วย Frame ต่อกันหลายๆช่วงเกิน 5 frame แบบจำลองสามารถสร้างขึ้นโดยพิจารณา Frame ต่อกันน้อย 5 Frame ได้

กรณีที่จำเป็นต้องปรับค่าของคาบการสั่นของโครงสร้างสะพานหรือความแข็งเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่แนะนำกรณีสมดุลความแข็งแรงและสมดุลรูปร่าง ควรดำเนินการโดยใช้วิธีดังนี้

- ปรับขนาดหน้าตัดของเสาเข็มเจาะ (กรณีที่ใช้เสาเข็มเจาะ)
- ปรับความยาวเสา เช่นการปรับตำแหน่งของฐานราก
- ปรับ End Fixity ของชิ้นส่วนโครงสร้างตามรายละเอียดจริง
- ลดหรือปรับการกระจายตัวของมวลของโครงสร้างส่วนบน



- ปรับขนาดของหน้าตัดเสาหรือปริมาณของเหล็กเสริมตามยาว
- ปรับตำแหน่งหรือเพิ่มหรือลดจำนวนของเสาในแต่ละ Frame หรือ ตอม่อต๊ับ
- ปรับตำแหน่งหรือการจัดเรียงหรือทิศของ Hinges หรือ รอยต่อเพื่อการขยายตัว (Expansion Joint)
- ติดตั้ง Isolation Bearing หรือ Damper



ภาคผนวก ข

แนวทางการสร้างแบบจำลองของระบบโครงสร้างสะพานโดย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

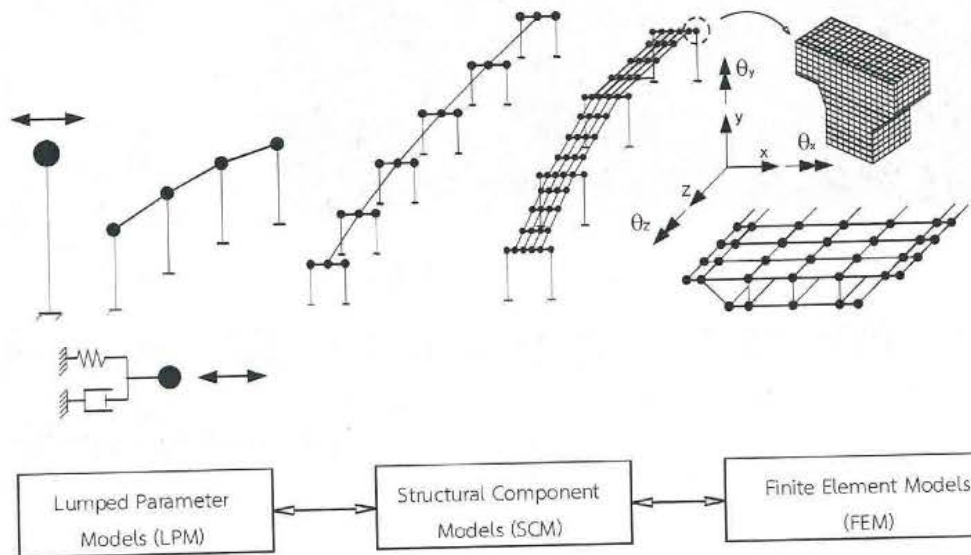
ข.1 การสร้างแบบจำลองของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองของโครงสร้างสะพานใช้เพื่อการวิเคราะห์ระบบโครงสร้างสะพานให้ได้มาซึ่งผลตอบสนองและพฤติกรรมของโครงสร้างที่สำคัญและจำเป็นต่อการใช้เพื่อการออกแบบและประกอบการให้รายละเอียดของส่วนโครงสร้าง โดยแบบจำลองของโครงสร้างสะพานจะสร้างและพัฒนาจากพื้นฐานของกฎของฟิสิกส์และสมการทางคณิตศาสตร์ โดยปกติผลตอบสนองของโครงสร้างที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบได้แก่ แรงและโมเมนต์ภายใน ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง สำหรับการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ ผลตอบสนองที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างสะพาน ได้แก่ คาบการสั่นของโครงสร้าง ลักษณะของโหมดการตอบสนองของโครงสร้าง เป็นต้น

ในคู่มือนี้การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างสะพานจะแนะนำให้ใช้วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งเป็นวิธีการสร้างแบบจำลองที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันและถูกพัฒนาใช้ในโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างส่วนใหญ่ ในการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างสะพาน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบภายใต้แรงแผ่นดินไหวโดยทั่วไปจะต้องพิจารณา 3 ส่วน ได้แก่ 1) แบบจำลองของสะพานของชิ้นส่วนสะพาน รอยต่อ และ ฐานรองรับ 2) วัสดุก่อสร้าง 3) แรงกระทำต่อโครงสร้างสะพาน

ในหัวข้อนี้ สรุปเฉพาะข้อแนะนำในส่วนของแบบจำลองชิ้นส่วน รอยต่อและฐานรองรับของสะพานประเภทต่างๆที่ใช้ในประเทศไทย

ข.2 ประเภทของแบบจำลองและอีลิเมนต์



รูปที่ ข.2-10 ประเภทของแบบจำลองที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน

ประเภทของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานจะขึ้นกับ (i) ความสำคัญของโครงสร้าง (ii) จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ และ (iii) ระดับความถูกต้องที่ต้องการจากผลการวิเคราะห์ รูปที่ ข.2-1 แสดงประเภทของแบบจำลองที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน โดยประเภทของแบบจำลองที่ให้ผลลัพธ์เฉพาะค่าของคาบการสั่นไหวของโครงสร้าง การเคลื่อนตัว ความเร่งความเร็ว และแรงเฉือนที่ฐานโดยรวมนั้นสามารถสร้างแบบจำลองประเภท Lumped Parameter Model (LPM) โดยการใช้แบบจำลองประเภทนี้ต้องอาศัยการปรับจูนค่าของสติฟเนสและมวลประสิทธิผลให้สามารถให้ค่าที่เป็นตัวแทนของโครงสร้างสะพานโดยรวมได้ โดยหากผลการวิเคราะห์มีความต้องการในระดับแรงภายในของส่วนโครงสร้างสะพานต่างๆมากขึ้นเช่นในโครงสร้างส่วนบนประเภทคาน หรือในตอม่อตบต่างๆ แบบจำลองที่ใช้จะเป็นประเภท Structural Component Models (SCM) และหากต้องการรายละเอียดในส่วนประกอบของโครงสร้างสะพานที่ละเอียดมากขึ้น เช่น หน่วยแรงและความเครียดเฉพาะส่วนของโครงสร้างที่ไม่สามารถใช้แบบจำลองประเภทคานได้การใช้แบบจำลองประเภท Finite Element Model (FEM) ที่ใช้อิLEMENTที่เป็นสามมิติก็มีความจำเป็น



จากระดับการสร้างแบบจำลองข้างต้นนั้นส่วนของอีลิเมนต์พื้นฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสะพานมีดังนี้

- Truss Element คืออีลิเมนต์ที่รับแรงในแนวแกนที่เป็นแรงดึงหรือแรงอัด โดย Degree of Freedom ของอีลิเมนต์นี้ได้แก่การเคลื่อนตัวในแนวแกนของ Truss ที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของอีลิเมนต์ โดยปกติหน้าตัดและคุณสมบัติของวัสดุจะสม่ำเสมอตลอดความยาวของอีลิเมนต์ ในการใช้จำลองโครงสร้างสะพานสามารถนำอีลิเมนต์นี้เชื่อมต่อกันในลักษณะ 2 มิติ หรือ 3 มิติ ได้ ซึ่งจะนิยมใช้ในการวิเคราะห์สะพานประเภทโครงข้อหมุน (Truss Bridge)
- Beam Element อีลิเมนต์ประเภทนี้เป็นแบบคานความล็กน้อยใช้ในการจำลองการรับแรงในแนวขวางและโมเมนต์ โดยปกติอีลิเมนต์ประเภทคานนี้จะมี Dofs เท่ากับ 6 ในแต่ละปลายของคานซึ่งเป็นส่วนของการเคลื่อนตัว 3 ทิศทางและการหมุน 3 ทิศทาง
- Frame Element อีลิเมนต์ประเภทนี้เป็นคานความล็กน้อยจำลองในการรับแรงตามขวางแรงตามแกน และโมเมนต์ ดังนั้นคุณสมบัติของอีลิเมนต์ประเภทนี้จะรวมทั้งจากอีลิเมนต์ประเภท Truss และ Beam เข้าด้วยกัน ในกรณีที่ Frame อีลิเมนต์ใช้ในการจำลองผลในระบบ 3 มิติ จะสามารถพิจารณาผลจากโมเมนต์ดัดสองแกน โมเมนต์บิด แรงในแนวแกน และแรงเฉือนสองแกนของคานได้
- Plate Element อีลิเมนต์ประเภทนี้ใช้จำลองผลของแผ่นพื้นดัดในระบบ 2 มิติ ซึ่งจะมี Dofs คือ การดัดและการเคลื่อนตัวตั้งฉากกับแผ่นพื้น ที่เกิดจากโมเมนต์ดัดในแนวแกนของแผ่นพื้นและในทิศตั้งฉากกับแผ่นพื้น โดยเป็นที่ทราบกันว่าอีลิเมนต์นี้เป็นรูปแบบหนึ่งของ Shell อีลิเมนต์ที่ไม่มีแรงระนาบของแผ่นพื้น (Membrane Loadings)
- Shell Element เป็นอีลิเมนต์ประเภท solid 3 มิติ ที่มีความหนาของด้านหนึ่งน้อยกว่าด้านที่เหลืออีกสองด้านมาก โดยปกติสามารถใช้จำลองผลที่เกิดจากโมเมนต์ดัดในแนวแกนของแผ่นพื้นและในทิศตั้งฉากกับแผ่นพื้น แรงเฉือนพร้อมทั้งแรงในระนาบ (Membrane Loading) ได้ ในการใช้สร้างแบบจำลองโครงสร้าง Shell อีลิเมนต์ สามารถใช้เป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมได้
- Plane Element เป็นอีลิเมนต์ประเภท solid 2 มิติที่ใช้จำลองการเคลื่อนตัวในระนาบ โดยอีลิเมนต์ประเภทนี้สามารถรองรับได้เฉพาะแรง ไม่สามารถรับโมเมนต์ดัดได้ ในการจำลองอีลิเมนต์ประเภทนี้มี 2 แบบคือแบบ Plane Stress และ Plane Strain โดยอีลิเมนต์ประเภท Plane Stress ใช้จำลองกรณีที่อีลิเมนต์สามารถเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับระนาบได้อย่างอิสระ ส่วนกรณี Plane Strain จะใช้จำลองกรณีที่อีลิเมนต์ไม่สามารถเคลื่อนตัวได้ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบเช่นการจำลองส่วนของหน้าตัดของโครงสร้างที่มีความยาวมากๆ ได้แก่ อุโมงค์ เป็นต้น

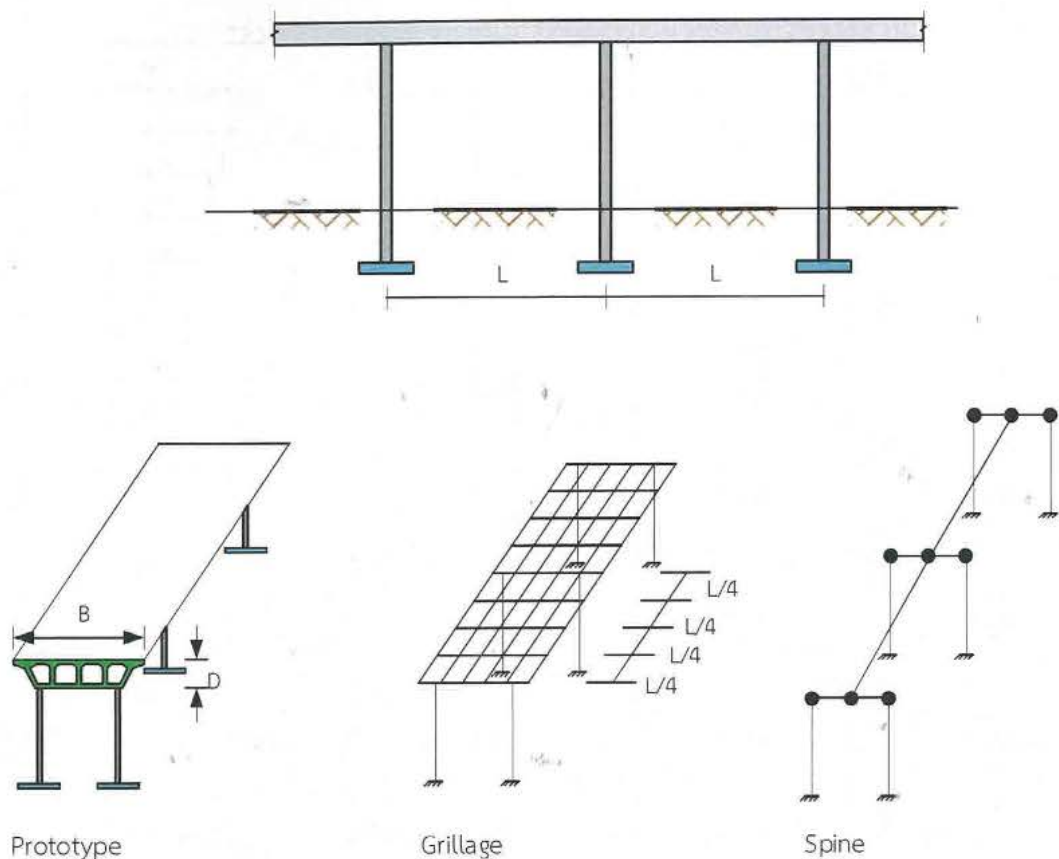


- Solid Element เป็นอิเลเมนต์ประเภท solid 3 มิติที่มี โหนดทั้งหมด 8 โหนดซึ่งใช้สำหรับการจำลองโครงสร้างที่มีลักษณะ 3 มิติที่มีความซับซ้อนและต้องการผลการวิเคราะห์ของความเค้นหรือความเครียดเป็นหลัก
- NLLink Element เป็นอิเลเมนต์ที่ใช้จำลองผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของโครงสร้าง โดยสามารถจำลองเป็นลักษณะ One-Joint Grounded Spring หรือ Two-Joint Link ได้ โดยค่าของสติฟเนสของอิเลเมนต์สามารถสร้างโดยใช้ Spring จำนวน 6 ชุดแยกอิสระต่อกัน ที่รองรับการเคลื่อนตัวได้ 3 ทิศทางและการหมุนใน 3 ทิศทาง

นอกจากประเภทของอิเลเมนต์ข้างต้นแล้วในการจำลองส่วนของฐานรากของสะพานยังมีความจำเป็นต้องใช้อิเลเมนต์ประเภท Boundary Element ที่ใช้เพื่อจำลองผลของฐานรองรับของตอม่อสะพานหรือจำลองผลของแผ่นรองคานสะพานแบบต่างๆซึ่งจะต้องจำลองส่วนของสติฟเนสที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวและการหมุน โดยขนาดของ Boundary Element จะขึ้นกับความละเอียดของ Degree of Freedom (DOFs) ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของฐานรากหรือแผ่นรองคานสะพานนั้นๆ โดยทั่วไปการใช้ Boundary Element ที่เป็นสติฟเนสเมทริกซ์ขนาด 6×6 ก่อนข้างจะเพียงพอต่อการวิเคราะห์สะพานโดยทั่วไป

ข.3 การจำลองโครงสร้างส่วนบน

การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างส่วนบนของสะพานประเภท Slab Bridge, Deck on Girder Bridge, หรือ Box Girder Bridge โดยปกติสามารถใช้แบบจำลองประเภท Spine Model แสดงในรูปที่ ข.3-1 ในการวิเคราะห์ได้ อย่างไรก็ตามหากผลของสติฟเนสตามขวางและการบิดตัวของพื้นสะพาน รวมทั้งผลของ Transverse Diaphragm มีผลต่อการวิเคราะห์และออกแบบสะพาน รวมทั้งการพิจารณาโหมดการสั่นที่ผสมกันเช่นในสะพานที่มีมุมเอียงมาก (Large Skew Angle) ควรใช้แบบจำลองประเภท Finite Element ที่สร้างโดย Plate หรือ Shell Element หรือการใช้ Grillage Model ในการวิเคราะห์

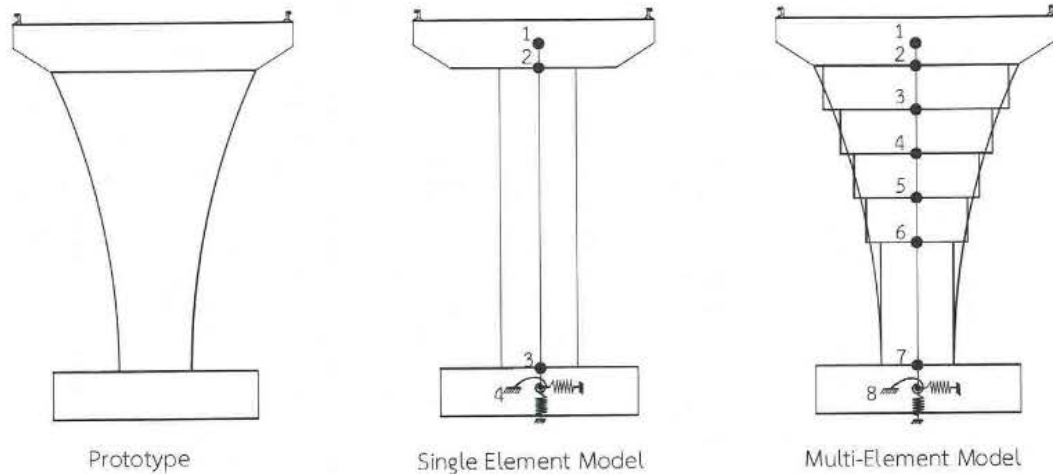


รูปที่ ข.3-1 ประเภทของแบบจำลองที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน (ในระดับ Global)

ข.4 การจำลองโครงสร้างส่วนล่าง

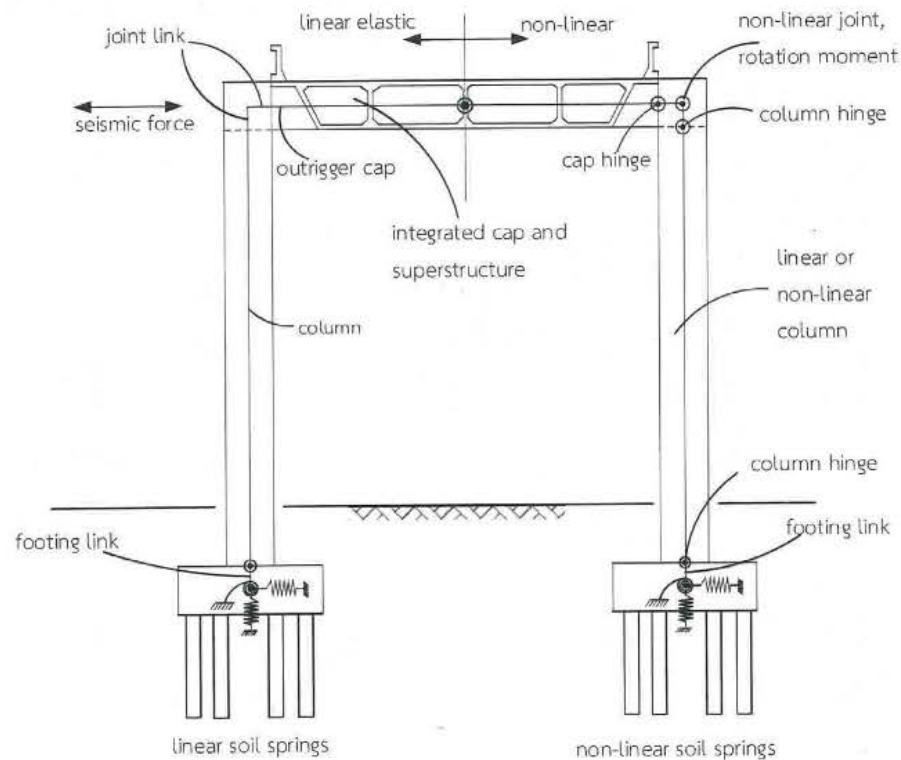
ในการจำลองสะพานหากพิจารณาแล้วว่าโครงสร้างส่วนบนสามารถจำลองเป็นลักษณะ Rigid Body ในขณะที่เกิดแผ่นดินไหวได้สามารถสร้างแบบจำลองโดยพิจารณาเฉพาะดัดต่อม่อได้ โดยในการสร้างแบบจำลองของดัดต่อม่อควรพิจารณาผลของสติฟเนสที่เกิดจากโครงสร้างส่วนบนในส่วน of Frame Element ที่จำลอง Cap beam ของดัดต่อม่อด้วย โดยเฉพาะผลของ Torsional และ Transverse Stiffness ที่เกิดจาก Cap beam ในกรณีที่โครงสร้างส่วนบนมีความหนาและหล่อเป็นเนื้อเดียวกับโครงสร้างส่วนล่าง (Monolithic Connection) และมี Diaphragm ช่วยในการถ่ายแรงบริเวณรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ ข.4-1 และ รูปที่ ข.4-2

นอกจากนั้นการแบ่งจำนวนอีลิเมนต์ในเสาของดัดต่อม่อควรพิจารณาในเหมาะสมเพื่อให้สามารถแสดงผลของโหมดการสั่นของโครงสร้างได้อย่างถูกต้องโดยเฉพาะโหมดการสั่นหลักของโครงสร้าง



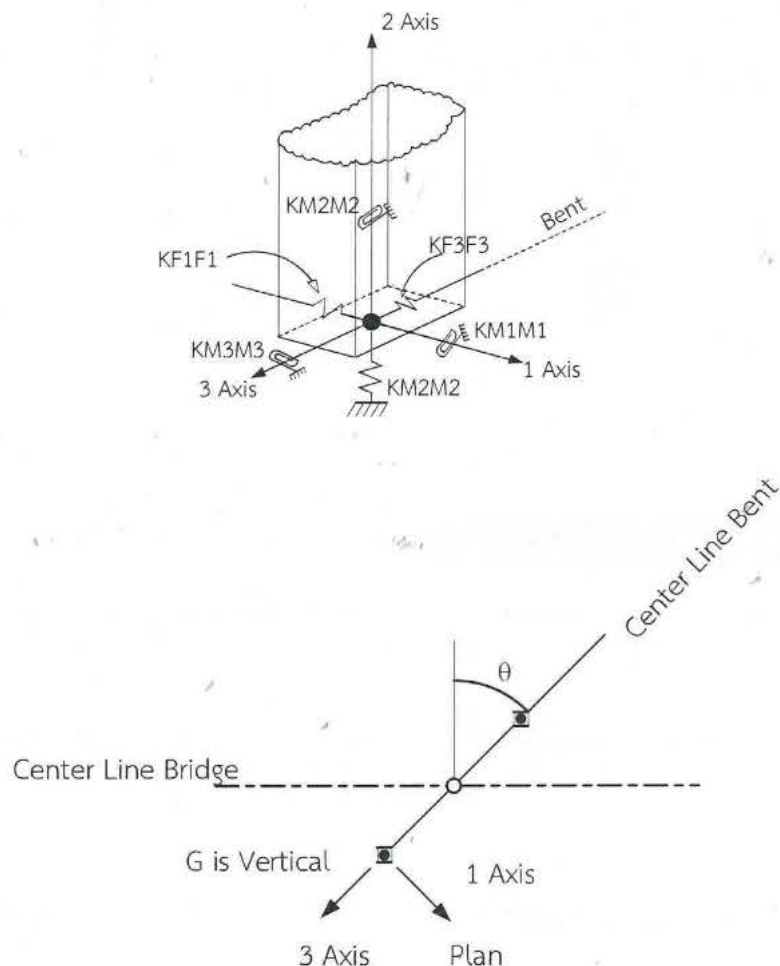
รูปที่ ข.4-1 ตัวอย่างการสร้างแบ่งจำนวนของอีลิเมนต์ของเสาตอม่อ

สำหรับการสร้างแบบจำลองของฐานรากที่ปลายเสานั้นโดยปกติจะเลือกให้รอยต่อของปลายเสากับฐานรากสอดคล้องกับรายละเอียดที่จะให้ในแบบก่อสร้างโดยหากปลายเสาเชื่อมต่อกับฐานรากที่ยึดแน่นต่อการเคลื่อนตัวและการหมุนก็สามารถใช้แบบจำลองที่เป็นลักษณะ Fixed Base ที่ปลายเสาได้ อย่างไรก็ตามหากรายละเอียดที่ใช้ในแบบก่อสร้างอาจมีการเคลื่อนตัวหรือการหมุนได้เนื่องจากการแอ่นตัวของเสาเข็มหรือดินอาจใช้การจำลองรอยต่อที่ปลายของเสาดับตอม่อโดยใช้ Spring ที่จำลองสติฟเฟสในแนวราบ แนวตั้ง และการหมุนในทิศทางต่างๆ ได้



รูปที่ ข.4-2 แสดงตัวอย่างการสร้างแบบจำลองของตอม่อที่เชื่อมต่อกับโครงสร้างส่วนบนแบบ Monolithic Connection

นอกจากนั้นหากดัดตอม่อออกแบบให้มีมุมเอียงจากแนวของโครงสร้างส่วนบนหรือแนวของสะพาน การจำลอง Spring ที่ปลายเสาควรพิจารณาทิศทางการเคลื่อนตัวและการหมุนอยู่ในแนวแกนแข็งและแกนนอนของดัดตอม่อ ดังแสดงในรูปที่ ข.4-3

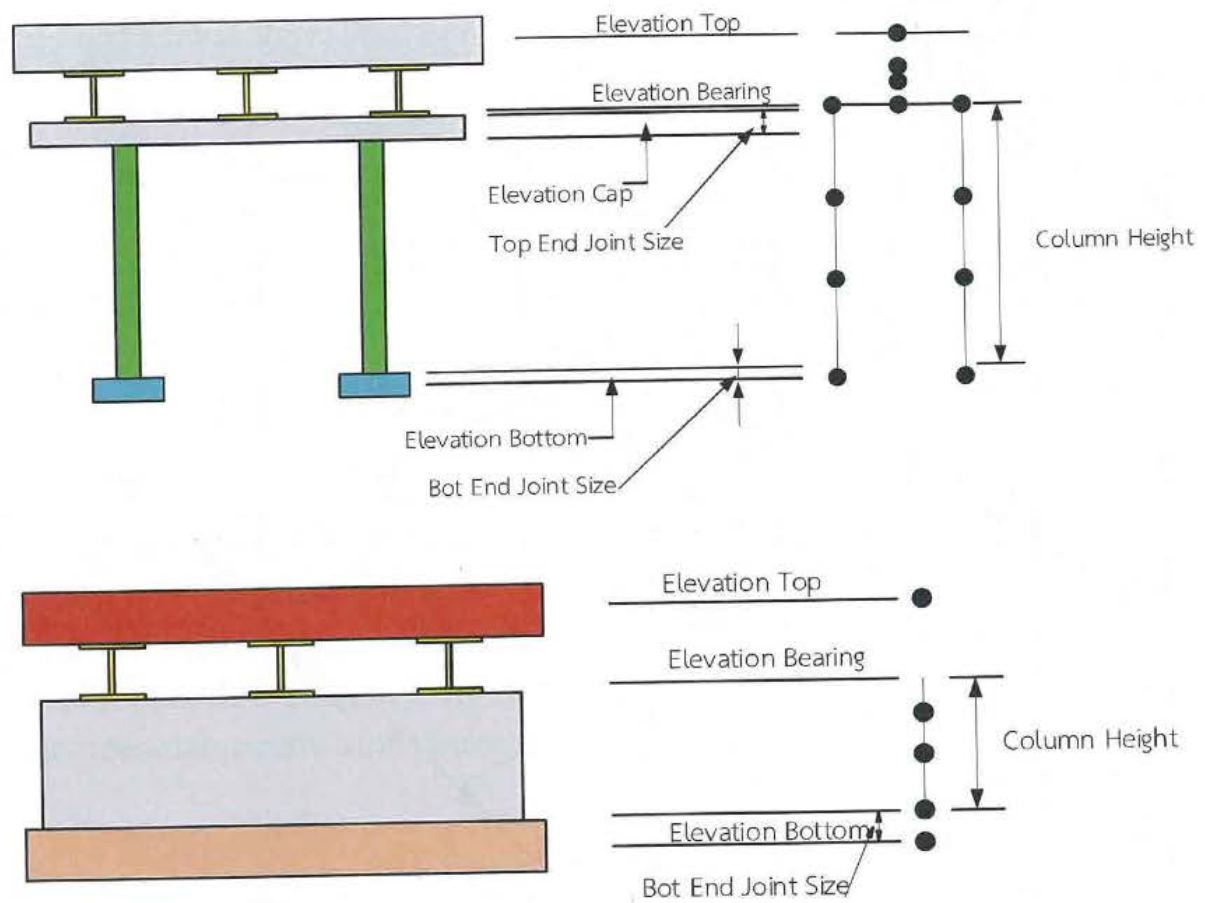


รูปที่ ข.4-3 แสดงตัวอย่างการสร้างแบบจำลองของรอยต่อของปลายเสาดัดตอม่อกับฐานราก

ในการจำลองรอยต่อระหว่างโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่างที่เป็นลักษณะแผ่นรองคานสะพาน (Bearing) นั้น กรณีที่ใช้แบบจำลองประเภท Spine Model ให้พิจารณาดำแหน่งของคานที่จำลองโครงสร้างส่วนบนที่ตำแหน่ง c.g. ของมวลของแผ่นพื้นของสะพานซึ่ง offset จากตำแหน่งของแผ่นคานรองสะพานรวมกับความลึกของคานที่รองรับแผ่นพื้นสะพานนั้น ในกรณีที่โครงสร้างส่วนล่างเป็นลักษณะตอม่อหลายเสาและรองรับโครงสร้างส่วนบนผ่านแผ่นคานรองสะพานและถ่ายแรงผ่าน Cap Beam ให้เชื่อมคานของ Spine Model มายังโหนดของ Cap Beam โดยใช้ Rigid Link หากพิจารณาสถิติเฟนสของแผ่นคานรองสะพานร่วมด้วยอาจทำการใช้ Spring Element ในการเชื่อมระหว่าง Rigid Link และ



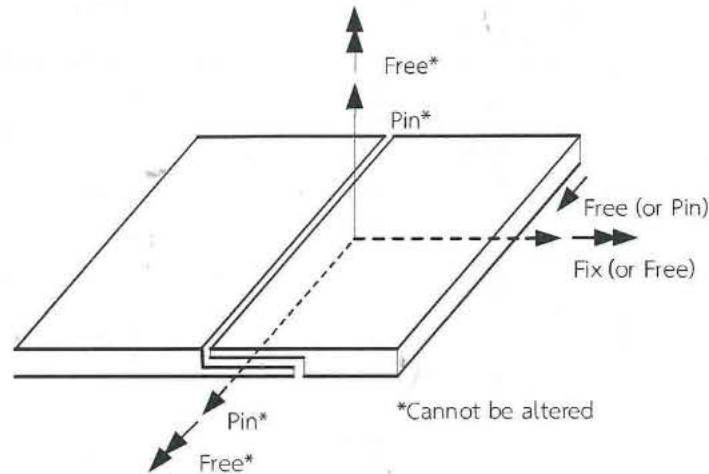
Cap Beam รูปที่ ข.4-4 แสดงตัวอย่างการเชื่อมคานโครงสร้างส่วนบนกับโครงสร้างส่วนล่างกรณีตอม่อสองเสาและตอม่อเสาเดียว



รูปที่ ข.4-4 แสดงแบบจำลองการเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่าง

ข.5 รอยต่อประเภท Hinges

ในกรณีที่โครงสร้างสะพานแบบต่อเนื่องมีการใช้ In Span Hinges เพื่อรองรับการเคลื่อนตัวของสะพานควรพิจารณาสร้างแบบจำลองโดยรวมผลของสะพานทั้งสองข้างของรอยต่อ In Span Hinges นั้น รูปที่ ข.5-1 แสดงตัวอย่างการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของ In Span Hinges

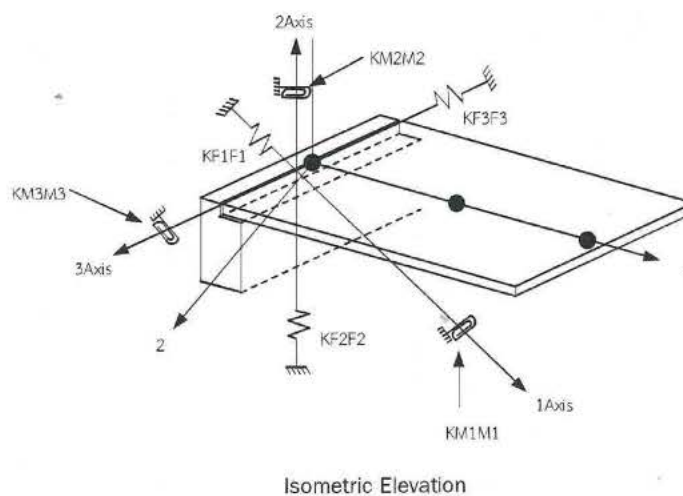


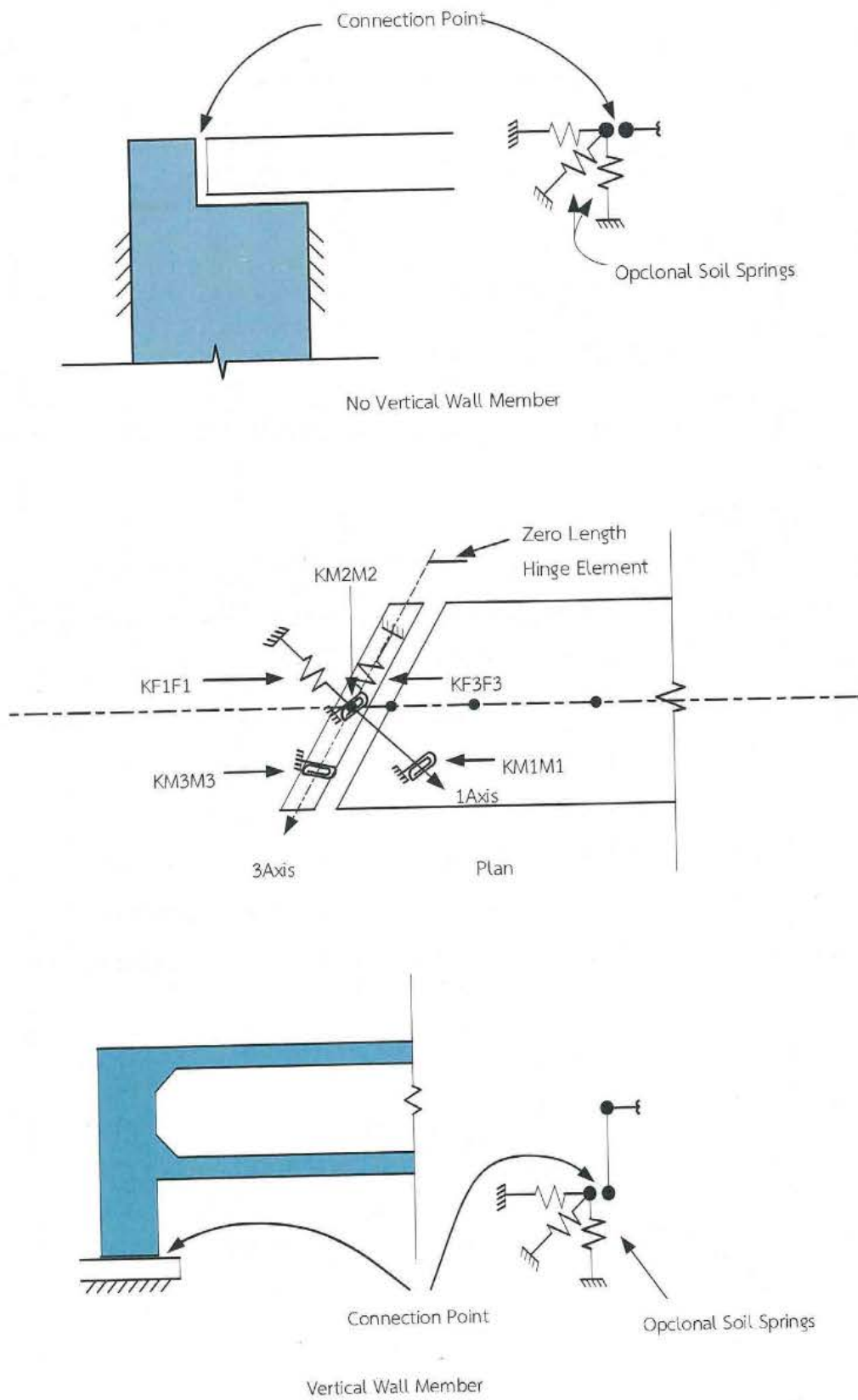
รูปที่ ข.5-1 ตัวอย่างเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของ In Span Hinges

ข.6 การจำลองตอม่อริม

ในการจำลองตอม่อริมของสะพานให้พิจารณารายละเอียดของรอยต่อของตอม่อริมกับโครงสร้างส่วนบนว่าเป็นลักษณะรอยต่อแบบขยายตัว (Expansion Joint) หรือเป็นลักษณะต่อเนื่อง (Integral Abutment) โดยหากเป็นลักษณะของรอยต่อแบบขยายตัว ให้พิจารณาผลของ Expansion Joint เป็นลักษณะ Spring ที่รับแรงอัดได้ แต่ไม่รับแรงดึง โดยผลของสถิติฟเนสของดินที่โอบรัดตอม่อริมอาจพิจารณาโดยใช้ Soil Spring เชื่อมกับอีลิเมนต์ที่จำลองรอยต่อขยายตัว

ในกรณีที่ตอม่อริมเป็นลักษณะต่อเนื่อง (Integral Abutment) ให้พิจารณาผลของความสูงของกำแพงโดยเพิ่ม Rigid Link ให้เชื่อมกับ Frame Element ที่จำลองส่วนของโครงสร้างส่วนบนของสะพาน รูปที่ ข.6-1 แสดงตัวอย่างการจำลองตอม่อริมของสะพานที่พิจารณาผลของ Soil Spring





รูปที่ ข.6-1 ตัวอย่างการจำลองต่อม่อริมของสะพาน

ข.7 การจำลองฐานราก

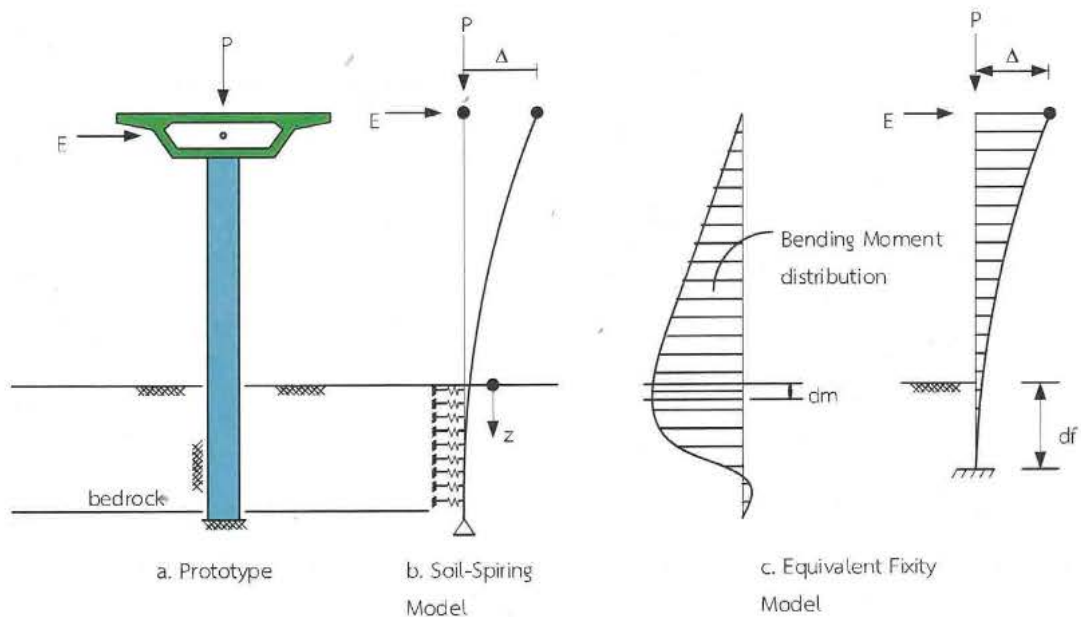
ข.7.1 การจำลองฐานรากประเภทเสาเข็มกลุ่ม (Pile Group)

ในการจำลองฐานรากประเภทเสาเข็มกลุ่ม (Pile Group) หากไม่ทำการจำลองโดยใช้ Frame Element ในการจำลองเข็มแต่ละต้นในกลุ่มเข็มรวมกับการพิจารณาใช้ Rigid Link ในการจำลองการถ่ายแรงที่ปลายเสาต่อม่อมายังหัวเข็ม ให้ใช้การจำลองโดยใช้ Soil Spring ที่ปลายเสาต่อม่อโดย Soil Spring ให้สามารถจำลองผลเนื่องจากสถิติสแนสของกลุ่มเข็ม ความยาวเข็ม และชั้นดินที่มีผลกระทบต่อการสร้างได้

ข.7.2 การจำลองฐานรากประเภทเสาเข็มเดี่ยว (Shaft)

ในการจำลองฐานรากประเภทเสาเข็มเดี่ยว (Shaft) ให้พิจารณาดังนี้

- กรณีการวิเคราะห์แบบสถิตย์ (Static Analysis) ให้ใช้การจำลองวิธีใดวิธีหนึ่งดังนี้ (i) Equivalent Fixity Model หรือ (ii) Soil Spring Model (ดูรูปที่ ข.7-1)
- กรณีการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ (Dynamic Analysis) ให้ใช้วิธี Soil Spring Model เพื่อสามารถจำลองผลเนื่องจาก Soil-Structure Interaction ได้



รูปที่ ข.7-1 การจำลองฐานรากประเภทเสาเข็มเดี่ยว (Shaft)

ข.8 การจำลองฐานรากแผ่ (Spread Footing)



ในการจำลองฐานรากแผ่ (Spread Footing) ให้สมมุติเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) แบบ Fixed Boundary Condition ก็ต่อเมื่อไม่มีการเกิดการยกตัวของฐานราก (Uplift) และมีการยึดติดแน่นโดยรอบของฐานรากต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง

ข.9 สถิติเฟนสที่ควรใช้ในแบบจำลอง

สถิติเฟนสสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงในด้านแกนอ่อน (Weak Axis) ให้พิจารณาผลของการแตกร้าวของคอนกรีตในการคำนวณหาค่าของ Flexural Stiffness ($E_c I_{eff}$), Shear Stiffness ($(GA)_{eff}$) และค่าของ Torsional Stiffness (GJ_{eff}) โดยค่าของ I_{eff} และ J_{eff} ควรเลือกใช้ค่าที่ให้ผลคาบการสั่นของโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับความจริง

ค่าของ I_{eff} สำหรับหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวให้ประมาณจากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และ Curvature ระหว่างจุดเริ่มต้นของแกนและจุดที่เหล็กเสริมเริ่มคลาก ดังแสดงในสมการดังนี้

$$E_c I_{eff} = \frac{M_y}{\phi_y} \quad (\text{ข.9-1})$$

โดยที่ M_y คือค่าของโมเมนต์ประลัยของหน้าตัดที่เกิดจากเหล็กเสริมเริ่มคลาก
 ϕ_y คือค่าของ Curvature ของหน้าตัดในขณะที่เหล็กเสริมเริ่มคลาก ที่รวมผลของแรงตามแกนเนื่องจากน้ำหนักคงที่
 E_c คือค่าของโมดูลัสของคอนกรีต
 I_{eff} คือค่าของ Moment Inertia ของหน้าตัดที่พิจารณาการแตกร้าวและการคลากของเหล็กเสริม

สำหรับหน้าตัดโครงสร้างในด้านแกนแข็ง (Strong Axis) ที่ผลของ Shear Stiffness $(GA)_{eff}$ มีผลกระทบต่อพฤติกรรมโครงสร้างเช่นกรณีของตอม่อดับกำแพง (Pier Wall) ให้พิจารณาดังนี้

$$(GA)_{eff} = G_c A_{ew} \frac{I_{eff}}{I_g} \quad (\text{ข.9-2})$$

โดยที่ $(GA)_{eff}$ คือ ค่าของแรงเฉือนสถิติประสิทธิภาพของตอม่อดับกำแพง
 G_c คือ ค่าของโมดูลัสแรงเฉือนของคอนกรีต



- A_{ew} คือ ค่าของหน้าตัดของตอม่อตบกำแพง
- I_g คือ Moment of Inertia ของหน้าตัดทั้งหมดรอบแกนอ่อนของหน้าตัด
- I_{eff} คือ Moment of Inertia ของหน้าตัดประสิทธิภาพรอบแกนอ่อนของหน้าตัด

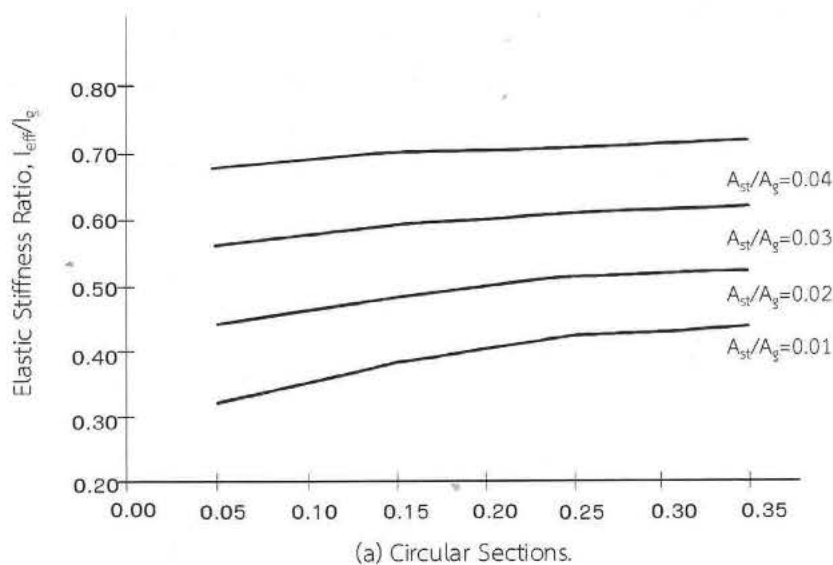
สำหรับค่าของ I_{eff} ของหน้าตัดประเภทต่างๆของโครงสร้างส่วนบนให้ดำเนินการหาดังนี้

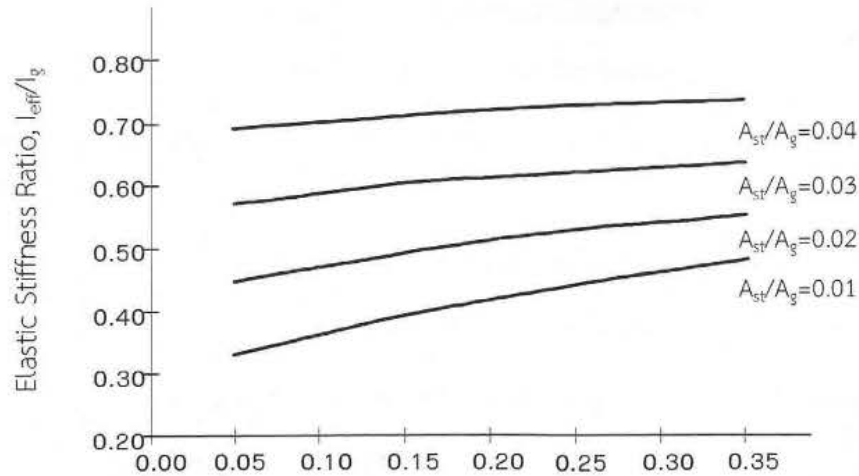
I_{eff} ของโครงสร้างส่วนบนแบบหน้าตัดรูปกล่อง (Box Girder)

- ให้พิจารณาผลของการแตกร้าวของหน้าตัดในการคำนวณค่าของ I_{eff}
 - ค่าของ I_{eff} ของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กรูปแบบกล่องให้ประมาณระหว่าง $0.5I_g$ และ $0.75I_g$ โดยสัดส่วนของ I_{eff} ขึ้นกับปริมาณการเสริมเหล็กของหน้าตัด
 - ค่าของ I_{eff} ของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กรูปแบบกล่องให้ใช้เท่ากับ $1.0I_g$
- สำหรับ I_{eff} ของโครงสร้างส่วนบนแบบหน้าตัดแบบอื่นๆ

ให้พิจารณาค่าของ I_{eff} ในลักษณะเดียวกับหน้าตัดคอนกรีตรูปกล่อง โดยอาจใช้การวิเคราะห์ห้อย่างละเอียดเพื่อประมาณค่าของ I_{eff} จากกราฟของ Moment และ Curvature ของหน้าตัดได้

สำหรับค่าของ I_{eff} ของเสาตอม่อสะพานให้พิจารณาผลของปริมาณเหล็กเสริมยืนของเสาดังแสดงในรูปที่ ข.9-1





(a) Rectangular Sections.

รูปที่ ข.9-1 ค่าของ I_{eff} ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับค่าของ Torsional Stiffness ของโครงสร้างสะพานในแบบจำลองให้พิจารณาดังนี้

- ให้พิจารณาใช้ค่าของ Torsional Stiffness ของโครงสร้างส่วนบนเท่ากับ $1.0GJ_{eff}$
- ให้พิจารณาค่าของ Torsional Stiffness ของเสาดังนี้

$$J_{eff} = 0.2J_g$$

(ข.9-3)

โดยที่ J_{eff} คือ ค่าของ Torsional (polar) Moment of Inertia ประสิทธิภาพของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก

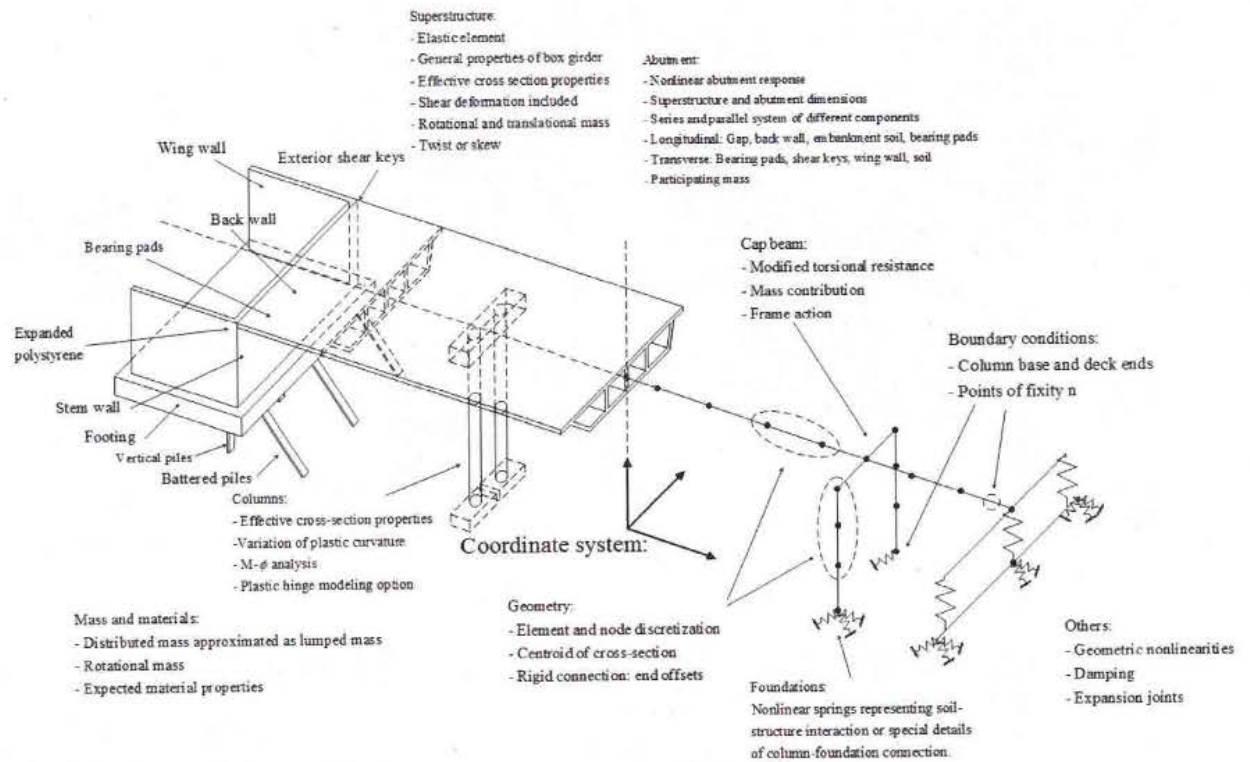
J_g คือ ค่าของ Torsional (polar) Moment of Inertia แบบเต็มของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก



แนวทางการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของสะพานภายใต้แผ่นดินไหว

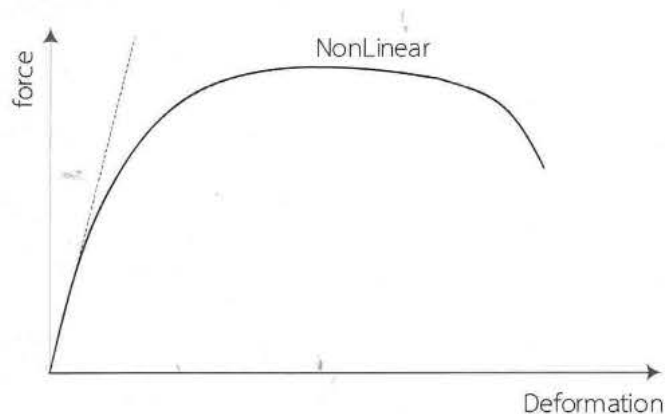
ค.1 พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของสะพานภายใต้แผ่นดินไหว

พฤติกรรมของสะพานภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวนั้น สามารถที่จะวิเคราะห์ได้โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงพฤติกรรมในแต่ละบริเวณของสะพานเช่น โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) ตอม่อ (Piers) ฐานราก (Footing) และพื้นดินบริเวณฐานราก (Soil System) อย่างไรก็ตามความถูกต้องของผลลัพธ์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆเช่น พฤติกรรมของจุดรองรับ ลักษณะของแรงกระทำ การกระจายตัวของมวล การสลายพลังงาน รูปร่างของสะพาน และพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนต่างๆในสะพาน โดยรูปที่ ค.1-1 แสดงภาพรวมของการสร้างแบบจำลองของสะพานที่แนะนำโดย Ady Aviram [1]



รูปที่ ค.1-1 รายละเอียดของการสร้างแบบจำลองของสะพานเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมภายใต้แรงแผ่นดินไหว [1]

โดยปกติแล้ว แบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบเชิงเส้นนั้นจะมีความถูกต้องในสถานะที่หน่วยแรงและการเสียรูปของโครงสร้างมีค่าอยู่ในช่วงพิกัดยืดหยุ่นเท่านั้น แต่หากหน่วยแรงในโครงสร้างมีค่าเกินจากช่วงพิกัดยืดหยุ่นไปแล้ว ผลการตอบสนองของโครงสร้างที่ได้จากการแบบจำลองเชิงเส้นอาจให้ผลลัพธ์ที่ต่างจากความเป็นจริงอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ ค.1-2) ซึ่งสาเหตุเกิดจากผลกระทบของพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นที่เกิดขึ้นในบริเวณต่างๆ ของสะพานเช่น การถึงจุดครากหรือจุดแตกหักของชิ้นส่วน การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมภายใต้แรงกระทำซ้ำ การตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นของพื้นดินที่รองรับสะพาน และการขยับตัวบริเวณรอยต่อของสะพาน เป็นต้น



รูปที่ ค.1-2 พฤติกรรมแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นของโครงสร้าง

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นจะสามารถช่วยให้วิศวกรวิเคราะห์พฤติกรรมและประเมินความสามารถในการรับภาระของสะพานภายใต้แรงแผ่นดินไหวได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น แต่ความซับซ้อนทางพฤติกรรมของชิ้นส่วนต่างๆในแบบจำลองก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้โครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นจะมีการตอบสนองที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรต่างๆ (Sensitivity) ดังนั้นวิศวกรจะต้องมีความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมของโครงสร้างดังกล่าวเป็นอย่างดี จึงจะสามารถสร้างแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือ รวมทั้งนำผลลัพธ์ไปประยุกต์ใช้ในงานจริงได้

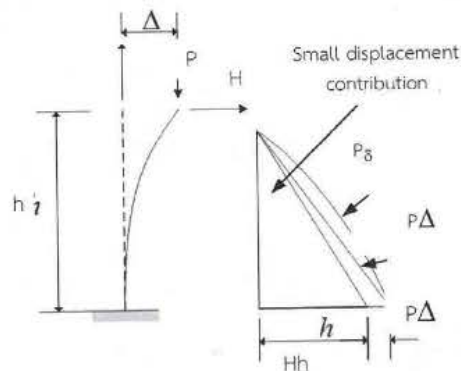
ค.2 พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Behavior)

ในขณะที่เกิดแผ่นดินไหวนั้น สะพานจะมีการตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวที่ส่งผ่านขึ้นมาจากพื้นดิน โดยปกติแล้วสะพานจะมีการตอบสนองแบบเชิงเส้นถ้าหากการสั่นสะเทือนของสะพานอยู่ในระดับต่ำ แต่ในกรณีที่มีการสั่นสะเทือนอยู่ในระดับสูงขึ้นนั้น พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นจะเกิดขึ้นบนจุดต่างๆของสะพาน นอกจากนี้การออกแบบในปัจจุบันนั้นยอมให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างเมื่อเกิดแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงซึ่งก็เป็นผลให้ต้องคำนึงถึงพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นเช่นกัน ทั้งนี้ในการกำหนดพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นในแบบจำลองนั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดหลักดังนี้

- Material Nonlinearities เกิดจากพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นระหว่างความเค้น-ความเครียด ในวัสดุของโครงสร้าง พฤติกรรมไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนสลายพลังงาน พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของค่าความแข็งแรงในชิ้นส่วนสปริง



- Geometric Nonlinearities เป็นพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นที่เกิดขึ้นจากการเสียรูปและการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง โดยทั่วไปจะเรียกว่าพฤติกรรมของ P-Delta Effect (รูปที่ ค.2-1) ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งในระดับชิ้นส่วนไปจนถึงระดับโครงสร้างทั้งหมด นอกจากนี้ ยังมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นจากปัจจัยอื่นเช่น การเปิด-ปิดของรอยต่อ เป็นต้น



รูปที่ ค.2-1 พฤติกรรมแบบ Geometric Nonlinear (P-Delta Effect)

ความซับซ้อนของแบบจำลองจะมีมากขึ้นเมื่อคำนึงถึงพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดบนสะพาน ซึ่งในหลายกรณีนั้นสามารถที่จะลดความซับซ้อนได้โดยคำนึงถึงเฉพาะพฤติกรรมที่มีผลกระทบสูงต่อโครงสร้างโดยรวม ทั้งนี้ตารางที่ ค.2-1 แสดงถึงแนวทางการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานที่แนะนำโดย Ady Aviram [1] ซึ่งได้มีการทดสอบแล้วพบว่าความถูกต้องของผลลัพธ์จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อแบบจำลองไม่ได้คำนึงถึงพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นตามที่แนะนำไว้



ตารางที่ ค.2-1 แนวทางการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของสะพานภายใต้แรงแผ่นดินไหว[1]

Bridge Component	Behavior
Superstructure	Linear
Column-Plastic Hinge Zone	Nonlinear
Column-Outside Plastic Hinge Zone	Linear
Cap Beam	Linear
Abutment-Transverse	Nonlinear
Abutment-Longitudinal	Nonlinear
Abutment-Overtuning	Nonlinear
Abutment-Gap	Nonlinear
Expansion Joints	Nonlinear
Foundation Springs	Linear
Soil-structure Interaction	Linear

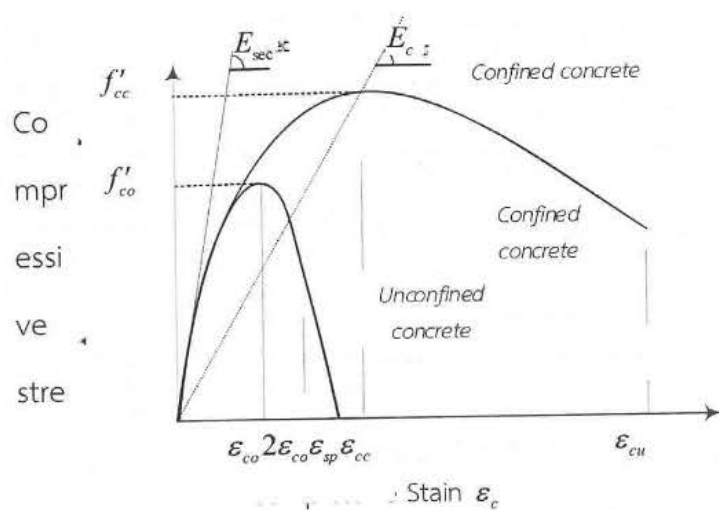
ค.3 พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของวัสดุ (Material Nonlinearities)

ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่าง Stress-Strain ของคอนกรีตและเหล็กจะเป็นจริงเฉพาะเมื่อหน่วยแรงอยู่ในระดับต่ำเท่านั้น ในช่วงที่หน่วยแรงมีค่าสูงขึ้น ความสัมพันธ์ของ Stress-Strain จะเปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ โดยในส่วนของคอนกรีตนั้น พฤติกรรมในการรับแรงดึงและแรงอัดจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังเช่นพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตภายใต้แรงดึงและการลดลงของ Stiffness ภายใต้แรงอัด ซึ่งในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์แบบจำลองจะต้องสามารถจำลองพฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้สภาวะหน่วยแรงเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาได้อย่างถูกต้อง (Cyclic Behavior)

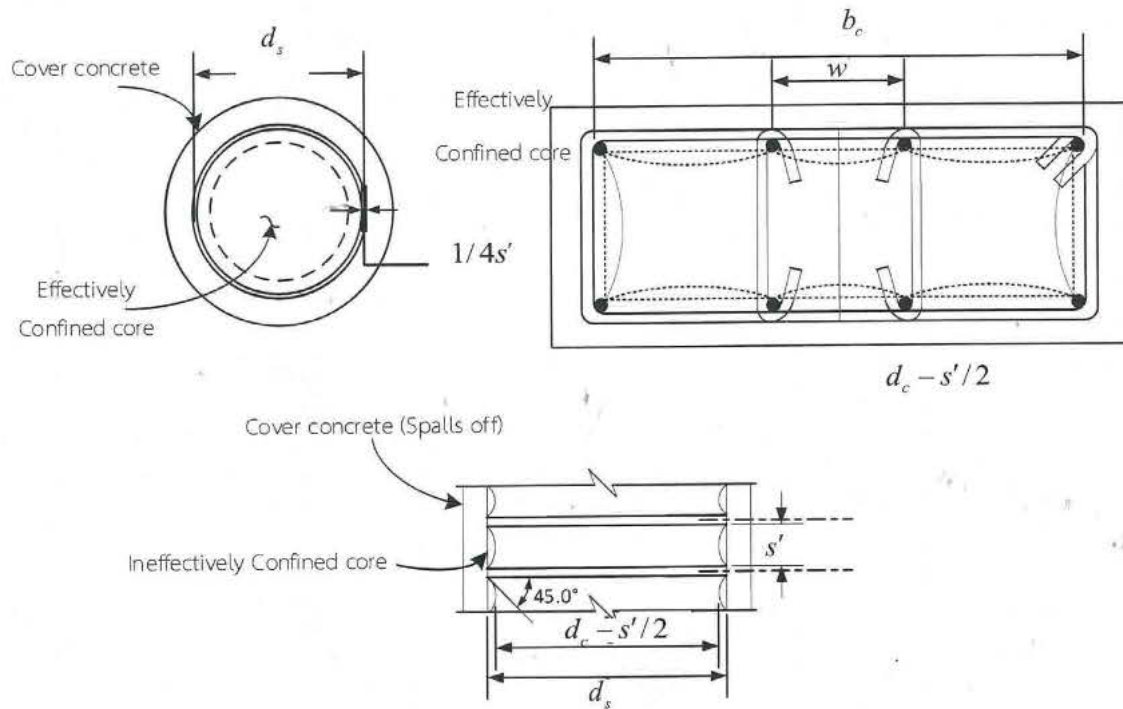


ค.4 คอนกรีตภายใต้สภาวะรับแรงอัด (Compressive behavior – Mander's model)

Mander [2] ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของคอนกรีตภายใต้แรงอัด โดยคำนึงถึงผลกระทบจากการโอบรัด (Confined Effect) ที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตจากเหล็กเสริม โดยรอบ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นรวมทั้งยังสามารถเสียรูปได้มากขึ้น ก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ ค.4-1 และ รูปที่ ค.4-2 อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้เหมาะสำหรับแบบจำลองชนิด Frame Element ซึ่งใช้สมมติฐานของพฤติกรรมแบบหน่วยแรงแกนเดียว (Uniaxial Stress)



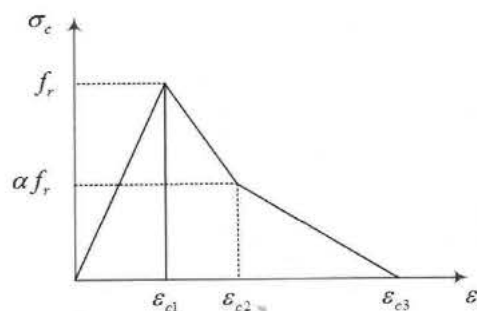
รูปที่ ค.4-1 พฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้แรงอัด [2]



รูปที่ ค.4-2 การโอบรัดของเหล็กเสริม [3]

ค.5 คอนกรีตภายใต้สภาวะรับแรงดึง (Tension behavior)

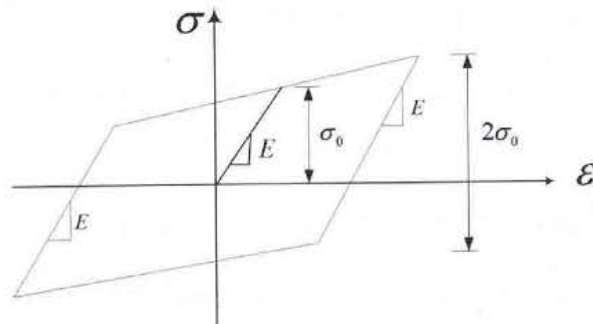
โดยปกติคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวภายใต้หน่วยแรงดึงดังแสดงในรูปที่ ค.5-1 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าความสัมพันธ์ของ Strain-Strain เป็นเส้นตรงจนกระทั่งถึงจุดแตกร้าว (Cracking Point) จากนั้นกำลังจะไม่ลดลงอย่างทันทีทันใด แต่จะค่อยๆ ลดลงสำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมมาช่วยรับไว้ ซึ่งเรียกพฤติกรรมดังกล่าวว่า Tension Stiffening



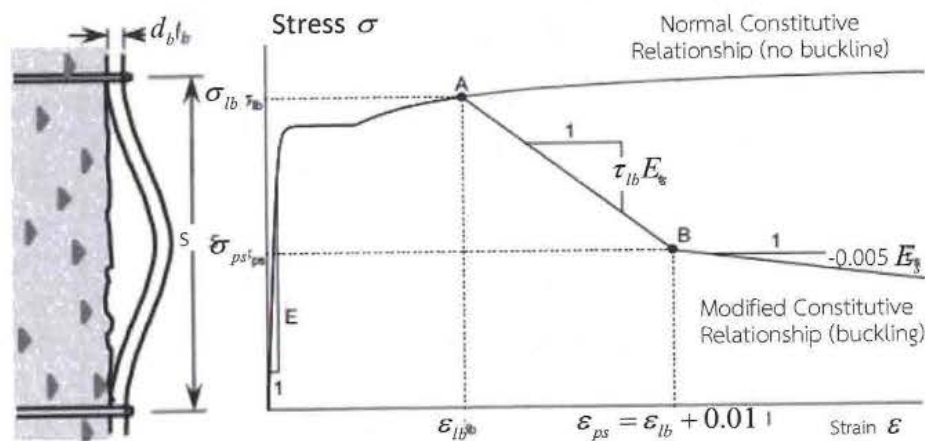
รูปที่ ค.5-1 พฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้แรงดึง [3]

ค.6 พฤติกรรมของเหล็กเสริม (Behavior of Reinforcing Steel)

ในส่วนของเหล็กเสริมนั้น พฤติกรรมหลักที่ต้องคำนึงถึงคือการ yield ของเหล็กทั้งภายใต้แรงดึงและแรงอัด (รูปที่ ค.6-1) โดยปกติจะสมมุติให้กำลังรับแรงในทั้งสองแบบนี้มีค่าเท่ากัน ทั้งนี้สำหรับเหล็กเสริมที่ถูกแรงกระทำแบบ cyclic behavior นั้นค่ากำลังของเหล็กเสริมจะลดลงไปในแต่ละรอบของการเสียรูปซึ่งเรียกพฤติกรรมดังกล่าวว่า Bauschinger Effect นอกจากนี้ในกรณีสำหรับเหล็กเสริมที่เกิดแรงอัด (สามารถเกิดขึ้นได้ในเหล็กรับแรงดึงเช่นกัน สำหรับสภาวะแรงกระทำแบบ cyclic behavior) นั้นอาจจะต้องคำนึงถึงกำลังที่ลดลงเนื่องจากการโก่งเดาะ (buckling) ที่สามารถเกิดในจุดที่มีระยะห่างของเหล็กรับแรงเฉือนมีค่ามากได้อีกด้วย (รูปที่ ค.6-2)



รูปที่ ค.6-1 พฤติกรรมแบบ bilinear ของเหล็กเสริม



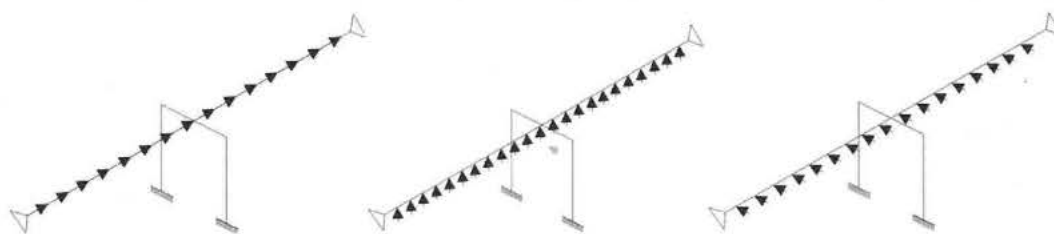
รูปที่ ค.6-2 พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมภายใต้แรงอัด (ซ้าย) รูปแบบการโก่งเดาะ (ขวา)

Stress-Strain Relation [4]

ค.7 แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นของโครงสร้างสะพาน

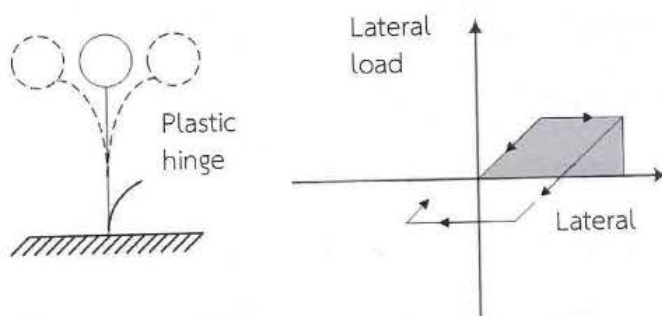
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างสะพานต้องสามารถจำลองได้ถึงพฤติกรรมโดยรวม (Global) และพฤติกรรมของแต่ละชิ้นส่วนบนสะพาน (Individual) โดยในบางกรณีอาจจำเป็นต้องใช้แบบจำลองสามมิติเนื่องมาจากปัจจัยดังนี้

- โดยธรรมชาติของแผ่นดินไหวนั้น การสั่นสะเทือนจากพื้นดินจะเกิดขึ้นในทุกทิศทาง ซึ่งสามารถทำให้เกิดแรงกระทำต่อโครงสร้างในทุกทิศทางได้เช่นกัน (Multi-Directional Excitation) (รูปที่ ค.7-1)
- ความไม่สม่ำเสมอในด้านลักษณะทางกายภาพของสะพาน เช่น Curved, Skewed เป็นต้น (Geometric Irregularities)
- โมดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างสะพานมีการปฏิสัมพันธ์กันระหว่าง ด้านยาว ด้านขวาง และด้านตั้ง (Interaction Between Multi-Dimensional Vibration Modes)
- พฤติกรรมของหน่วยแรงในชิ้นส่วนสะพานซึ่งทำให้เกิดแรงลัพธ์ในหลายทิศทาง (Coupling Due to Unsymmetrical Behavior of Member)
- พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของชั้นดินซึ่งโดยปกติแล้วจะอยู่ในระนาบสามมิติ (Three Dimensional Soil Dynamics)
- การวิเคราะห์อย่างง่ายซึ่งใช้หลักการของ Superposition ในการรวมโมดการสั่นหลักๆของโครงสร้าง สามารถประยุกต์ใช้ได้กับโครงสร้างที่เป็นเชิงเส้นได้เท่านั้น ซึ่งในโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น วิธีดังกล่าวอาจให้ผลที่ผิดไปจากความเป็นจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโครงสร้างสะพานที่มีความไม่สม่ำเสมอ (Irregularities) เช่น สะพานที่มีหน้าตัดคานหลักหลายรูปแบบ สะพานแบบ Curved และ Skewed สะพานที่มีจุดต่อจำนวนมาก (Transverse Expansion Joint) และสะพานที่สร้างบนชั้นดินอ่อน เป็นต้น

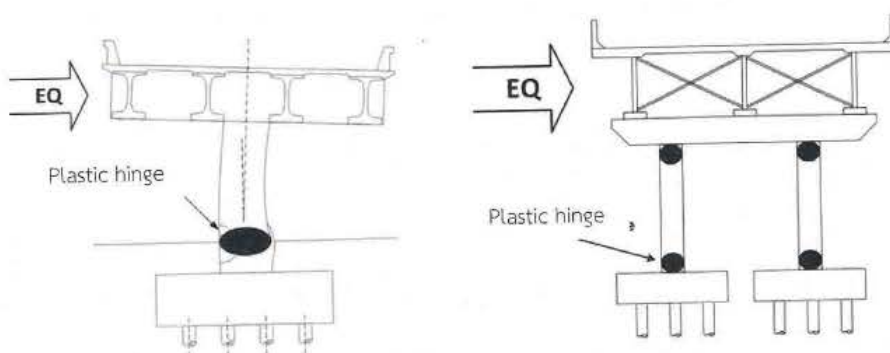


รูปที่ ค.7-1 การสั่นสะเทือนหลายทิศทางเนื่องจากแผ่นดินไหว

ในกรณีที่ต้องการออกแบบสะพานเพื่อให้ต้านทานแรงจากแผ่นดินไหวนั้น ชิ้นส่วนที่ต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษคือบริเวณเสาตอม่อของสะพาน (Pier and Bent) ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะเป็นจุดที่ต้องรองรับแรงจากโครงสร้างส่วนบนทั้งหมด โดยเฉพาะแรงเฉือนในแนวราบซึ่งหากมีค่าสูงเพียงพอจะทำให้เสาตอม่อเกิดการเสียหายได้ (รูปที่ ค.7-2 ถึง รูปที่ ค.7-3) นอกจากนี้ในด้านของการสลายพลังงานนั้น ยังต้องให้ความสำคัญในส่วนของการจำลองพฤติกรรมของจุดรองรับ จุดต่อและการสันสะท้อนของพื้นดินด้วยเช่นกัน



รูปที่ ค.7-2 แบบจำลองอย่างง่ายของโครงสร้างที่รับแรงด้านข้างจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว [3]

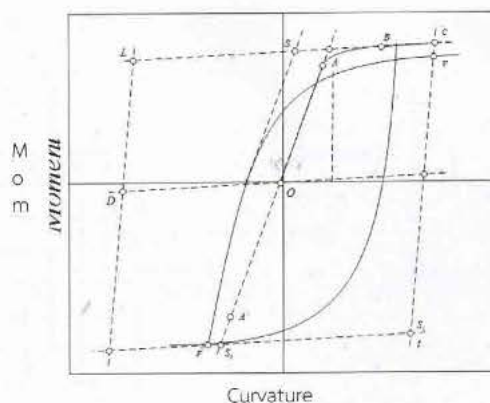


รูปที่ ค.7-3 ตัวอย่างแบบจำลองตอม่อสะพานที่รับแรงด้านข้างจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว [3]

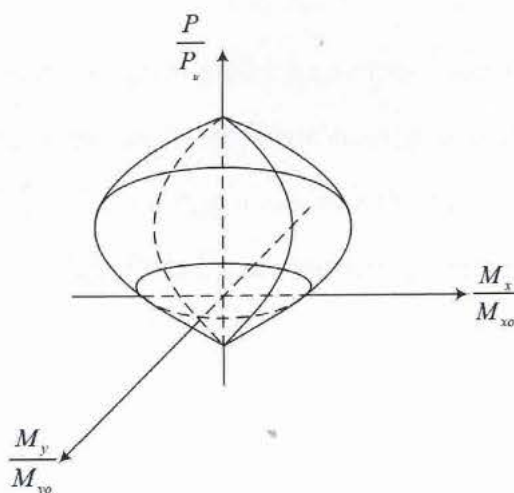
โดยปกติการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรง (Moderate and Strong Earthquake) ได้นั้น จะมีการยอมให้โครงสร้างเสียหายและเกิดพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งการวิเคราะห์เพื่อให้ได้แรงที่แท้จริงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่สอดคล้องกับพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นนั้น วิศวกรสามารถเลือกใช้แบบจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วนได้ดังนี้

● Column plastic hinge zone

แบบจำลองชนิดนี้เป็นการจำลองให้จุดใดจุดหนึ่งบนชิ้นส่วนเกิดพฤติกรรมแบบจุดหมุนพลาสติกขึ้น ซึ่งค่า Stiffness ของจุดหมุนดังกล่าวจะลดลงกว่าหน้าตัดปกติอย่างชัดเจน วิธีนี้มีจุดเด่นที่ผู้ใช้สามารถนำค่าพฤติกรรมของหน้าตัดที่เกิดขึ้นจริงจากการตรวจวัดมาใส่ในแบบจำลองได้อย่างสะดวกสำหรับชิ้นส่วนที่รับแรงดัดทางเดียวเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมแบบปฏิสัมพันธ์กันระหว่างแรงในแนวแกนและการดัดแบบหลายแกน (P-M-M Interaction รูปที่ ค.7-5) ยังคงเป็นสิ่งที่ยุ่งยากหากจะใช้วิธีนี้ในการวิเคราะห์ รูปที่ ค.7-4 แสดงถึงพฤติกรรมการดัดของหน้าตัดในบริเวณ Plastic Hinge Zone



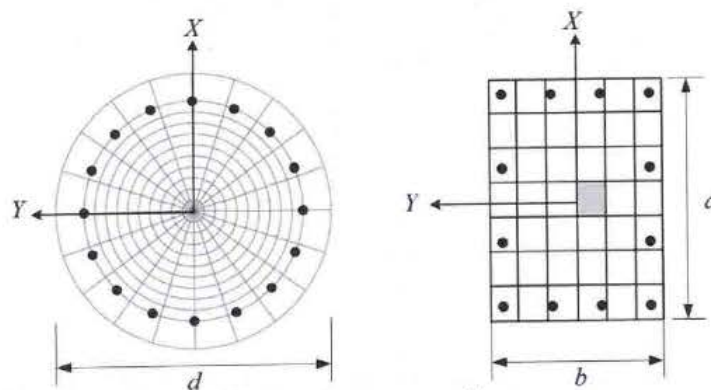
รูปที่ ค.7-4 พฤติกรรมการดัดของหน้าตัดในบริเวณ Plastic Hinge Zone



รูปที่ ค.7-5 พฤติกรรมการดัดหลายร่วมกับแรงในแนวแกนของหน้าตัด [3]

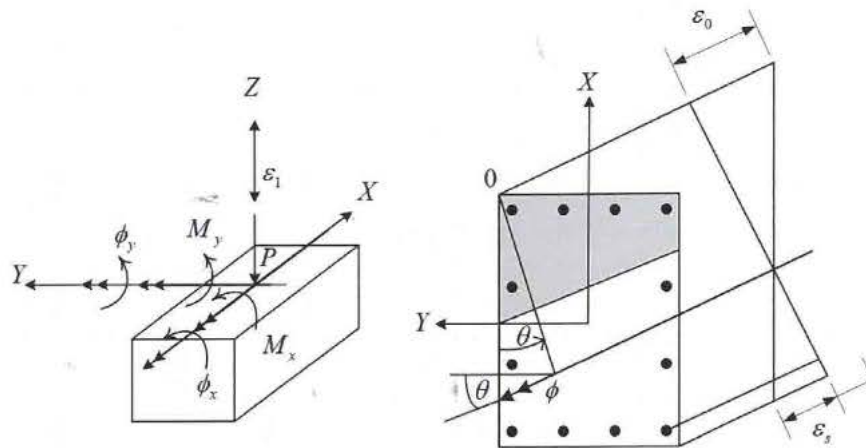
● Fiber Model of Column Section

วิธีนี้เป็นการแบ่งหน้าตัดของชิ้นส่วนให้เป็นหน้าย่อยๆ (Fiber) ดังแสดงในรูปที่ 7ค-6 จากนั้นทำการวิเคราะห์ถึงหน่วยแรงของ Fiber โดยใช้ความสัมพันธ์ของ Stress-Strain ซึ่งสามารถปรับให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุในแต่ละ Fiber นั้นๆได้ ซึ่งทำให้วิธีดังกล่าวสามารถทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของหน้าตัดได้อย่างครอบคลุมเช่น พฤติกรรมการดัดหลายแกน ภายใต้แรงกระทำในแนวแกน (P-M-M Interaction) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการที่จะได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสถานะจริง ผู้ใช้งานจะต้องเข้าใจถึงผลกระทบจากปัจจัยต่างๆที่มีต่อความถูกต้องของคำตอบ เช่น สมมุติฐานในการเสียรูปของหน้าตัดที่สมมุติให้อยู่ในแนวระนาบ (Plane Section Remain Plane) รวมไปถึงจำนวน Fiber ที่ใช้และพฤติกรรมของ Stress-Strain ในแต่ละ Fiber เป็นต้น



รูปที่ ค.7-6 หน้าตัดของชิ้นส่วนที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นเล็กๆ (Fiber Model) [3]

โดยปกติในแต่ละ Fiber จะถูกสมมุติว่ามีพฤติกรรมของหน่วยแรงแบบแกนเดียว (Uniaxial Stress State) ซึ่งในขั้นตอนการคำนวณจะทำการหาค่า Strain ที่เกิดขึ้นจากนั้นจึงทำการหาค่า Stress เพื่อใช้ในการคำนวณแรงและโมเมนต์ลัพธ์ (Stress Resultants) ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ ค.7-7 ทั้งนี้ความถูกต้องในการประมาณค่าของหน่วยแรงนั้นยังขึ้นอยู่กับจำนวน Fiber ที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ ค.7-8



รูปที่ ค.7-7 Strain ที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดและแรงลัพธ์ในแกนต่างๆ [3]



รูปที่ ค.7-8 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดชิ้นส่วน

1. AASHTO. AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS. 4th, editor. Washington, D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2007.
2. AASHTO. AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS. 5th, editor. Washington, D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2010.
3. Caltrans. Seismic Design Criteria SDC Version 1.7. Sacramento, California: California Department of Transportation; 2013.
4. Caltrans. Bridge Design Practice. Sacramento, California: California Department of Transportation; 2015.
5. Priestley, Seible, Calvi. Seismic Design and Retrofit of Bridges. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc; 1996.
6. Aviram A. Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California: University of California Berkeley; 2008.
7. Mander JB, Priestley MJN, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of the Structural Engineering. 1988;114(ST8):1804–26.
8. W. F. Chen, Duan L. Bridge Engineering Handbook - Seismic Design: CRC Press; 2014.
9. G.M. Potger A, Kawano MC, Warner GRF. Dynamic Analysis of RC Frames Including Buckling of Longitudinal Steel Reinforcement: NZSEE Conference; 2001.
10. มยผ.1302. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย; 2552.
11. กฎกระทรวง. กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว; 2550.



12. มยผ.1303-57. มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้าง
อาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว: กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย.



คำสั่งกรมทางหลวง
ที่ บ.๑/ ๓๘ /๒๕๕๗

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้าง
ถนนและสะพานเพื่อรองรับแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว

เพื่อกำหนดแนวทางและหลักเกณฑ์การออกแบบถนนและสะพานที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้อง เหมาะสม ทันสมัย เป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกหน่วยงาน ตามนโยบายของกระทรวงคมนาคม กรมทางหลวงในฐานะหน่วยงานผู้รับผิดชอบหลักจึงแต่งตั้งคณะกรรมการเพื่อร่างแนวทางและหลักเกณฑ์การออกแบบถนนและสะพานที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวโดยคณะกรรมการดังกล่าวประกอบด้วย ผู้แทนจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้เชี่ยวชาญจากสถาบันการศึกษา ดังนี้

๑. องค์ประกอบ

- | | |
|--|----------------------------|
| ๑.๑ วิศวกรใหญ่ด้านสำรวจและออกแบบ | ประธานกรรมการ |
| ๑.๒ ผู้อำนวยการสำนักสำรวจและออกแบบ | รองประธานกรรมการ |
| ๑.๓ ผู้อำนวยการสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ | กรรมการ |
| ๑.๔ ผู้อำนวยการสำนักวิจัยและพัฒนาทาง | กรรมการ |
| ๑.๕ ผศ.ดร.อาณัติ เรืองรัมย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | กรรมการ |
| ๑.๖ ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ | กรรมการ |
| ๑.๗ ผู้แทน กรมทางหลวงชนบท | กรรมการ |
| ๑.๘ ผู้แทน การทางพิเศษแห่งประเทศไทย | กรรมการ |
| ๑.๙ ผู้แทน กรมโยธาธิการและผังเมือง | กรรมการ |
| ๑.๑๐ นายวารินทร์ เพชรารุส ผู้อำนวยการกลุ่มงานออกแบบงานทาง | กรรมการ |
| ๑.๑๑ นายสมพร รัตนบุรี ผู้อำนวยการกลุ่มงานออกแบบโครงสร้าง | กรรมการ |
| ๑.๑๒ ดร.วันจักร ฉายากุล ผู้อำนวยการกลุ่มงานสำรวจภูมิประเทศ | กรรมการ |
| ๑.๑๓ นายพงศ์พันธุ์ จันทกุล วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ | กรรมการ |
| ๑.๑๔ นายธำนิษฐ์ ธีรัตนพงษ์ วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ | กรรมการ |
| ๑.๑๕ นายวิโรจน์ คงแก้ว รก.วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ | กรรมการ |
| ๑.๑๖ ดร.ราชวัลลภ กัมพูพงศ์ วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ | กรรมการ |
| ๑.๑๗ ดร.ปรนิก จิตอารีย์กุล วิศวกรโยธาชำนาญการ | กรรมการ |
| ๑.๑๘ ดร.สุกิจ ยินดีสุข วิศวกรโยธาชำนาญการ | กรรมการและเลขานุการ |
| ๑.๑๙ นายวิศิษฐ์ศักดิ์ หนูสุวรรณ วิศวกรโยธาชำนาญการ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |



๒. อำนาจหน้าที่

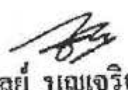
๒.๑ พิจารณาทบทวนมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างถนนและสะพาน ภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่หน่วยงานต่าง ๆ ใช้อยู่ในปัจจุบัน

๒.๒ จัดทำแนวทางและหลักเกณฑ์ใหม่ การออกแบบถนนและสะพานภายใต้แรงแผ่นดินไหว ให้มีความถูกต้อง เหมาะสม ทันสมัย และเป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกหน่วยงาน

๒.๓ ประธานมีอำนาจแต่งตั้งคณะทำงาน ในการรวบรวมข้อมูล จัดทำแนวทางและหลักเกณฑ์ข้างต้นตามความเหมาะสม

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๒๖ พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๕๗


(นายชัชวาลย์ บุญเจริญกิจ)
อธิบดีกรมทางหลวง



คำสั่งกรมทางหลวง
ที่ บ.๑/ ๓๘ /๒๕๕๗

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้าง
ถนนและสะพานเพื่อรองรับแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (เพิ่มเติม)

ตามคำสั่งกรมทางหลวงที่ บ.๑/๓๘/๒๕๕๗ ลงวันที่ ๒๖ พฤษภาคม ๒๕๕๗ เรื่องแต่งตั้ง
คณะกรรมการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้าง ถนนและสะพานเพื่อรองรับแรงเนื่องจาก
แผ่นดินไหว นั้น

เพื่อให้การปรับปรุงมาตรฐานดังกล่าวบรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ถูกต้อง รวดเร็ว
มีประสิทธิภาพและเป็นประโยชน์ต่อทางราชการ จึงแต่งตั้งคณะกรรมการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบและ
ก่อสร้าง ถนนและสะพานเพื่อรองรับแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (เพิ่มเติม) ดังนี้

- | | | |
|-----------------------------------|--|---------|
| ๑. ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | กรรมการ |
| ๒. ผศ.ดร.สุนิติ สุภาพ | มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต | กรรมการ |
| ๓. ดร.ทรงศักดิ์ สุธาสุประดิษฐ์ | มหาวิทยาลัยนเรศวร | กรรมการ |
| ๔. ผศ.ดร.กิตติภูมิ รอดสิน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ | กรรมการ |

นอกนั้นให้เป็นตามคำสั่งเดิมทุกประการ

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๒๕ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๕๗


(นายวุฒิสักดิ์ เกวี)

รองปลัดกระทรวง รักษาราชการแทน
อธิบดีกรมทางหลวง



รายชื่อคณะกรรมการออกแบบสะพานและถนนภายใต้แรงแผ่นดินไหว

เพื่อกำหนดแนวทางและหลักเกณฑ์การออกแบบถนนและสะพานที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้อง เหมาะสม ทันสมัย เป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกหน่วยงาน ตามนโยบายของกระทรวงคมนาคม กรมทางหลวงในฐานะหน่วยงานผู้รับผิดชอบหลักจึงแต่งตั้งคณะกรรมการเพื่อร่างแนวทางและหลักเกณฑ์การออกแบบถนนและสะพานที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวโดยคณะกรรมการดังกล่าวประกอบด้วยผู้แทนจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้เชี่ยวชาญจากสถาบันการศึกษา ดังนี้

1. องค์ประกอบคณะกรรมการหลัก

- | | |
|---|---------------------------------------|
| 1.1 นายอัศวิน กรรณสูต | ที่ปรึกษากรมทางหลวงด้านสำรวจและออกแบบ |
| 1.2 นายเกษม ศรีวรานันท์ | วิศวกรใหญ่ด้านสำรวจและออกแบบ |
| 1.3 นายสมบัติ เจริญพัฒน์ | ผู้อำนวยการสำนักสำรวจและออกแบบ |
| 1.4 ดร.วันจักร ฉายากุล | ผู้อำนวยการสำนักแผนงาน |
| 1.5 รศ.ดร.อาณัติ เรืองรัมย์ | |
| ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | |
| 1.6 ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด | |
| ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์ | |
| 1.7 นายพิสิฐ ศรีวรานันท์ | ผู้แทนกรมทางหลวงชนบท |
| 1.8 นายพุดธิกัญจน์ กาญจนะพังคะ | ผู้แทนการทางพิเศษแห่งประเทศไทย |
| 1.9 นายเสถียร เจริญเหรียญ | ผู้แทนกรมโยธาธิการและผังเมือง |
| 1.10 นายสมพร รัตนบุรี | วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ |
| 1.11 นายพงศ์พันธุ์ จันทกุล | วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ |
| 1.12 นายธานินทร์ รัตนพงษ์ | วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ |
| 1.13 นายวิโรจน์ คงแก้ว | วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ |
| 1.14 ดร.ราชวัลลภ กัมพูพงศ์ | วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ |
| 1.15 ดร.ปรนิท จิตอารีย์กุล | วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ |
| 1.16 ดร.สุกิจ ยินดีสุข | วิศวกรโยธาชำนาญการ |
| 1.17 นายวิศิษฐ์ศักดิ์ หนูสุวรรณ | วิศวกรโยธาชำนาญการ |

2. คณะทำงานสนับสนุน

- | | |
|--|----------------------|
| 2.1 นายทินกร แพทย์รักษ์ | วิศวกรโยธาปฏิบัติการ |
| 2.2 ผศ.ดร.สุนิติ สุภาพ | |
| ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | |
| 2.3 ดร.ทรงศักดิ์ สุธาสุประดิษฐ์ | |
| ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ | |
| 2.4 ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข | |
| ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | |

Committee and **Working Group** for Manual of Bridge
and Road Designs for Seismic Resistant

Manual of _____
Bridge and Road Designs for Seismic Resistant



Department of Highways, **THAILAND**

August, 2016