



การศึกษาเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานจากแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบสะพานในประเทศไทย
A COMPARATIVE STUDY OF SEISMIC BASED SHEARS FOR DESIGNING
OF BRIDGES IN THAILAND

นางสาวใหม่ แก้วอุดร
นายพงศภัค เทพไชย
นายศุภกิตต์ ฤทธิศาสตร์

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานจากแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบสะพานในประเทศไทย
A COMPARATIVE STUDY OF SEISMIC BASED SHEARS FOR DESIGNING
OF BRIDGES IN THAILAND

นางสาวใหม่ แก้วอุดร
นายพงศภัค เทพไชย
นายศุภกิตต์ ฤทธิศาสตร์

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานจากแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ
สะพานในประเทศไทย
ปีการศึกษา 2559

โดย

นางสาวใหม่ แก้วอุดร

นายพงศภัค เทพไชย

นายศุภกิตต์ ฤทธิศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด

บทคัดย่อ

โครงการวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแผ่นดินไหวและเปรียบเทียบปริมาณวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในตอม่อสะพานแบบเสาเดี่ยวด้วยวิธีการออกแบบที่แตกต่างกันสามวิธี ได้แก่ วิธีกำหนดค่าร้อยละในแนวดิ่งของโครงสร้างแบบคงที่ วิธีเปิดแผนที่มีความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวและวิธีตามมาตรฐานการออกแบบตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินงานแผ่นดินไหวของกระทรวงคมนาคม

ผลจากการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างในทุกพื้นที่วิธีเปิดแผนที่มีความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวให้ค่ามากที่สุด แต่เมื่อนำมาคำนวณถึงแรงแผ่นดินไหว ในพื้นที่จังหวัดเชียงราย จังหวัดกำแพงเพชร วิธีตามมาตรฐานการออกแบบตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินงานแผ่นดินไหวของกระทรวงคมนาคมกลับให้ค่ามากที่สุด ในส่วนของพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี และจังหวัดกรุงเทพมหานคร วิธีเปิดแผนที่มีความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวให้ค่าแรงแผ่นดินไหวมากที่สุด เมื่อพิจารณาในการออกแบบปริมาณเหล็กในพื้นที่จังหวัดเชียงราย จังหวัดกาญจนบุรี และจังหวัดกำแพงเพชร วิธีเปิดแผนที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวให้ค่าปริมาณเหล็กมากที่สุด แต่พื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร วิธีที่ให้ปริมาณเหล็กมากที่สุดคือ วิธีตามมาตรฐานการออกแบบตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินงานแผ่นดินไหวของกระทรวงคมนาคม

คำสำคัญ: แผ่นดินไหว แรงเฉือน เสาและสะพาน

**A COMPARATIVE STUDY OF SEISMIC BASED SHEARS FOR DESIGNING
OF BRIDGES IN THAILAND
Academic Year 2016**

By

Miss Mai Kaeoudon
Mr. Phongsaphak Thepchai
Mr. Suppakitt Ritthisart

Advisor

Joyklad Panuwat, Ph.D

Abstract

This aim of this project is to study the seismic based shears for designing of bridges in Thailand using 3 popular methods, namely (i) constant acceleration coefficient method (ii) opening of Thai seismic hazard map method and (iii) using manual of Bridge and Road Designs for Seismic Resistant Department of Highways Thailand.

It is found that, (a) the maximum seismic responses coefficient of all areas is based on method (ii). In contrast, the maximum earthquake force in Chiang Rai and Kamphaeng Phet area is obtained from method (iii) while the maximum earthquake force in Kancganaburi and Bangkok area is obtained from method ii. In term of transverse reinforcement in bridge columns, the maximum content of reinforcing steel is found from Chiang Rai, Kancganaburi and Kamphaeng Phet, respectively, which based on method (ii). In Bangkok, the maximum content of reinforcing steel is found from method (iii).

Keyword: seismic, shear, column, bridge

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยก๊อต อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย ตลอดจนการชี้แนะในการหาคำตอบในปัญหาต่าง ๆ ระหว่างจัดทำโครงการนี้ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณผู้บริหารและพนักงานทุกคนของบริษัททีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริง แอนด์ แมนเนจเม้นท์ จำกัด (TEAM Group of companies) ที่ทางคณะผู้จัดทำได้เข้าไปศึกษาวิจัยที่ท่านได้ให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูล ความช่วยเหลือ และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ให้กับคณะผู้จัดทำโครงการ ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ท้ายที่สุดนี้ ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิศวกรรมนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจนำไปศึกษาไม่มากก็น้อยต่อไป ความดีและประโยชน์ใด ๆ จากโครงการวิศวกรรมนี้ ขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด

คณะผู้จัดทำโครงการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
รายการสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 กลไกการเกิดแผ่นดินไหว	3
2.2 โครงสร้างสะพาน	7
2.2.1 โครงสร้างส่วนล่าง	7
2.2.2 โครงสร้างส่วนบน	7
2.3 ความเสียหายของสะพานจากแผ่นดินไหว	8
2.3.1 ความเสียหายของฐานราก	8
2.3.2 ความเสียหายของเสา	8
2.3.3 ความเสียหายของที่รองรับ	8
2.4 ความสำคัญของสะพาน	9

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.1 สะพานที่สำคัญที่สุด	9
2.4.2 สะพานสำคัญ	10
2.4.3 สะพานทั่วไป	10
2.5 การวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นจากการเกิดแผ่นดินไหว	11
2.5.1 วิธี 1 วิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างแบบคงที่ (6%)	11
2.5.2 วิธี 2 วิธีเปิดแผนที่เสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วานิชชัย	12
2.5.3 วิธี 3 วิธีเปิดคู่มือออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินแผ่นดินไหว ของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2559	12
2.6 ค่าพารามิเตอร์สำหรับวิธี 1 วิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง แบบคงที่ (6%)	13
2.6.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง	13
2.6.2 ค่าน้ำหนักประลัยของโครงสร้าง	13
2.7 ค่าพารามิเตอร์สำหรับวิธี 2 วิธีเปิดแผนที่เสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหว ของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วานิชชัย	14
2.7.1 ประเภทสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหว	14
2.7.2 ค่าความแข็งแรง	15
2.7.3 ค่าคาบธรรมชาติ	16
2.7.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง	17
2.7.5 สัมประสิทธิ์ปรับการตอบสนอง	17
2.7.6 ค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดิน	19
2.7.7 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคุณสมบัติของดิน	21
2.7.8 การรวมผลของแรงแผ่นดินไหว	21
2.8 ค่าพารามิเตอร์สำหรับวิธี 3 เปิดคู่มือการออกแบบสะพานและถนน เพื่อดำเนินแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงปี พ.ศ.2559	21

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8.1 การรวมแรงแผ่นดินไหว	21
2.8.2 สัมประสิทธิ์ปรับการตอบสนอง	24
2.8.3 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ (S_d)	25
2.8.4 การปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม	28
2.8.5 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ (S_d)	30
2.8.6 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบ	30
2.8.7 ประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร	41
2.9 การรวมผลของแรง	42
2.9.1 การรวมของแรงแผ่นดินไหวจากทิศทางต่าง ๆ	42
2.9.2 การรวมผลของแรงกดที่กระทำต่อโครงสร้าง	43
2.10 การวิเคราะห์การเสริมเหล็ก	44
2.10.1 วิธี 1 วิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างแบบคงที่ (6%)	44
2.10.2 วิธี 2 วิธีเปิดแผนที่เสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วินิชชัย	45
2.10.3 วิธี 3 เสริมเหล็กตามคู่มือการออกแบบสะพานและ ถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงปี พ.ศ.2559	48
2.11 กฎกระทรวงที่กำหนดเกี่ยวกับแรงลมที่กระทำต่อองค์อาคาร	54
2.12 ข้อกำหนดการคำนวณแรงลมอ้างอิงจาก ASSTHO 2002	55
2.13 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง อ้างอิงจาก ASSTHO LRFD 2010	56
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงาน	58
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	58
3.1.1 คอมพิวเตอร์	58
3.1.2 คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว	58

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.3 มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1302)	59
3.1.4 คู่มือมาตรฐานการออกแบบสะพานต้านทานแรงแผ่นดินไหว AASHTO ตามมาตรฐานของอเมริกา	60
3.2 วิธีดำเนินการ	60
3.2.1 การศึกษาข้อมูลทางการออกแบบสะพานรับแรงแผ่นดินไหว ในมาตรฐานต่าง ๆ	60
3.2.2 กำหนดพื้นที่อ้างอิง	60
3.2.3 ออกแบบต่อม่อสะพานเสาเดี่ยวตามที่มาตรฐานกำหนด	60
3.3 รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการ	61
3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบสำหรับวิธีที่ 1 วิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่ง ของโครงสร้างแบบคงที่ (6%)	61
3.3.2 ขั้นตอนการออกแบบสำหรับวิธีที่ 2 วิธีเปิดแผนกที่เสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหว ของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วานิชชัย	62
3.3.3 ขั้นตอนการออกแบบสำหรับวิธีที่ 3 เปิดคู่มือการออกแบบสะพานและถนน เพื่อต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงปี พ.ศ.2559	63
3.5 ตารางการดำเนินงาน	64
3.6 เปรียบเทียบผลของการออกแบบ	65
3.7 ประเมินปริมาณเหล็กที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง	65
3.8 สรุปผลการดำเนินงาน	65

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	66
4.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วน ความสูงต่อความยาวของหน้าตัด	66
4.2 เปรียบเทียบหน่วยแรงจากแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนระหว่างความ สูงเสาค่อด้านยาวของหน้าตัด	69
4.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างที่มีผลต่อแรงแผ่นดินไหว ที่จังหวัดเชียงราย	72
4.4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างที่มีผลต่อแรงแผ่นดินไหว ที่จังหวัดกาญจนบุรี	74
4.5 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างที่มีผลต่อแรงแผ่นดินไหว ที่จังหวัดกำแพงเพชร	76
4.6 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างที่มีผลต่อแรงแผ่นดินไหว ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	78
4.7 เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลม กับอัตราส่วนความสูง เสาค่อด้านยาวหน้าตัด	80
4.8 เปรียบเทียบแรงแผ่นดินไหวและแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระบุ กับอัตราส่วน ระหว่างความสูงเสาค่อด้านยาวหน้าตัด	83
4.9 เปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวโดยตรงต่อแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ ระบุ กับอัตราส่วนความสูงเสาค่อด้านยาวหน้าตัด	86
4.10 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงเสาค่อด้านยาวของหน้าตัด	89
4.11 เปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลม กับอัตราส่วนความสูงเสาค่อด้านยาวของหน้าตัด เท่ากับ 2 และ 6	92
4.12 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาค่อด้านยาวหน้าตัด	95

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.13 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของ หน้าตัดที่มีค่าเท่ากับ 2 6 และ 10	98
4.14 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กผูกตั้งกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาว ของหน้าตัด	101
4.15 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กผูกตั้งกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาคต่อ ความยาวของหน้าตัด ที่มีค่าเท่ากับ 2 6 และ 10	104
4.16 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กผูกตั้งกับอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความยาว ของหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 1	107
4.17 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กผูกตั้งกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาว ของหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2	108
4.18 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กผูกตั้ง กับอัตราส่วนความสูงต่อความยาว ของหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 3	111
 บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	 114
5.1 สรุปผล	114
5.2 ข้อเสนอแนะ	115
 เอกสารอ้างอิง	 116
ภาคผนวก ก	117
ภาคผนวก ข	141
ประวัติย่อผู้ทำโครงการ	153

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประเภทสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหว	15
2.2 แสดงค่าความแข็งแรง Stiffness (K)	16
2.3 สัมประสิทธิ์ลดทอนแรง (R) สำหรับวิธีที่ 2	18
2.4 แสดงสัมประสิทธิ์สำหรับคุณสมบัติของดิน (S)	21
2.5 ตัวประกอบปรับค่าแรง	22
2.6 แสดงค่าตัวคูณประกอบการคิดรวมน้ำหนัก	23
2.7 แสดงค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) สำหรับวิธีที่ 3	24
2.8 แสดงความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบ 0.2 วินาที (S_G) และ ที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่จังหวัดกาญจนบุรี	26
2.9 แสดงความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบ 0.2 วินาที (S_G) และ ที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่จังหวัดเชียงราย	27
2.10 แสดงความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบ 0.2 วินาที (S_G) และ ที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่จังหวัดกำแพงเพชร	27
2.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร F_a	29
2.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร F_v	29
2.13 แสดงโซนพื้นที่เฝ้ากรุงเทพฯเพื่อการออกแบบ อาคารต้านแรงแผ่นดินไหว	34
2.14 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธี แรงสถิตเทียบเท่าสำหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ ของพื้นที่ในเฝ้ากรุงเทพฯ	40
2.15 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วย วิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ ของพื้นที่ในเฝ้ากรุงเทพฯ	40
2.16 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วย วิธีพลศาสตร์สำหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ ของพื้นที่ในเฝ้ากรุงเทพฯ	41
2.17 แสดงการออกแบบแรงตามแนวแรง	43

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.18 แสดงประเภทสมรรถนะด้านแรงแผ่นดินไหวที่สัมพันธ์กับผล ตอบสนองเชิงสเปกตรัมของมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง1302	49
2.19 แสดงค่าสมรรถนะด้านแรงแผ่นดินไหวที่สัมพันธ์กับผลตอบสนอง เชิงสเปกตรัมของมาตรฐาน AASHTO	49
2.20 แสดงค่ากำลังครากของเหล็ก	51
2.21 แสดงระยะเรียงของเหล็กปลอกตามพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหว	54
2.22 แสดงหน่วยแรงลมตามความสูงขององค์อาคาร	55
2.23 ค่าความเร็วเสียดทาน (v_0) และระยะเสียดทาน (z_0) บนสภาพพื้นผิวต่าง ๆ	57
2.24 แรงลมพื้นฐาน p_B ในทิศทางต่างๆ เมื่อ $v_B = 160$ กิโลเมตรต่อชั่วโมง	57
3.1 แผนระยะเวลาในการดำเนินงานแต่ละกิจกรรม	64
ก-1 แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณในพื้นที่ต่าง ๆ	123
ก-2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคุณภาพของดินของแต่ละจังหวัด	123

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รอยเลื่อนที่ยังทรงพลังในประเทศไทย	6
2.2 ส่วนประกอบของโครงสร้างสะพานส่วนบนและส่วนล่าง	7
2.3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว	9
2.4 สะพานสำคัญที่สุดเชื่อมระหว่างประเทศจีนกับประเทศพม่า	9
2.5 สะพานสำคัญที่มีการใช้ในการขนส่งทางคมนาคมตลอดเวลา	10
2.6 สะพานทั่วไปซึ่งเป็นสะพานข้ามแม่น้ำระยอง ณ วัดละหารไร่ จังหวัดระยอง	11
2.7 ตารางของค่าสัมประสิทธิ์ γ และ β	14
2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการโก่ง	18
2.9 แผนที่แสดงเส้นชั้นความสูงของ PGA_0/G และเขตแผ่นดินไหวของประเทศไทย	20
2.10 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$	31
2.11 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบ เท่าสำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} > S_{DS}$	31
2.12 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$	32
2.13 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} > S_{DS}$	32
2.14 แผนที่แสดงการแบ่งโซนพื้นที่แอ่งกรุงเทพเพื่อการออกแบบอาคารต้านทาน แผ่นดินไหว	33
2.15 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับโซนต่าง ๆ ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ	38
2.16 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ สำหรับโซนต่าง ๆ ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ	39
2.17 ภาพแสดงแนวแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง	42

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 แสดงแนวแรงในทิศตามยาวและตามขวาง	43
3.1 แสดงถึงคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำงาน	58
3.2 แสดงถึงคู่มือที่ใช้ในการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแรงแผ่นดินไหว	59
3.3 แสดงถึงคู่มือมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว	59
3.4 ขั้นตอนการออกแบบวิธีที่ 1 วิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง	61
3.5 ขั้นตอนการออกแบบวิธีที่ 2 วิธีเปิดแผนที่เสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหว ของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วินิชชัย	62
3.6 ขั้นตอนการออกแบบวิธีที่ 3 เปิดคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อ ต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงปีพ.ศ.2559	63
3.7 ขั้นตอนการทำโครงการ	64
4.1 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วน ความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด จังหวัดเชียงราย	66
4.1 (ข) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วน ความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด จังหวัดกาญจนบุรี	66
4.1 (ค) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วน ความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด จังหวัดกำแพงเพชร	67
4.1 (ง) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วน ความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	67
4.2 (ก) กราฟเปรียบเทียบแรงจากแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาว ของหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย	69
4.2 (ข) กราฟเปรียบเทียบแรงจากแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาว ของหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี	69
4.2 (ค) กราฟเปรียบเทียบแรงจากแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาว ของหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร	70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 (ง) กราฟเปรียบเทียบแรงจากแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาว ของหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	70
4.3 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วน ความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย	72
4.3 (ข) กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาว หน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย	72
4.4 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความ สูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี	74
4.4 (ข) กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาว หน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี	74
4.5 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความ สูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร	76
4.5 (ข) กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาว หน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร	76
4.6 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความ สูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	78
4.6 (ข) กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาว หน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	78
4.7 (ก) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลมกับอัตราส่วนความ สูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย	80
4.7 (ข) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลมกับอัตราส่วนความ สูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี	80
4.7 (ค) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลมกับอัตราส่วนความ สูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร	81

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 (ง) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลมกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร	81
4.8 (ก) กราฟเปรียบเทียบแรงแผ่นดินไหวและแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระดับกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย	83
4.8 (ข) กราฟเปรียบเทียบแรงแผ่นดินไหวและแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระดับกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี	83
4.8 (ค) กราฟเปรียบเทียบแรงแผ่นดินไหวและแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระดับกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร	84
4.8 (ง) กราฟเปรียบเทียบแรงแผ่นดินไหวและแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระดับกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพฯ	84
4.9 (ก) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระดับกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย	89
4.9 (ข) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระดับกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี	89
4.9 (ค) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระดับกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร	87
4.9 (ง) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระดับกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร	87
4.10 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย	89
4.10 (ข) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี	89
4.10 (ค) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร	90

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 (ง) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วน ความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	90
4.11 (ก) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลม กับอัตราส่วน ความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัดเท่ากับ 2 และ 6 ที่จังหวัดเชียงราย	92
4.11 (ข) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลม กับอัตราส่วน ความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัดเท่ากับ 2 และ 6 ที่จังหวัดกาญจนบุรี	92
4.11 (ค) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลม กับอัตราส่วน ความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัดเท่ากับ 2 และ 6 ที่จังหวัดกำแพงเพชร	93
4.11 (ง) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลม กับอัตราส่วน ความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัดเท่ากับ 2 และ 6 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	93
4.12 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อ ความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย	95
4.12 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อ ความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี	95
4.12 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อ ความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร	96
4.12 (ง) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อ ความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	96
4.13 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาว ของหน้าตัด ที่เท่ากับ 2 ,6 และ 10 จังหวัดเชียงราย	98
4.13 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาว ของหน้าตัด ที่เท่ากับ 2 ,6 และ 10 จังหวัดกาญจนบุรี	98
4.13 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาว ของหน้าตัด ที่เท่ากับ 2 ,6 และ 10 จังหวัดกำแพงเพชร	99

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 (ง) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัด ที่เท่ากับ 2 , 6 และ 10 จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	99
4.14 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กลูกตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย	101
4.14 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กลูกตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี	101
4.14 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กลูกตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร	102
4.14 (ง) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กลูกตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	102
4.15 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กลูกตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด ที่เท่ากับ 2 , 6 และ 10 จังหวัดเชียงราย	104
4.15 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กลูกตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด ที่เท่ากับ 2 , 6 และ 10 จังหวัดกาญจนบุรี	104
4.15 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กลูกตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด ที่เท่ากับ 2 , 6 และ 10 จังหวัดกำแพงเพชร	105
4.15 (ง) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กลูกตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด ที่เท่ากับ 2 , 6 และ 10 จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	105
4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กลูกตั้งกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 1	107
4.17 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กลูกตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2 จังหวัดเชียงราย	108

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กกล้าตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2 จังหวัดกาญจนบุรี	108
4.17 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กกล้าตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2 จังหวัดกำแพงเพชร	109
4.17 (ง) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กกล้าตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2 จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ	109
4.18 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กกล้าตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 3 จังหวัดเชียงราย	110
4.18 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กกล้าตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 3 จังหวัดกาญจนบุรี	111
4.18 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กกล้าตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 3 จังหวัดกำแพงเพชร	112
4.18 (ง) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กกล้าตั้ง กับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 3 จังหวัดกรุงเทพมหานคร	112
ข-1 หน้าจอของโปรแกรมโปรแกรม Response-2000	142
ข-2 ตรวจสอบและเลือก Preference	143
ข-3 เลือกคำสั่ง Quick Define	143
ข-4 กำหนดคุณสมบัติของเสาหรือคาน	144
ข-5 กำหนดประเภทหน้าตัด	145
ข-6 การใส่ข้อมูลเหล็กยื่น	146
ข-7 การใส่ข้อมูลเหล็กกล้าตั้ง	147
ข-8 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมเมื่อกำหนดหน้าตัดของเสาหรือคานเสร็จสิ้น	147
ข-9 การใส่ค่าแรงตามแนวแกน	148
ข-10 แสดงการใส่ค่าแรงตามแนวแกนเสร็จสิ้น	148

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-11 แสดงขั้นตอนการประมวลผลของหน้าตัด	149
ข-12 แสดงหน้าตาของโปรแกรมที่มีการประมวลผลของหน้าตัด	149
ข-13 ระบุข้อมูลแรงโมเมนต์ที่เกิดจากหน้าตัดที่นำไปคำนวณเป็นค่า M_n	150
ข-14 แสดงขั้นตอนการเข้าสู่วิธีการเปลี่ยนข้อมูลเหล็กยื่น	150
ข-15 แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนข้อมูลเหล็กยื่น	151
ข-16 แสดงหน้าตาของโปรแกรมแสดงหน้าตัดเมื่อทำการเปลี่ยนเหล็กยื่น	151
ข-17 ค่าที่เปลี่ยนไปของการประมวลผลหน้าตัดเมื่อทำการเปลี่ยนเหล็กยื่นเสร็จสิ้น	152

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
v	แรงเฉือน	นิวตัน
C_s	ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของโครงสร้าง	-
R	ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง	-
S	สัมประสิทธิ์สำหรับคุณภาพของดิน	-
T	คาบธรรมชาติของโครงสร้าง	วินาที
A	ค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดิน	-
h	ความสูงเสา	เมตร
h_c	ความสูงของเสาจากปลายถึงศูนย์กลางของโครงสร้าง	เมตร
K	ค่าความแข็งเกร็ง	-
E_c	ค่าโมดูลัสของคอนกรีต	กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
t_r	ความหนาของพื้นถนน	เมตร
f'_c	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	เมกกะปาสกาล
f_y	กำลังครากของเหล็ก	กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
W_{sup}	น้ำหนักของโครงสร้างส่วนบน	กิโลนิวตัน
W_{col}	น้ำหนักของเสา	กิโลนิวตัน
m	มวล	ตัน
I	โมเมนต์ความเฉื่อยของเสา	เมตร ⁴
m	โมเมนต์ประลัย	กิโลนิวตัน-เมตร
P_u	แรงกด	กิโลนิวตัน
M_n	โมเมนต์ที่ได้จากหน้าตัด	กิโลนิวตัน-เมตร
M_u	โมเมนต์ที่สภาวะประลัย	กิโลนิวตัน-เมตร
ϕ	ตัวปรับลดค่า	-
A_g	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด	ตารางเมตร
L_G	ความสูงเสาช่วง General Region	เมตร

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
V_c	แรงเฉือนในคอนกรีต	กิโลนิวตัน
V_s	แรงเฉือนในเหล็ก	กิโลนิวตัน
A_v	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก	ตารางมิลลิเมตร
S	ระยะเรียง	มิลลิเมตร
b_c	ความกว้างประสิทธิภาพ	มิลลิเมตร
h_c	ความลึกประสิทธิภาพ	มิลลิเมตร
E_s	โมดูลัสของเหล็ก	กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
W_{ll}	น้ำหนักบรรทุกจร	กิโลนิวตัน
S_{MS}	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาทีที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก
S_{M1}	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก
S_s	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมจากแผนที่ความเสี่ยงภัยที่คาบการสั่น 0.2 วินาที	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก
S_1	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมจากแผนที่ความเสี่ยงภัยที่คาบการสั่น 1.0 วินาที	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก
F_a	สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที	-

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
F_v	สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 1 วินาที	-
d_v	ระยะจากศูนย์กลางของเหล็กรับ แรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กรับ แรงดึง	มิลลิเมตร
β	แฟกเตอร์แสดงความสามารถใน การรับแรงดึงในแนวทแยงของ คอนกรีต	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

แผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติธรรมชาติที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดินเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก หรือการกระทำของมนุษย์ เช่น การทดลองระเบิดนิวเคลียร์ การระเบิดชั้นหินในการทำเหมืองแร่ การสร้างเขื่อนกักเก็บน้ำขนาดใหญ่ เป็นต้น ผลของแผ่นดินไหวจะสร้างความเสียหายเป็นวงกว้างตามขนาดความรุนแรงในแต่ละครั้ง โดยปัจจุบันยังไม่มีเทคโนโลยีใดที่สามารถทำนายการเกิดแผ่นดินไหวได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นจึงถือได้ว่าแผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติที่ยากต่อการรับมือ

เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยเริ่มมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดขึ้นบ่อยครั้ง โดยขนาดความรุนแรงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่ออาคารบ้านเรือนต่าง ๆ รวมถึงโครงสร้างที่อำนวยความสะดวกในการคมนาคม เช่น ถนน สะพาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสะพาน ซึ่งถือว่าเป็นระบบสาธารณูปโภคที่มีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของประชาชน เนื่องจากสะพานเป็นโครงสร้างที่ใช้สำหรับข้ามจากพื้นที่หนึ่งไปยังอีกพื้นที่หนึ่ง อาจเชื่อมต่อระหว่างหุบเขา แม่น้ำ ถนน ทางรถไฟ และพื้นที่สำคัญต่าง ๆ ดังนั้นในการรับมือกับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวหากการออกแบบสะพานถูกละเลยก็จะทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง ส่งผลกระทบต่อชีวิตและความเป็นอยู่ของมนุษย์เนื่องจากเส้นทางการให้บริการเกี่ยวกับสาธารณูปโภคตลอดจนการเข้าถึงพื้นที่สำคัญ เช่น โรงพยาบาล สถานีตำรวจ สถานีดับเพลิงรวมถึงแหล่งอุตสาหกรรมนั้นถูกตัดขาด สำหรับสะพาน เสาคอม่อถือเป็นองค์อาคารที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากคอม่อทำหน้าที่รองรับน้ำหนักในแนวตั้งทั้งหมดของโครงสร้างรวมถึงแรงทางข้างที่เกิดจากแผ่นดินไหวอีกด้วย ด้วยเหตุข้างต้นการออกแบบสะพานด้านแผ่นดินไหวจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

สำหรับประเทศไทยซึ่งถือว่าเป็นประเทศที่ตั้งอยู่บนพื้นที่ ๆ มีความเสี่ยงจากแผ่นดินไหวในระดับปานกลางกลับยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบสะพานในประเทศไทยไว้ใช้เอง โดยที่ผ่านมามีการประยุกต์การออกแบบโดยวิธีต่าง ๆ แต่ก็ยังไม่สามารถอธิบายถึงความรุนแรงที่แท้จริง รวมถึงไม่สามารถสะท้อนระดับความต้องการที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยได้ จนกระทั่งปี พ.ศ. 2559 กรมทางหลวงสังกัดกระทรวงคมนาคม ได้มีการเผยแพร่คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวขึ้น ซึ่งถือเป็นมาตรฐานการออกแบบสะพานฉบับแรกของประเทศ ซึ่งแม้ว่าคู่มือดังกล่าวจะเป็นแนวทางที่มีความละเอียดและมีหลักการ และได้ถูกบังคับใช้ แต่ก็ยังคงมีหลายคนตั้งคำถามเกี่ยวกับปริมาณของแรงที่กระทำและความสิ้นเปลืองเมื่อเปรียบเทียบกับแนวทางการออกแบบสะพานที่เคยปฏิบัติกันมาตลอด 20 ปี

โครงการนี้ต้องการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณวัสดุก่อสร้าง (Material Cost) ที่ใช้ในตอม่อสะพานแบบเสาเดี่ยวคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Single Column) ซึ่งถูกออกแบบเพื่อต้านแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาวิธีการออกแบบตอม่อสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กกับแผ่นดินไหวที่ระดับความรุนแรงต่างกันในพื้นที่ประเทศไทย

1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในตอม่อสะพานแบบเสาเดี่ยวด้วยวิธีการออกแบบที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 โครงสร้างตอม่อที่พิจารณา คือ ตอม่อแบบเสาเดี่ยวซึ่งมีหน้าตัดสี่เหลี่ยม และรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกในทางหลวง

1.3.2 พื้นที่ความรุนแรงของแผ่นดินไหวแบ่งเป็น 3 พื้นที่ คือ ระดับความรุนแรงสูง ระดับความรุนแรงปานกลาง และระดับความรุนแรงต่ำ ประกอบด้วยจังหวัดเชียงราย จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดกำแพงเพชร และกรุงเทพมหานคร

1.3.3 มุ่งเน้นเปรียบเทียบมูลค่าของวัสดุก่อสร้างเท่านั้น มิรวมถึงวิธี ขั้นตอน และอุปกรณ์ในการก่อสร้าง

1.3.4 การศึกษาข้างต้นจะพิจารณาเปรียบเทียบกับขนาดของโครงสร้าง และปริมาณเหล็กเสริมที่ได้จากแรงลมที่กำหนดไว้ตามกฎกระทรวงฯ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ศึกษาวิธีการออกแบบสะพานต้านแผ่นดินไหวที่เป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย

1.4.2 ทราบถึงความแตกต่างของปริมาณวัสดุซึ่งออกแบบด้วยวิธีการ และระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ต่างกัน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลไกการเกิดแผ่นดินไหว

จากทฤษฎีแผ่นเปลือกโลกเคลื่อนที่ (Plate Tectonics Theory) ได้ระบุว่าเปลือกโลกประกอบขึ้นจากพื้นหินขนาดใหญ่ จำนวนประมาณ 20 แผ่น ลอยเหมือนแพอยู่บนหินร้อนที่หลอมละลาย แผ่นหินเหล่านี้มีการเคลื่อนตัวอย่างช้า ๆ ด้วยแรงดันจากกระแสการไหลตัวของหินหลอมเหลวข้างใต้แผ่นเปลือกโลก การเคลื่อนตัวของหินร้อนที่หลอมละลายเหล่านี้ก่อให้เกิดแรงมหาศาลตามบริเวณรอยต่อแผ่นหิน เกิดการสะสมหน่วยแรงและความเครียดขึ้นในบริเวณนี้อย่างช้า ๆ และเมื่อหน่วยแรงที่จุดใดจุดหนึ่งสูงกว่าระดับที่เนื้อหินรับได้ก็จะเกิดการประลัยขึ้น ทำให้หน่วยแรงที่สะสม ณ จุดนั้นคลายตัวอย่างฉับพลัน ส่งผลให้หน่วยแรงบริเวณข้างเคียงมีปริมาณสูงขึ้น และเกิดการประลัยต่อเนื่องตามรอยเลื่อนที่มีอยู่ โดยการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการคายพลังงานดังกล่าวเรียกว่า “แผ่นดินไหว” ขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจะแปรผันกับความรุนแรงและการวิบัติอย่างต่อเนื่องของแผ่นเปลือกโลก ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการสะสมพลังงานความเครียดในบริเวณรอยต่อ ดังนั้นแผ่นดินไหวที่มีคาบเวลาเฉลี่ยในการเกิดซ้ำที่ยาวนานกว่าแผ่นดินไหวขนาดเล็กจะต้องใช้เวลาในการสะสมพลังงานความเครียดที่ยาวนานกว่า

กลไกข้างต้น รวมทั้งความสลับซับซ้อนและไม่สม่ำเสมอของลักษณะรอยต่อในสภาพความเป็นจริง การวิเคราะห์หาตำแหน่ง ขนาดและเวลาที่แผ่นดินไหวจะเกิดขึ้นอย่างแน่นอนนั้น เป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตามมนุษย์พอจะทราบว่าตำแหน่งของการเกิดแผ่นดินไหวส่วนมากจะอยู่ในบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นเปลือกโลก ซึ่งเรียกได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว ก็จะสามารถแบ่งออกเป็นเขตย่อยๆตามลักษณะความคล้ายคลึงของโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นดินไหว และตามรูปแบบของการเคลื่อนตัวของแผ่นพื้นหิน รวมถึงประวัติความถี่ในการเกิดแผ่นดินไหวในบริเวณนั้น นอกจากนี้ในแต่ละแหล่งกำเนิดจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแผ่นดินไหวและความถี่เฉลี่ยของการเกิดได้

ประเทศไทยจัดได้ว่าตั้งอยู่ใกล้แนวรอยต่อของแผ่นเปลือกโลกที่พาดผ่านทะเลอันดามันและประเทศพม่าเข้าไปในประเทศจีนตอนใต้ แนวรอยต่อนี้เป็นแหล่งกำเนิดของแผ่นดินไหวที่อาจส่งผลกระทบต่อประเทศไทยได้ ข้อมูลจากกรมธรณีวิทยาพบว่าปัจจุบันประเทศไทยมีรอยเลื่อนที่มีพลังทั้งหมด

14 แนวรอยเลื่อน บริเวณที่มีแผ่นดินไหวมากคือบริเวณภาคตะวันตก และภาคเหนือ รอยเลื่อนที่ยังเคลื่อนตัวในประเทศไทย ได้แก่

1. รอยเลื่อนแม่จัน พาดผ่านอำเภอฝาง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดเชียงใหม่ อำเภอแม่จัน อำเภอเชียงแสน และอำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย ในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ มีความยาวประมาณ 101 กิโลเมตร

2. รอยเลื่อนแม่อิง พาดผ่านอำเภอเทิง อำเภอขุนตาล และอำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย ในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ มีความยาวประมาณ 57 กิโลเมตร

3. รอยเลื่อนแม่ฮ่องสอน พาดผ่านอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน จังหวัดแม่ฮ่องสอน ในแนวทิศเหนือ-ใต้ มีความยาวประมาณ 29 กิโลเมตร

4. รอยเลื่อนเมย วางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ พาดผ่านตั้งต้นจากลำน้ำเมย ชายแดนพม่าต่อไปยังห้วยแม่ท้อ ลำน้ำปิง จังหวัดตาก ไปถึงจังหวัดกำแพงเพชร นครสวรรค์ และสิ้นสุดที่จังหวัดอุทัยธานี ในแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือ มีความยาวประมาณ 250 กิโลเมตร

5. รอยเลื่อนแม่ทา พาดผ่านอำเภอแม่ทา จังหวัดลำพูน และอำเภอแม่ออน จังหวัดเชียงใหม่ ในแนวโค้งไปทางทิศตะวันออก มีความยาวประมาณ 61 กิโลเมตร

6. รอยเลื่อนเถิน พาดผ่านอำเภอแม่พริก อำเภอเถิน จังหวัดลำปาง และอำเภอวังชิ้น จังหวัดแพร่ ในแนวโค้งไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ มีความยาวประมาณ 103 กิโลเมตร

7. รอยเลื่อนพะเยา พาดผ่านอำเภองาว จังหวัดลำปาง และอำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ในแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ทางด้านทิศเหนือของรอยเลื่อนท่าสี่ มีความยาวประมาณ 23 กิโลเมตร

8. รอยเลื่อนปัว พาดผ่านพื้นที่อำเภอสันติสุข อำเภอท่าวังผา อำเภอปัว อำเภอเชียงกลาง และอำเภอทุ่งช้าง ของจังหวัดน่านในแนวเหนือ-ใต้ ด้วยความยาวประมาณ 130 กิโลเมตร

9. รอยเลื่อนอุตรดิตถ์ พาดผ่านอำเภอเมือง อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ อำเภอนาหมื่น อำเภอนาน้อย อำเภอเวียงสา และอำเภอแม่จริม จังหวัดน่าน ในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ มีความยาวประมาณ 150 กิโลเมตร

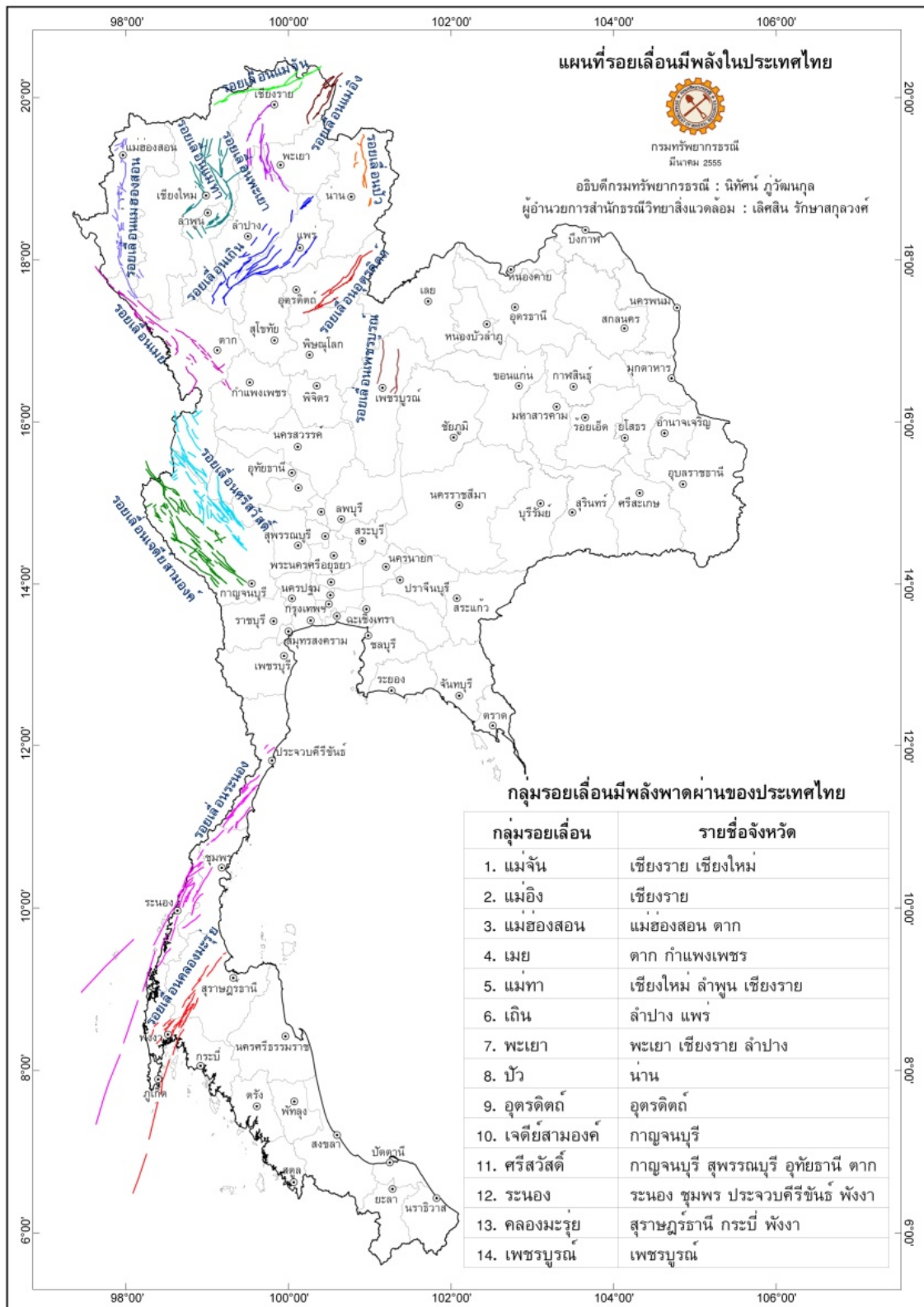
10. รอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ พาดผ่านอำเภอทองผาภูมิ และอำเภอสังขละบุรี จังหวัดกาญจนบุรี ในแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ มีความยาวประมาณ 60 กิโลเมตร

11. รอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ พาดผ่านอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี อำเภอศรีสวัสดิ์ และอำเภอหนองปรือ จังหวัดกาญจนบุรี ในแนวโค้งเล็กน้อยไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ มีความยาวประมาณ 62 กิโลเมตร

12. รอยเลื่อนเพชรบูรณ์ พาดผ่านอำเภอหนองไผ่ อำเภอเมือง อำเภอหล่มสัก และอำเภอหล่มเก่า จังหวัดเพชรบูรณ์ ประกอบด้วยรอยเลื่อนบริวารในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ กับแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้สลับกัน มีความยาวประมาณ 110 กิโลเมตร

13. รอยเลื่อนระนอง พาดผ่านพื้นที่ตั้งแต่ จังหวัดระนอง ชุมพร ประจวบคีรีขันธ์ และพังงา มีความยาวประมาณ 270 กิโลเมตร

14. รอยเลื่อนคลองมะรุ่ย พาดผ่านอำเภอบ้านตาขุน อำเภอพนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี อำเภอทับปุด อำเภอเมือง จังหวัดพังงา พาดผ่านไปตามทะเลอันดามัน ระหว่างอำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต กับอำเภอเกาะยาว จังหวัดพังงา ในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ มีความยาวประมาณ 148 กิโลเมตร



รูปที่ 2.1 รอยเลื่อนที่ยังทรงพลังในประเทศไทย

ที่มา : กรมธรณีวิทยา, 2555.

2.2 โครงสร้างสะพาน

โครงสร้างสะพานคือชิ้นส่วนองค์ประกอบของสะพานที่เริ่มนับตั้งแต่เสาเข็มจนถึงชิ้นส่วนบนของโครงสร้างที่รองรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน การที่จะวิเคราะห์โครงสร้างของสะพานต้องรู้ถึงแรงที่กระทำ ซึ่งโครงสร้างของสะพานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักดังนี้

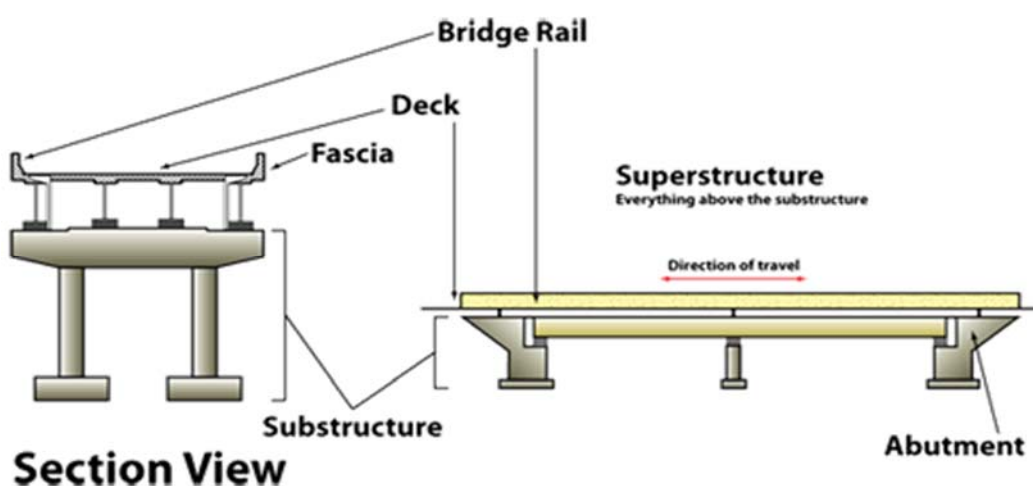
2.2.1 โครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) ได้แก่

- 1) ฐานราก แบบมีเสาเข็มหรือแบบฐานแผ่
- 2) ตอม่อ ประกอบด้วย เสา คานยึดเสา (Bracing Beam) คานรัดหัวเสาหรือเรียกว่าคานรับพื้นสะพาน (Cap Beam) และผนังกันดินสำหรับตอม่อตบริม (Abutment)

2.2.2 โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) ได้แก่

- 1) พื้นสะพาน (รวมคานคอนกรีตอัดแรง)
- 2) ทางเท้า
- 3) ราวสะพาน
- 4) แท่งรองรับเสาไฟฟ้า

รูปที่ 2.2 แสดงถึงส่วนประกอบของโครงสร้างสะพาน 2 ส่วน 1.) ส่วนของโครงสร้างส่วนล่างจะเริ่มต้นตั้งแต่ฐานรากจนถึงหัวเสาหรือหัวของตอม่อสะพาน 2.) ส่วนของโครงสร้างส่วนบนจะเริ่มนับตั้งแต่พื้นของสะพานขึ้นไปทั้งหมด



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของโครงสร้างสะพานส่วนบนและส่วนล่าง

ที่มา: http://www.rm.w.vtransprojects.vermont.gov/related_links/.

2.3 ความเสียหายของสะพานจากแผ่นดินไหว

2.3.1 ความเสียหายของฐานราก

แผ่นดินไหวทำให้เกิดแรงต้านข้างกระทำต่อโครงสร้างซึ่งส่งผลให้เกิดโมเมนต์ที่ฐานราก ฉะนั้นจึงต้องออกแบบให้เสาเข็มสามารถต้านทานแรงดึงได้ ถ้าเกิดโมเมนต์สูง และต้องมีระยะยึดรั้งของเหล็กยื่นในเสาเข็มเข้าไปในฐานรากอย่างเพียงพอ ความเสียหายบริเวณฐานรากจากแรงแผ่นดินไหวเกิดขึ้นได้ยาก ส่วนใหญ่เกิดจากเสาเข็มรับน้ำหนักมากเกินไป การเคลื่อนตัวด้านข้างของดิน เสาเข็มเอียง ศูนย์ ดินยุบตัว เป็นต้น

2.3.2 ความเสียหายของเสา

ความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์เพราะเกิดขึ้นอย่างฉับพลันทันทีทำให้โครงสร้างสูญเสียเสถียรภาพและเกิดการวิบัติ อีกทั้งการซ่อมแซมภายหลังทำได้ยากหรือไม่สามารถซ่อมแซมได้ การป้องกันคือต้องมีการเสริมเหล็กปลอกอย่างเหมาะสมและเพียงพอต่อการรับแรง โดยเหล็กปลอกนอกจากจะทำหน้าที่รับแรงเฉือนแล้วยังช่วยโอบรัดคอนกรีตภายในทำให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้นและช่วยป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กยื่นในเสาได้อีกด้วย

2.3.3 ความเสียหายของที่รองรับ

ที่รองรับทำหน้าที่ถ่ายแรงระหว่างโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่างให้เป็นไปตามสมมติฐานในการออกแบบ ถ้าเกิดการวิบัติของที่รองรับอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายที่โครงสร้างส่วนบนหรือส่วนล่างได้ เป็นปัญหาที่มักจะเกิดที่บริเวณรอบต่อคาน คือ การชนกันของคาน (Pounding) และการที่คานตกจากหัวเสา (Unseating) การชนกันของคานเกิดจากความกว้างของรอยต่อไม่เพียงพอที่จะรองรับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างคานกับคาน หรือคานกับตอม่อริม ทำให้เกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนที่ตอม่อริม การชนกันเป็นการถ่ายเทโมเมนต์ตมภายในเวลาอันรวดเร็วทำให้เกิดแรงขนาดใหญ่กระทำกับโครงสร้าง โดยการชนกันอาจทำให้เกิดความเสียหายเฉพาะจุดที่ชนกันหรือทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างหลักได้ ส่วนการที่คานตกจากหัวเสาเกิดจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างคานกับหัวเสาเกินกว่าระยะรองรับคาน วิธีการป้องกันคือการเตรียมระยะรองรับคานให้เพียงพอหรือใช้เคเบิลช่วยรั้งไม่ให้คานตกจากหัวเสาในการออกแบบสะพานต้านทานแผ่นดินไหวนั้นการที่คานตกจากหัวเสาจะเป็นสิ่งที่ไม่ยอมให้เกิดขึ้นเพราะเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยต่อชีวิตของผู้ใช้สะพานโดยตรงดังรูปที่ 2.3 รูปแสดงความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่ประเทศญี่ปุ่นขนาดความรุนแรง 8.8 ริคเตอร์ ทำให้มีความเสียหายต่อประเทศเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว

ที่มา: <http://thaiposting.blogspot.com/2015/07/1995.html>.

2.4 ความสำคัญของสะพาน

สะพานเป็นสิ่งก่อสร้างที่อยู่คู่กับถนนทุกสาย หากสะพานเกิดความเสียหาย ทำให้การคมนาคมเป็นไปไม่ได้ไม่สะดวกนัก ยิ่งเมื่อเกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติอย่างแผ่นดินไหว จำเป็นที่จะต้องมีการอพยพเคลื่อนย้ายผู้คน ผู้ออกแบบสะพานต้องคำนึงถึงแรงแผ่นดินไหวที่จะกระทำต่อสะพานด้วย ซึ่งในการออกแบบต้องจำแนกประเภทของสะพานตามประเภทการใช้งาน ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

2.4.1 สะพานที่สำคัญที่สุด (Critical Bridges)

สะพานที่สำคัญที่สุด คือสะพานที่อยู่ในเส้นทางยุทธศาสตร์และเกี่ยวข้องกับความมั่นคงของประเทศและใช้เป็นเส้นทางหลักเพื่อการช่วยเหลือหรืออพยพฉุกเฉินเมื่อเกิดภัยพิบัติรุนแรงตัวอย่างของสะพานประเภทนี้ได้แก่ สะพานที่มีช่วงความยาวสะพานมากกว่า 120 เมตร สะพานเชื่อมต่อระหว่างพรมแดนประเทศ สะพานข้ามระหว่างประเทศจีนไปยังประเทศพม่า ซึ่งมีความยาว 2,468.475 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สะพานสำคัญที่สุดเชื่อมระหว่างประเทศจีนกับประเทศพม่า

ที่มา : <http://www.manager.co.thChinaViewNews.aspxNewsID=9590000042270>

2.4.2 สะพานสำคัญ (Essential Bridges)

สะพานสำคัญ คือสะพานที่อยู่ในเส้นทางสายหลักระหว่างจังหวัด ระหว่างสถานที่สำคัญและใช้เส้นทางเพื่อการช่วยเหลือหรืออพยพฉุกเฉินเมื่อเกิดภัยพิบัติอย่างรุนแรง ตัวอย่างของสะพานประเภทนี้ได้แก่ สะพานที่มีช่วงความยาวสะพานมากกว่า 60 เมตร สะพานที่อยู่ในโครงข่ายของทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง (Motorway) สะพานหรือทางแยกยกระดับที่อยู่ในโครงข่ายของทางด่วน (Expressway) สะพานที่อยู่ในโครงข่ายของทางหลวงอาเซียน (ASEAN Highways) สะพานที่เป็นโครงข่ายของถนนที่รองรับปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันมากกว่า 1,000 คันต่อวัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นสะพานสำคัญที่มีการใช้ในการคมนาคมตลอดเวลาไม่ว่าจะเป็นการใช้ขนส่งหรือเป็นเส้นทางจราจรข้ามเมือง เขต หรือแก้ปัญหาทางจราจรต่างๆ เพื่อให้เกิดความสะดวกแก่ผู้ใช้เส้นทาง



รูปที่ 2.5 สะพานสำคัญที่มีการใช้ในการขนส่งทางคมนาคมตลอดเวลา

ที่มา : <http://www.jeffjacoby.com/5696/expressway-hov-lane-a-highly-offensive-venture>.

2.4.3 สะพานทั่วไป (Other Bridges)

สะพานทั่วไป คือสะพานที่ไม่เข้าข่ายสะพานประเภทที่สำคัญที่สุดและสะพานสำคัญโดยเป็นสะพานที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงข่ายทางหลวง ทางหลวงชนบท ทางหลวงสัมปทานดังแสดงในรูปที่ 2.6 แสดงถึงสะพานข้ามพื้นที่ทั่วไปเช่นการข้ามแม่น้ำ ข้ามถนน ข้ามระหว่างพื้นที่ที่มีเหว หรือหุบเขา สามารถเห็นได้ทั่วไปตามชานเมือง



รูปที่ 2.6 สะพานทั่วไปซึ่งเป็นสะพานข้ามแม่น้ำระยอง ณ วัดละหารไร่ จังหวัดระยอง
ที่มา: http://thainews.prd.go.thwebsite_thnewsprint_newsTNSOC5806140010065.

2.5 การวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นจากการเกิดแผ่นดินไหว

การวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นจากการเกิดแผ่นดินไหวเป็นการวิเคราะห์แรงเฉือนที่กระทำต่อองค์อาคาร โดยมีการปรับลดค่าด้วยค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

2.5.1 วิธีที่ 1 วิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างแบบคงที่ (6%)

อ้างอิงจากมาตรฐาน American Association of State Highway and Transportation Officials Standard 1973 (AASHTO 1973) ซึ่งนิยมใช้ในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2540 – พ.ศ. 2552

ทฤษฎีการออกแบบจะกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างเป็นค่าคงที่ 6% เนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหวในสมัย 20 ปี ความรู้เกี่ยวกับแผ่นดินไหวในประเทศไทยมีอยู่ในวงจำกัด ไม่สามารถคาดการณ์ถึงสถานที่ที่เกิดได้แน่นอน จึงทำให้การคำนวณการออกแบบต้านแรงแผ่นดินไหวยึดตามมาตรฐานของ American Association of State Highway and Transportation Officials Standard 1973 ซึ่งมีสมการของแรงเฉือนที่ฐานเนื่องจากแผ่นดินไหว ดังนี้

$$V = C_s W \quad (2-1)$$

โดยที่	V	คือ	แรงเฉือนที่ฐาน มีหน่วยเป็นนิวตัน
	C_s	คือ	สัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง (ใช้ 6%)
	W	คือ	น้ำหนักทั้งหมดของโครงสร้าง มีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน

2.5.2 วิธีที่ 2 วิธีเปิดแผนที่เสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหว ของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วินิชชัย ร่วมกับ AASHTO Standard 2002

ใช้หลักการของวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static) โดยแรงแผ่นดินไหวจะถูกสมมุติให้กระจายอย่างสม่ำเสมอตามแนวยาวและแนวขวางของสะพาน และเนื่องจากค่าความเร่งเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวในแต่ละพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันตามขนาดความรุนแรงจึงได้นำค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดินจากแผนที่แสดงความเสี่ยงภัยของแผ่นดินไหวของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วินิชชัย มาใช้ร่วมกับการหาค่าแรงเฉือนตามมาตรฐาน American Association of State Highway and Transportation Officials Standard 2002 สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ

$$V = \left(\frac{C_s}{R} \right) W \quad (2-2)$$

และ

$$C_s = \frac{1.2AS}{T^3} \leq 2.5A \quad (2-3)$$

โดยที่	V	คือ	แรงเฉือนที่ฐาน มีหน่วยเป็นนิวตัน
	C_s	คือ	สัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง
	R	คือ	ค่าตัวประกอบปรับค่าผลตอบสนอง
	S	คือ	สัมประสิทธิ์สำหรับคุณสมบัติของดิน
	T	คือ	คาบธรรมชาติของโครงสร้าง มีหน่วยเป็นวินาที
	A	คือ	ค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดินเทียบกับค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (Peak Ground Acceleration) ซึ่งได้จากแผนที่ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทยของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วินิชชัย

2.5.3 วิธีที่ 3 เปิดคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวง ปี พ.ศ.2559

ในวิธีที่สามนี้เป็นการนำค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง 1302 อ้างอิงมาจากมาตรฐาน American Association Of State Highway And Transportation Officials LRFD Bridge Design Specifications 2010 มาใช้ร่วมกับคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกระทรวงคมนาคม เพื่อหาค่าแรงเฉือนที่ฐานที่กระทำต่อโครงสร้างจากสมการ

$$V = C_s W \quad (2-4)$$

และ

$$C_s = \frac{S_a}{R} \quad (2-5)$$

โดยที่	V	คือ	แรงเฉือน มีหน่วยเป็นนิวตัน
	C_s	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง
	W	คือ	น้ำหนักทั้งหมดของโครงสร้าง
	S_a	คือ	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น พื้นฐานของอาคารหน่วยเป็นความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกหน่วยเป็น g
	R	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ปรับการตอบสนอง

2.6 สำหรับวิธีที่ 1 วิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างแบบคงที่ (6%)

วิธีนี้เป็นวิธีดั้งเดิมที่ประเทศไทยใช้มาร่วม 20 ปี โดยไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวสามารถวิเคราะห์ได้จากพารามิเตอร์ต่อไปนี้

2.6.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง (C_s)

ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหวมีความสำคัญต่อการหาค่ากำลังที่จุดคราก ซึ่งการหาค่ากำลังที่จุดครากนี้ ต้องมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ผลของแรงสถิตเทียบเท่าเพื่อลดแรงลง บางประเทศเรียกค่านี้ว่า เป็นตัวประกอบลดกำลัง หรือตัวประกอบลดแรง ซึ่งในวิธีที่ 1 นี้ นำค่าตัวประกอบลดกำลังมาจากมาตรฐาน AASHTO 1973 Standard Specifications For Highway Bridges

เมื่อ 30 ปีก่อน การป้องกันแผ่นดินไหวได้เริ่มมีบทบาทขึ้นต่อการออกแบบโครงสร้างอาคารและสิ่งก่อสร้างต่างๆ ด้วยการทราบถึงพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการเกิดแผ่นดินไหวจึงมีมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวได้เกิดขึ้นใน AASHTO 1973 เป็นมาตรฐานแรกๆ ที่ประเทศไทยนิยมใช้กันมากในการออกแบบต้านแรงแผ่นดินไหวเพราะเป็นการออกแบบที่ง่ายต่อการคิดคำนวณโดยได้กำหนดค่าของตัวประกอบลดค่าหรือที่เรียกกันว่าค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหวเป็น 6% ของน้ำหนักโครงสร้าง

2.6.2 น้ำหนักทั้งหมดของโครงสร้าง (W)

การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวกับแรงอื่น ๆ สำหรับส่วนประกอบของโครงสร้างสะพานจะต้องพิจารณาร่วมกับแรงประเภทอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหวโดยการรวมผลแรงแผ่นดินไหวกำหนดไว้ดังนี้

การออกแบบในการรวมผลของแรงแผ่นดินไหวกับแรงอื่นๆด้วยตัวประกอบแรง (Load Factor) จากมาตรฐาน AASHTO STANDARD 2002 ตามตารางดังต่อไปนี้

TABLE 3.22.1A Table of Coefficients γ and β

Col. No.	1	2	3	3A	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
GROUP	γ	β FACTORS													%	
		D	(L+I) _n	(L+H) _p	CF	E	B	SF	W	WL	LF	R+S+T	EQ	ICE		
SERVICE LOAD	I	1.0	1	1	0	1	β_E	1	1	0	0	0	0	0	0	100
	IA	1.0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
	IB	1.0	1	0	1	1	β_E	1	1	0	0	0	0	0	0	**
	II	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	125
	III	1.0	1	1	0	1	β_E	1	1	0.3	1	1	0	0	0	125
	IV	1.0	1	1	0	1	β_E	1	1	0	0	0	1	0	0	125
	V	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	140
	VI	1.0	1	1	0	1	β_E	1	1	0.3	1	1	1	0	0	140
	VII	1.0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	133
	VIII	1.0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	140
IX	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	150	
X	1.0	1	1	0	0	β_E	0	0	0	0	0	0	0	0	100	
LOAD FACTOR DESIGN	I	1.3	β_D	1.67*	0	1.0	β_E	1	1	0	0	0	0	0	0	Not Applicable
	IA	1.3	β_D	2.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	IB	1.3	β_D	0	1	1.0	β_E	1	1	0	0	0	0	0	0	
	II	1.3	β_D	0	0	0	β_E	1	1	1	0	0	0	0	0	
	III	1.3	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0.3	1	1	0	0	0	
	IV	1.3	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0	0	0	1	0	0	
	V	1.25	β_D	0	0	0	β_E	1	1	1	0	0	1	0	0	
	VI	1.25	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0.3	1	1	1	0	0	
	VII	1.3	β_D	0	0	0	β_E	1	1	0	0	0	0	1	0	
	VIII	1.3	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0	0	0	0	0	1	
IX	1.20	β_D	0	0	0	β_E	1	1	1	0	0	0	0	1		
X	1.30	1	1.67	0	0	β_E	0	0	0	0	0	0	0	0	Culvert	

รูปที่ 2.7 ตารางของค่าสัมประสิทธิ์ γ และ β

ที่มา: มาตรฐาน AASHTO STANDARD 2002, หน้า 31

2.7 สำหรับวิธีที่ 2 วิธีเปิดแผนที่ยี่เสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหว ของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วานิชชัย ร่วมกับ AASHTO Standard 2002

2.7.1 ประเภทสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหว (Seismic Performance Categories, SPC)

การออกแบบสะพานให้มีสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวในระดับใดนั้นขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวในบริเวณที่สร้างสะพานและความสำคัญของสะพาน เพื่อให้สะพานที่ออกแบบมีความปลอดภัยและประหยัด ตามข้อกำหนดของ AASHTO ได้จำแนกสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวเป็น 4 ประเภท ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหว

ความเร่งของดิน A (g)	ระดับความสำคัญของสะพาน (Important Categories, IC)	
	สะพานสำคัญ (I)	สะพานทั่วไป (II)
$A \leq 0.09$	A	A
$0.09 < A \leq 0.19$	B	B
$0.19 < A \leq 0.29$	C	C
$0.29 < A$	D	C

ที่มา: มาตรฐาน AASHTO STANDARD 2002. หน้า 449

2.7.2 ค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) K

สมบัติของวัสดุที่แสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือต่อการเปลี่ยนรูปในช่วง Elastic Limit ในขณะที่กำลังรับแรงนั้น ๆ อยู่ค่าความแข็งแกร่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของ Modulus of Elastic และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเสาซึ่งในที่นี้เราจะการหาค่าความแข็งแกร่งของเสาต่อม่อทั้งตามยาวและตามขวางพิจารณาจากพฤติกรรมการเคลื่อนตัวเมื่อเกิดแผ่นดินไหว สามารถหาได้จากสมการ

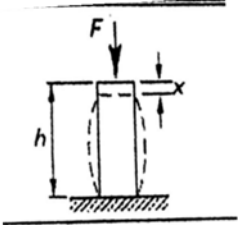
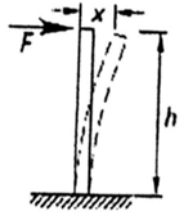
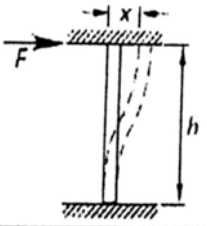
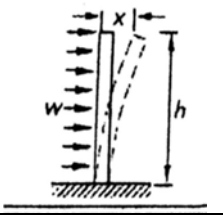
$$K = \frac{3E_c I}{h^3} \quad (2-6)$$

และ

$$K = \frac{12E_c I}{h^3} \quad (2-7)$$

โดยที่ E_c คือ ค่าโมดูลัสของคอนกรีต หน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
 h คือ ความยาวเสา หน่วยเป็น เมตร
 I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเสา หน่วยเป็น เมตร⁴

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความแข็งแรง Stiffness (K)

รูปแบบโครงสร้าง	การโก่งตัว	K
	$\frac{Fh}{AE}$	$\frac{AE}{h}$
	$\frac{Fh^3}{3EI}$	$\frac{3EI}{h^3}$
	$\frac{Fh^3}{12EI}$	$\frac{12EI}{h^3}$
	$\frac{wh^4}{8EI}$	$\frac{8EI}{h^3}$

ที่มา: AASHTO 1996.

2.7.3 ค่าคาบธรรมชาติ (T)

เป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุกลับไปมาซ้ำทางเดิมผ่านตำแหน่งสมดุลโดยมีขนาดของการกระจัดสูงสุดคงตัว ช่วงเวลาที่วัตถุเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า คาบ (T) ดังสมการ

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}} \quad (2-8)$$

โดยที่ m คือ มวลของโครงสร้าง หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

2.7.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง (C_s)

จาก American Association of State Highway and Transportation Officials Standard 2002 และแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วาณิชชัยเป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหวโดยนำค่าคุณสมบัติของดิน คาบธรรมชาติของโครงสร้าง และค่าความเร่งจากพื้นดินเมื่อเกิดแผ่นดินไหวมาพิจารณาสามารถหาได้จากสมการ

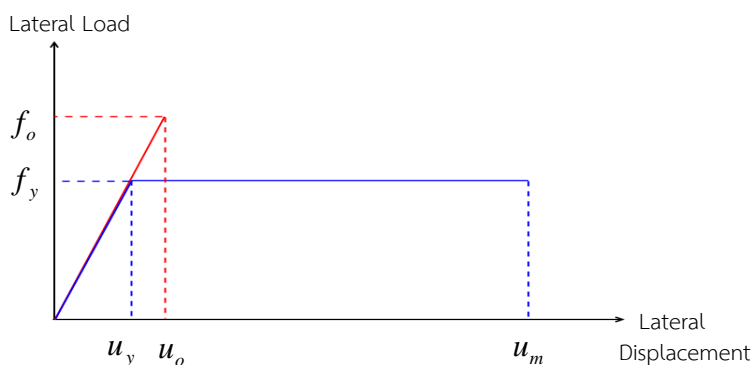
$$C_s = \frac{1.2AS}{T^{\frac{2}{3}}} \leq 2.5A \quad (2-9)$$

โดยที่ C_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง
 S คือ สัมประสิทธิ์สำหรับคุณสมบัติของดิน
 T คือ คาบธรรมชาติของโครงสร้าง
 A คือ ค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดินเทียบกับค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (PGA) ซึ่งได้จากแผนที่ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทย

2.7.5 สัมประสิทธิ์ปรับการตอบสนอง (Response Modification Factor)

ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงสถิตเทียบเท่า ได้ถูกพัฒนามาจากสเปกตรัมของความเร่งตอบสนองในกรณีที่เหมาะสมให้โครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น คือแรงภายในที่เกิดขึ้นต้องไม่เกินกำลังคราก เพราะการพัฒนาสเปกตรัมของความเร่งตอบสนองโดยสมมติให้โครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นเป็นสิ่งที่ทำได้สะดวก ถ้าวิศวกรออกแบบเสาให้มีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นจะต้องมีการจัดหน้าตัดและเสริมเหล็กให้มีกำลังที่จุดครากไม่ต่ำกว่า f_c แต่ถ้าออกแบบเสาด้านนี้โดยใช้หน้าตัดที่ประหยัดกว่า เช่นทำให้กำลังที่จุดครากเท่ากับ f_y สิ่งที่มาคือ เสาเกิดการคราก เสาที่ออกแบบจึงต้องการความเหนียวที่มากขึ้นเพื่อรองรับการครากที่เกิดถ้าไม่เช่นนั้นจะเกิดการวิบัติได้ ในการออกแบบได้ใช้ความเร่งของดินที่มีคาบการกลับประมาณ 475 ปี (เทียบเท่ากับความน่าจะเป็นที่จะเกิดจะเท่ากับ 10% ในคาบเวลาการเกิด 50 ปี) ซึ่งโครงสร้างที่ออกแบบให้ปลอดภัยและประหยัดสามารถต้านทานความเร่งที่มีคาบการกลับระดับนี้ได้ โดยจะมีพฤติกรรมเลยจุดครากไปแล้ว จึงต้องทำให้โครงสร้างมีความเหนียวเพียงพอที่จะไม่เกิดการพังทลายหรือเกินขีดจำกัดความสามารถในการซ่อมแซมได้

ในการคำนวณหากำลังที่จุดครากต้องมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว (C_s) ของโครงสร้างที่เป็นพฤติกรรมเชิงเส้นโดยใช้ตัวประกอบปรับผลตอบสนองเพื่อลดแรงลง บางประเทศเรียกค่านี้ว่าตัวประกอบลดกำลัง หรือตัวประกอบลดแรง ซึ่งได้มีนักวิจัยหลายท่านทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและเสนอค่าตัวประกอบนี้



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการโก่ง

ที่มา: อาณัติ เรืองรัศมี. การออกแบบสะพานต้านทานแผ่นดินไหว. หน้า 173

- จากกราฟ
- u_o คือ ความคลาดเคลื่อนสูงสุดของช่วงอีลาสติก
 - f_o คือ แรงสูงสุดของช่วงอีลาสติก
 - u_y คือ ค่าที่ยอมให้จำกัดของระบบ
 - u_m คือ ค่ามากที่สุดของระบบ
 - f_y คือ หน่วยแรงที่ยอมให้ของระบบ

สัมประสิทธิ์การลดทอน (Response Modification Factor, R) จากมาตรฐาน AASHTO Standard 2002 กำหนดให้มีค่าตามตารางดังที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สัมประสิทธิ์การลดทอนแรง (R) สำหรับวิธีที่ 2

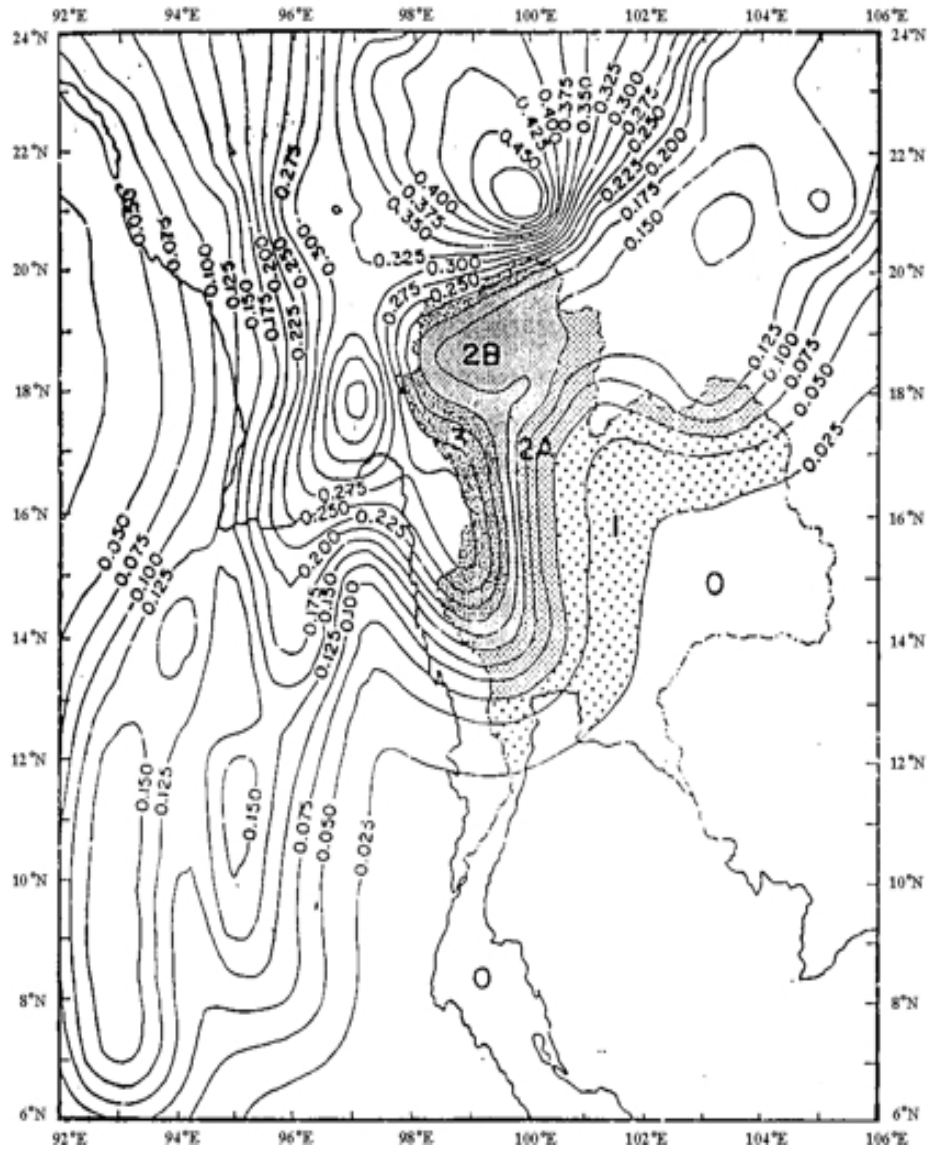
สัมประสิทธิ์ลดทอนแรง Response Modification Factor, R	
โครงสร้างส่วนล่าง (Substructure)	R
1. เสาตอม่อแบบผนังคอนกรีต (Wall-type piers)	2
2. เสาเข็มคอนกรีตรับแรงดัด (Reinforced concrete pile bents)	
a) เสาเข็มในแนวตั้ง (Vertical piles only)	3
b) เสาเข็มตอกเอียง (With Batter Pies)	2
3. เสาเข็มเดี่ยว (single columns)	3
4. เหล็ก หรือ วัสดุที่มีเหล็กผสม และ กลุ่มเสาคอนกรีต	
a) เสาเข็มในแนวตั้ง (Vertical Piles Only)	5
b) เสาเข็มตอกเอียง (With Batter Pies)	3
5. เสาตอม่อหลายต้นร่วมกันรับแรงดัด	5

ที่มา: AASHTO 1996.

2.7.6 ค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดิน (A)

ในหลายประเทศที่ตั้งอยู่ในบริเวณที่มีแผ่นดินไหวเกิดขึ้นบ่อยครั้ง ได้มีข้อกำหนดในการออกแบบก่อสร้างอาคารให้สามารถรับแรงแผ่นดินไหวอย่างเหมาะสม แต่ในประเทศที่มีแผ่นดินไหวเกิดขึ้นน้อยครั้ง ผลกระทบของแผ่นดินไหวมักถูกละเลย อาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ อย่างไรก็ตาม การนำแนวทางวิธีปฏิบัติของการออกแบบก่อสร้างอาคารสำหรับพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวรุนแรงมาใช้กับพื้นที่ที่มีความเสี่ยงน้อยก็เป็นสิ่งที่ไม่เหมาะสม เพราะการลงทุนเพื่อเพิ่มมาตรฐานของโครงสร้างอาคารจะส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจได้ เช่น ใช้ปริมาณวัสดุเกินความจำเป็น ในยุคแรกที่ประเทศไทยได้ศึกษาความเสี่ยงภัยของแผ่นดินไหวสำหรับประเทศได้โดยปณิธาน สักคุณะประสิทธิ์ และนพดล คุหาทัสนะติกุล (2536) ได้ทำการวิจัย พบว่าความเร่งสูงสุดของประเทศไทยมีค่าประมาณ 0.15 g ซึ่งขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหวในประเทศไทยไม่ได้มีขนาดเท่ากันทุกพื้นที่ จึงได้เลือกใช้ค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดินจากงานวิจัยของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วนิชชัยที่ได้ทำการศึกษาและจัดทำแผนที่ความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งต่างกันในแต่ละพื้นที่ตามขนาดความรุนแรงของแรงแผ่นดินไหว

ในปัจจุบัน มาตรฐานการออกแบบอาคารในหลายประเทศได้กำหนดให้ใช้ค่าสูงสุดของอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดิน (PGA : Peak Ground Acceleration) ณ ตำแหน่งอาคาร เป็นดัชนีแสดงความรุนแรงของผลกระทบจากแผ่นดินไหว ทั้งนี้เพราะขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่กระทำต่อตัวอาคารในด้านข้างนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ PGA นี้แต่เนื่องจากความไม่แน่นอนโดยธรรมชาติของขนาดตำแหน่ง และเวลาที่เกิดของแผ่นดินไหว การวิเคราะห์หาค่าสูงสุดของ PGA ที่อาจเกิดขึ้นในช่วงอายุการใช้งานของอาคารให้แน่นอนนั้นจึงเป็นไปได้ยาก ดังนั้นทฤษฎีความน่าจะเป็นจึงได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่า PGA ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบอาคาร Cornell เป็นวิธีความน่าจะเป็นที่สามารถนำเอาข้อมูล ความรู้ และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบแผ่นดินไหวมาวิเคราะห์หาค่า PGA ได้อย่างเหมาะสม ดังแผนที่แสดงอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดินของดร.เป็นหนึ่งใน วนิชชัย และอาเค ลีซานโตโน (1996)



รูปที่ 2.9 แผนที่แสดงเส้นชั้นความสูงของ PGA_0/G และเขตแผ่นดินไหวของประเทศไทย

ที่มา: เป็นหนึ่ง วานิชชัย และอาเคะ ลิชานโตโน, 1996

เกณฑ์ของ UBC1991 (PGA_0 คือ อัตราเร่งสูงสุดบนพื้นดินที่มีความน่าจะเป็นเพียง 1 ใน 10 ที่จะเกิดมีค่าสูงกว่าในคาบเวลา 50 ปี และ G คือ อัตราเร่งของสนามโน้มถ่วงโลก)

โซน 3 : รุนแรง : $0.20 < PGA/g \leq 0.30$

โซน 2B : ปานกลางค่อนข้างรุนแรง : $0.15 < PGA/g \leq 0.20$

โซน 2A : ปานกลาง : $0.075 < PGA/g \leq 0.15$

โซน 1 : ไม่รุนแรง : $0.025 < PGA/g \leq 0.075$

โซน 0 : ไม่มีแผ่นดินไหว : $< PGA/g \leq 0.02$

2.7.7 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคุณสมบัติของดิน (S)

ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคุณสมบัติของดินจาก American Association of State Highway and Transportation Officials Standard 2002

ดินในแต่ละพื้นที่ที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งในความแตกต่างด้านคุณสมบัตินี้รวมถึงค่าความเร่งภายในดิน ความหนาแน่นของดินในแต่ละพื้นที่ เพื่อจ่ายต่อการคำนวณจึงได้มีการแบ่งประเภทของดินและกำหนดค่าของสัมประสิทธิ์แต่ละประเภทของดิน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงสัมประสิทธิ์สำหรับคุณสมบัติของดิน (S)

ประเภทของดิน	คำอธิบาย	ค่าสัมประสิทธิ์ S
I	หิน (โดยมีความเร็วของคลื่นเฉลี่ยสูงกว่า 760 เมตรต่อวินาที)	1.0
II	ดินเหนียวแข็งซึ่งมีความหนากว่า 60 เมตร	1.2
III	ดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง หรือทรายซึ่งมีความหนาของชั้นดินเหนียวกว่า 9 m.	1.5
IV	ดินเหนียวอ่อนซึ่งมีความหนากว่า 12 เมตร (โดยมีความเร็วของคลื่นเฉลี่ยต่ำกว่า 150 เมตรต่อวินาที)	2.0

ที่มา: อาณัติ เรืองรัศมี. การออกแบบสะพานต้านทานแผ่นดินไหว. หน้า171

2.7.8 การรวมผลของแรงแผ่นดินไหว

การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวกับแรงอื่นๆ สำหรับส่วนประกอบของโครงสร้างสะพานจะต้องพิจารณาร่วมกับแรงประเภทอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหว โดยการรวมผลแรงแผ่นดินไหวนี้สามารถดูได้จากภาพที่ 2.7 ซึ่งแสดงตารางของค่าสัมประสิทธิ์ γ และ β

2.8 สำหรับวิธีที่ 3 เปิดคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงปี พ.ศ.2559

2.8.1 การรวมแรงแผ่นดินไหว

การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวกับแรงอื่นๆ สำหรับส่วนประกอบของโครงสร้างสะพานจะต้องพิจารณาร่วมกับแรงประเภทอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหว โดยการรวมผลแรงแผ่นดินไหวกำหนดไว้ดังนี้

การออกแบบในการรวมผลของแรงแผ่นดินไหวกับแรงอื่น ๆ ด้วยตัวประกอบแรง (Load Factor) จากมาตรฐาน AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS 2010 ตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.5 ตัวประกอบปรับค่าแรง

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

ที่มา: คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวปี พ.ศ.2559. หน้า 6

โดยที่ แรงที่ใช้ในการออกแบบสะพานตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ได้แก่

- DC* คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักสะพานและวัสดุ
- DD* คือ แรงเนื่องจาก Down Drag
- DW* คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุผิวพื้นสะพานและอุปกรณ์ประกอบสะพาน
- EH* คือ แรงเนื่องจากแรงดันดินด้านข้าง
- EV* คือ แรงดันดินในแนวตั้ง
- ES* คือ แรงแผ่กระจายของดิน
- EL* คือ แรงเนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างและผลของ Secondary Effect ของลวดอัดแรง
- PS* คือ แรงเนื่องจากลวดอัดแรง
- CR* คือ แรงเนื่องจากการคืบ
- SH* คือ แรงเนื่องจากการหดตัว

<i>LL</i>	คือ	แรงเนื่องจากน้ำหนักจร
<i>IM</i>	คือ	แรงเนื่องจากการกระแทก
<i>CE</i>	คือ	แรงเนื่องจากการหนีศูนย์กลางของน้ำหนักจร
<i>BR</i>	คือ	แรงเนื่องจากการหยุดของยานพาหนะ
<i>PL</i>	คือ	แรงเนื่องจากผู้ใช้สะพาน
<i>LS</i>	คือ	แรงแผ่กระจายเนื่องจากยานพาหนะ
<i>WA</i>	คือ	แรงเนื่องจากน้ำและกระแสน้ำ
<i>WS</i>	คือ	แรงลมกระทำต่อโครงสร้าง
<i>WL</i>	คือ	แรงลมกระทำต่อยานพาหนะบนสะพาน
<i>FR</i>	คือ	แรงเสียดทาน
<i>TU</i>	คือ	แรงหรือการเคลื่อนตัวเนื่องจาก Uniform Temperature
<i>TG</i>	คือ	แรงหรือการเคลื่อนตัวเนื่องจาก Temperature Gradient
<i>SE</i>	คือ	การทรุดตัว
<i>EQ</i>	คือ	แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว

* โดยค่าของ γ^{EQ} ที่ใช้ในการปรับค่าเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว แนะนำให้ใช้ไม่น้อยกว่า 0.50

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าตัวคูณประกอบการคิดรวมน้ำหนัก

ประเภทของน้ำหนัก ชนิดของฐานราก และวิธีที่ใช้คำนวณปรับลด		ตัวประกอบกำลัง	
		มากที่สุด	น้อยที่สุด
DC: Component and Attachments		1.25	0.90
DC: Strength IV only (เฉพาะความแข็งแรงของกลุ่ม 5)		1.50	0.90
ตัวปรับลด	เสาเข็ม : α วิธีของทอมลินสัน (Tomlinson Method)	1.4	0.25
	เสาเข็ม : วิธีของแลมด้า (lambda Method)	1.05	0.30
	เพลลาเจาะ : O'Neill and Reese (1999) Method	1.25	0.35
DW: Wearing Surfaces and Utilities (ผิวจราจร)		1.50	0.65
EH : Horizontal Earth Pressure (แรงดันในแนวราบของโลก)			
-	Active (ความว่องไว)	1.50	0.90
-	At-Rest (ส่วนประกอบที่เหลือ)	1.35	0.90

ประเภทของน้ำหนัก ชนิดของฐานราก และวิธีที่ใช้คำนวณปรับลด	ตัวประกอบกำลัง	
	มากที่สุด	น้อยที่สุด
- AEP for anchored walls (AEP สำหรับผนังยึด)	1.35	N/A
EL: Locked-in Construction Stresses (ความเค้นของการก่อสร้างที่ถูกยึดไว้)	1.00	1.00
EV : Vertical Earth Pressure (แรงดันในแนวตั้งของโลก)		
- Overall Stability (เสถียรภาพโดยรวม)	1.00	N/A
- Retaining Walls and Abutments (กำแพงและส่วนที่ยึด)	1.35	1.00
- Rigid Buried Structure (โครงสร้างที่ฝังแน่นแข็ง)	1.30	0.90
- Rigid Frames (เฟรมแข็ง)	1.35	0.90
- โครงสร้างฝังแบบยึดหยุ่นได้นอกเหนือจากกรอบกล่องโลหะ	1.95	0.90
- กล่องโลหะยึดหยุ่นและคานพื้นผิว	1.50	0.90
ES: Earth Surcharge (แรงส่วนเกินของโลก)	1.50	0.75

ที่มา: AASHTO LRFD2010. หน้า 58

2.8.2 สัมประสิทธิ์ปรับการตอบสนอง (Response Modification Factor)

ตัวประกอบปรับผลตอบสนองเป็นการปรับค่าการออกแบบโครงสร้างตามความสำคัญของแต่ละสะพานตามการใช้งานสะพานที่มีความสำคัญมากจะมีค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองน้อย ส่วนสะพานทั่วไปจะมีค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองมาก

สัมประสิทธิ์ปรับการตอบสนองตามมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2010 ให้ใช้ค่าดังตารางที่แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.7 สัมประสิทธิ์ปรับการตอบสนอง (R) สำหรับวิธีที่ 3

ประเภทโครงสร้างส่วนล่าง (Wall Type Piers)	ลำดับความสำคัญของสะพาน		
	สะพานที่สำคัญที่สุด	สะพานสำคัญ	สะพานทั่วไป
ตอม่อแบบกำแพงด้านแกนแข็ง (Wall Type Piers)	(Critical Bridges) 1.5	(Essential Bridges) 1.5	(Other Bridges) 2.0
ตอม่อตบเสาเข็ม (Reinforced Concrete Pile Bents) ก.เสาเข็มตอกในแนวตั้ง (Vertical Pile Only)	1.5	2.0	3.0

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

ที่มา: คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวปี2559. หน้า9

2.8.3 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ (S_a)

เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวอาคารต่าง ๆ จะมีการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก คือ คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร และปัจจัยประกอบอื่น ๆ ดังนั้นผลตอบสนองของอาคารจึงแสดงในรูปของ “ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม” ซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามคาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (Maximum Considered Earthquake) ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ($S_{0.2}$) และ คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ณ อำเภอและจังหวัดต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย ยกเว้นในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯที่มีลักษณะดินอ่อนเป็นพิเศษ ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.8 2.9 และ 2.10

ค่าความเร่งตอบสนองที่แสดงในตารางข้างต้น ได้มาจากการวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวโดย สมมติให้สภาพชั้นดินในทุกๆพื้นที่เป็นแบบดินแข็งหรือหิน ที่มีความเร็วคลื่นเฉือน v_s โดยเฉลี่ยในช่วงจากผิวดินถึงความลึก 30 เมตร เท่ากับ 760 เมตรต่อวินาที

ในกรณีของพื้นที่แห่งกรุงเทพ ผลตอบสนองของอาคารได้ถูกแสดงในรูปของ ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ซึ่งได้รวมผลเนื่องจากสภาพดินอ่อนในพื้นที่นี้เข้าไปแล้ว และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้โดยตรง

ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 1302 ที่ใช้ร่วมกับการออกแบบคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกระทรวงคมนาคม

ตารางที่ 2.8 แสดงความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบ 0.2 วินาที (S_s) และ ที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่จังหวัดกาญจนบุรี

จังหวัด	อำเภอ	ความเร่งตอบสนอง (g)	
		S_s	S_1
กาญจนบุรี	ด่านมะขามเตี้ย	0.876	0.253
	ทองผาภูมิ	0.689	0.199
	ท่าม่วง	0.826	0.238
	ท่ามะกา	0.475	0.138
	ไทรโยค	0.698	0.202
	บ่อพลอย	0.593	0.172
	พนมทวน	0.429	0.127
	เมืองกาญจนบุรี	0.704	0.205
	เลาขวัญ	0.435	0.128
	ศรีสวัสดิ์	0.673	0.195
	สังขละบุรี	0.777	0.233
	หนองปรือ	0.595	0.171
	ห้วยกระเจา	0.491	0.144

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 10

ตารางที่ 2.9 แสดงความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบ 0.2 วินาที (S_s) และ ที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่จังหวัดเชียงราย

จังหวัด	อำเภอ	ความเร่งตอบสนอง (g)	
		S_s	S_1
เชียงราย	กิ่งอำเภอดอยหลวง	0.924	0.270
	กิ่งอำเภอเวียงเชียงรุ้ง	0.833	0.241
	ขุนตาล	0.650	0.169
	เชียงของ	0.706	0.191
	เชียงแสน	0.935	0.273
	เทิง	0.619	0.157
	ป่าแดด	0.618	0.154
	พญาเม็งราย	0.672	0.180
	พาน	0.656	0.173
	เมืองเชียงราย	0.798	0.232
	แม่จัน	0.940	0.278
	แม่ฟ้าหลวง	0.929	0.275
	แม่ลาว	0.735	0.211

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 11

ตารางที่ 2.10 แสดงความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบ 0.2 วินาที (S_s) และ ที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่จังหวัดกำแพงเพชร

จังหวัด	อำเภอ	ความเร่งตอบสนอง (g)	
		S_s	S_1
กำแพงเพชร	กิ่งอำเภอโกสัมพีนคร	0.479	0.131
	กิ่งอำเภอบึงสามัคคี	0.219	0.074
	ขาณุวรลักษบุรี	0.374	0.105
	คลองขลุง	0.345	0.102
	คลองลาน	0.499	0.144
	ทรายทองวัฒนา	0.266	0.085

จังหวัด	อำเภอ	ความเร่งตอบสนอง (g)	
		S_s	S_1
กำแพงเพชร	ไทรงาม	0.266	0.083
	ปางศิลาทอง	0.493	0.141
	พรานกระต่าย	0.445	0.115
	เมืองกำแพงเพชร	0.448	0.120
	ลานกระบือ	0.341	0.093

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 10

2.8.4 การปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

จัดทำโดยกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 1302 ระบุว่าค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ณ บริเวณที่ตั้งของอาคาร สามารถปรับแก้ค่าให้เหมาะสมกับประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (2-10)$$

และ

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2-11)$$

โดยที่	S_{MS}	คือ	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)
	S_{M1}	คือ	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)
	S_s	คือ	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมจากแผนที่ความเสี่ยงภัยที่คาบการสั่น 0.2 วินาที หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก หน่วยเป็น g
	S_1	คือ	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมจากแผนที่ความเสี่ยงภัยที่คาบการสั่น 1.0 วินาที หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก หน่วยเป็น g
	F_a	คือ	สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 2.11

F_v คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 1 วินาที
 ดังแสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร F_a

ประเภทชั้นดิน	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุด ที่พิจารณาที่คาบ 0.2 วินาที (g)				
	$S_s \leq 1.0$	$S_s = 0.2$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณีๆ ไป				

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 22

ตารางที่ 2.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร F_v

ประเภทชั้นดิน	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุด ที่พิจารณาที่คาบ 0.2 วินาที (g)				
	$S_1 \leq 1.0$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณี ๆ ไป				

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 22

2.8.5 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ

จัดทำโดยกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง1302 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_{DS}) และที่คาบการสั่น1 วินาที (S_{D1}) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2-12)$$

และ

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2-13)$$

2.8.6 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบ

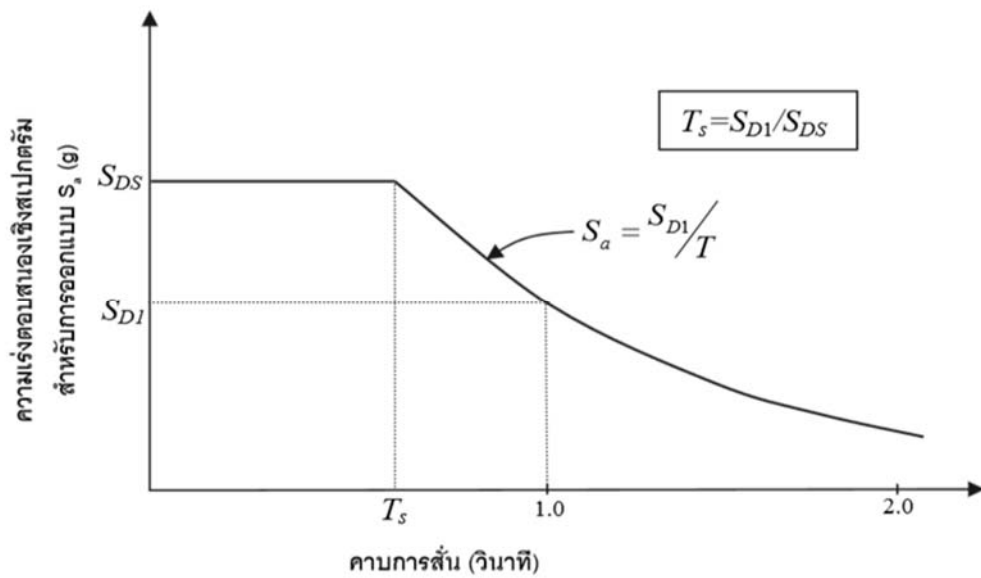
จัดทำโดยกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 1302ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ (ในหน่วยความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก, g) ขึ้นกับวิธีการออกแบบว่าใช้วิธีแรงสถิตเทียบเท่าหรือวิธีเชิงพลศาสตร์ และขึ้นกับตำแหน่ง ณ ที่ตั้งของอาคารดังนี้

1.) พื้นที่ทั่วประเทศยกเว้นแอ่งกรุงเทพมหานคร

พื้นที่ยกเว้นแอ่งกรุงเทพมหานคร พื้นที่นี้ได้แก่พื้นที่ในต่างจังหวัด ดังตารางที่ 2.8 2.9 และ 2.10 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ในพื้นที่ต่างจังหวัดขึ้นกับวิธีการออกแบบดังนี้

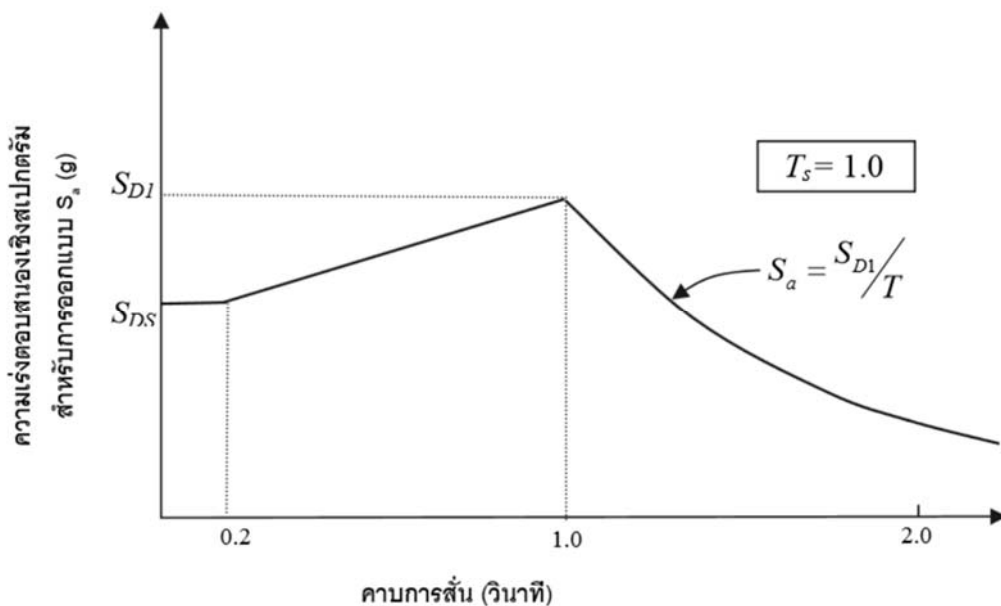
(1) ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ สำหรับวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ใช้ตามรูปที่ 2.10 สำหรับพื้นที่ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$ และให้ใช้ตามรูปที่ 2.11 สำหรับพื้นที่ที่มีค่า $S_{D1} > S_{DS}$ โดยที่ S_{DS} และ S_{D1} คือค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบตามหัวข้อ 2.9.6

(2) ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ให้ใช้ตามรูปที่ 2.12 สำหรับพื้นที่ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$ และให้ใช้ตามรูปที่ 2.13สำหรับพื้นที่ที่มีค่า $S_{D1} > S_{DS}$ โดยที่ S_{DS} และ S_{D1} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบตามหัวข้อ 2.9.6



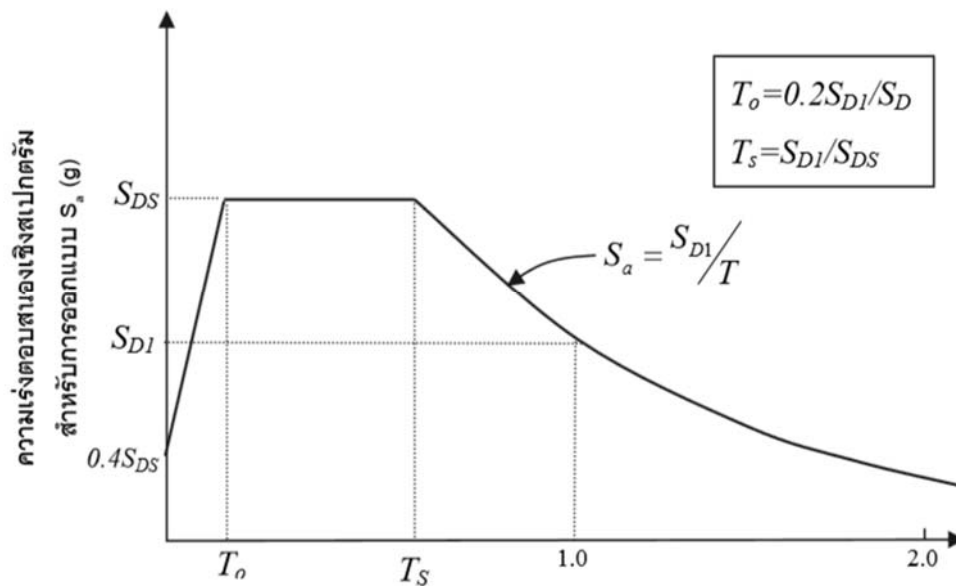
รูปที่ 2.10 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีสถิติเทียบเท่าสำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 23



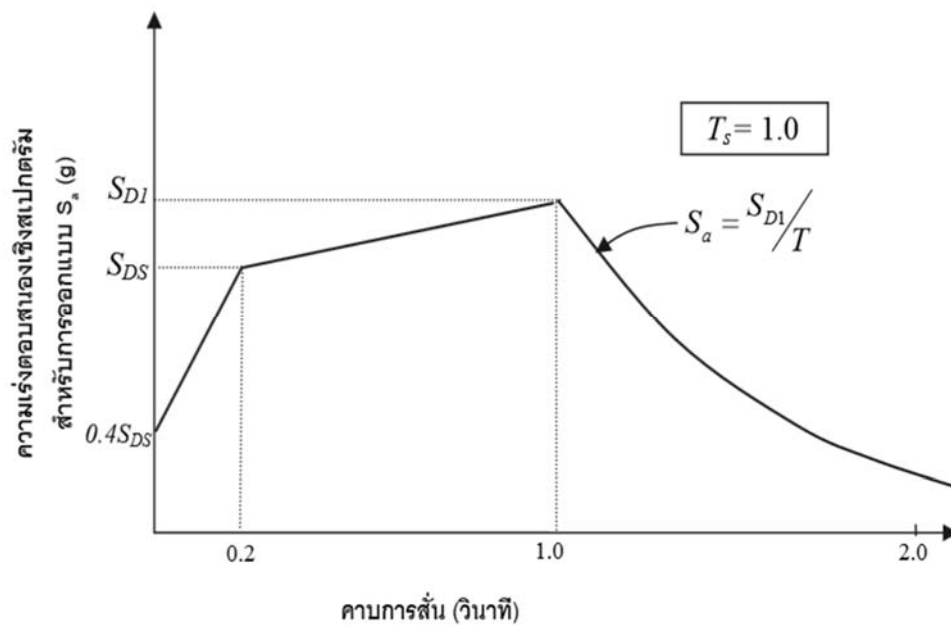
รูปที่ 2.11 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิติเทียบเท่าสำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} > S_{DS}$

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 24



รูปที่ 2.12 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์
สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 24



รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์
สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} > S_{DS}$

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 25

2.) พื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ

พื้นที่ในแอ่งกรุงเทพครอบคลุมกรุงเทพมหานครและจังหวัดปริมณฑลหลายจังหวัด พื้นที่นี้ได้ถูกแบ่งย่อยเป็น 7 โซน ดังรูปที่ 2.14 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่ 7 โซนนี้ขึ้นกับวิธีการออกแบบ ดังนี้

(1) สำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ให้ใช้ตามสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบที่กำหนดในรูปที่ 2.15 หรือใช้ตามค่าที่แสดงในตารางที่ 2.14

(2) สำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ ให้ใช้ตามสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบที่กำหนดในรูปที่ 2.16 หรือใช้ตามค่าที่แสดงในตารางที่ 2.15



รูปที่ 2.14 แผนที่แสดงการแบ่งโซนพื้นที่แอ่งกรุงเทพเพื่อการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 26

ตารางที่ 2.13 แสดงโซนพื้นที่แอ่งกรุงเทพเพื่อการออกแบบ อาคารต้านแรงแผ่นดินไหว

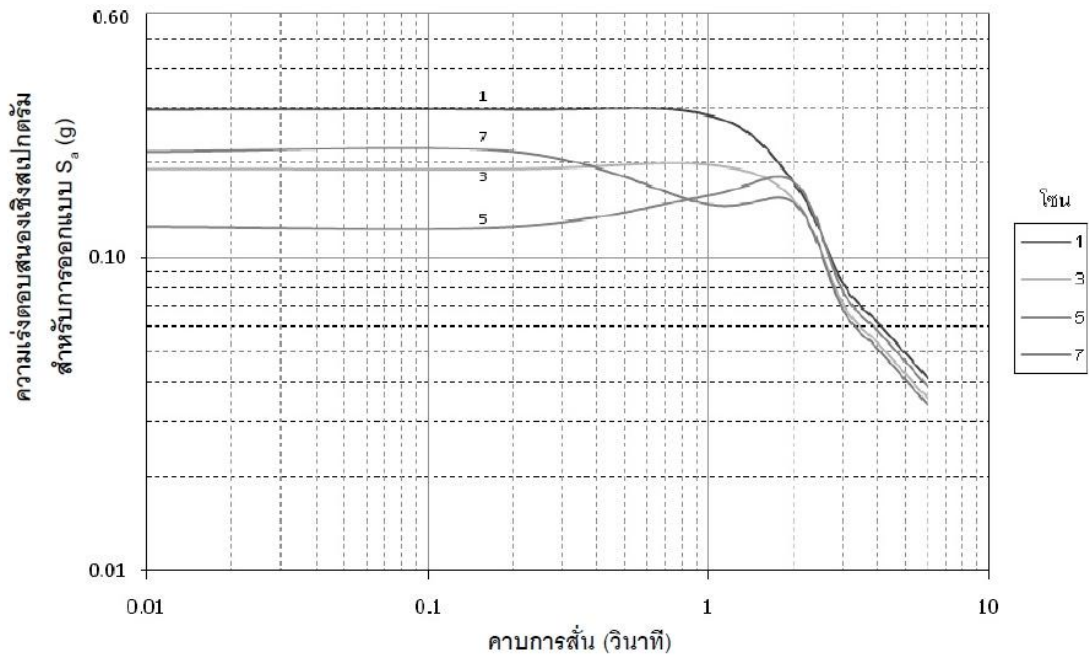
พื้นที่	ขอบเขต	
	จังหวัด	เขต/อำเภอ
1	เพชรบุรี	เขาย้อย
		ดอนตูม
	นครปฐม	บางเลน
		เมืองนครปฐม
		ดำเนินสะดวก
	ราชบุรี	บางแพ
		ปากท่อ
		วัดเพลง
		เมืองราชบุรี
	2	นครปฐม
พุทธมณฑล		
สามพราน		
สมุทรสงคราม		บางคนที
		อัมพวา
		เมืองสมุทรสงคราม
สมุทรสาคร		กระทุ่มแบน
		บ้านแพ้ว
		เมืองสมุทรสาคร
3	พระนครศรีอยุธยา	บางปะอิน
		บางไทร
		ลาดบัวหลวง
		วังน้อย
		อุทัย
		เสนา
4	นครปฐม	นครชัยศรี
		พุทธมณฑล
		สามพราน
	นนทบุรี	บางกรวย

พื้นที่	ขอบเขต	
	จังหวัด	เขต/อำเภอ
4	นนทบุรี	บางบัวทอง
		บางใหญ่
		ปากเกร็ด
		เมืองนนทบุรี
		ไทรน้อย
	ปทุมธานี	ลาดหลุมแก้ว
		สามโคก
		เมืองปทุมธานี
5	กรุงเทพมหานคร	เขตดุสิต
		เขตตลิ่งชัน
		เขตทวีวัฒนา
		เขตทุ่งครุ
		เขตบางกอกน้อย
		เขตบางกอกใหญ่
		เขตบางกะปิ
		เขตบางขุนเทียน
		เขตบางคอแหลม
		เขตบางซื่อ
		เขตบางนา
		เขตบางบอน
		เขตบางพลัด
		เขตบางรัก
		เขตบางเขน
		เขตบางแค
		เขตปทุมไไทย
		เขตพระนคร
		เขตภาษีเจริญ
		เขตมีนบุรี
เขตคลองสาน		

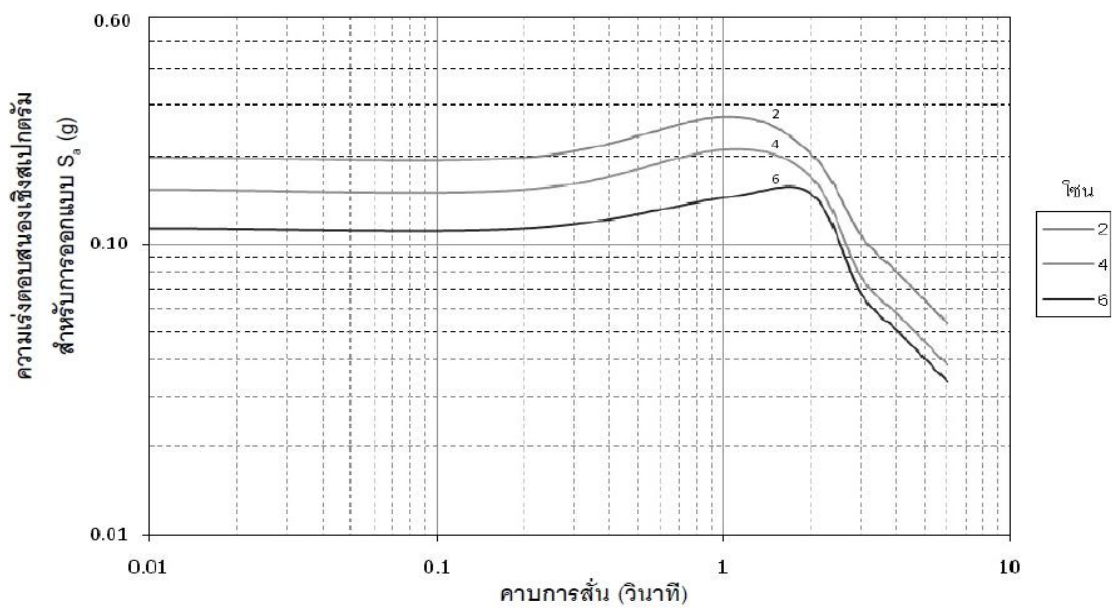
พื้นที่	ขอบเขต	
	จังหวัด	เขต/อำเภอ
5	กรุงเทพมหานคร	เขตคลองสามวา
		เขตคลองเตย
		เขตคันนายาว
		เขตจตุจักร
		เขตจอมทอง
		เขตดอนเมือง
		เขตดินแดง
		เขตบึงกุ่ม
		เขตปทุมวัน
		เขตประเวศ
		เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย
		เขตยานนาวา
		เขตราชเทวี
		เขตราชบุรีบูรณะ
		เขตลาดกระบัง
		เขตลาดพร้าว
		เขตวังทองหลาง
		เขตวัฒนา
		เขตสวนหลวง
		เขตสะพานสูง
		เขตสัมพันธวงศ์
		เขตสาทร
		เขตสายไหม
		เขตหนองจอก
		เขตหนองแขม
		เขตหลักสี่
		เขตห้วยขวาง
	ฉะเชิงเทรา	บางปะกง
	สมุทรปราการ	กิ่งอำเภอบางเสาธง

พื้นที่	ขอบเขต	
	จังหวัด	เขต/อำเภอ
5	สมุทรปราการ	บางบ่อ
		บางพลี
		พระประแดง
		พระสมุทรเจดีย์
		สมุทรปราการ
6	ฉะเชิงเทรา	กิ่งอำเภอคลองเขื่อน
		บางน้ำเปรี้ยว
		บ้านโพธิ์
		ราชสาส์น
		เมืองฉะเชิงเทรา
	นครนายก	บ้านนา
		ปากพลี
		องครักษ์
		เมืองนครนายก
	ปทุมธานี	คลองหลวง
		ธัญบุรี
		ลำลูกกา
		หนองเสือ
	ปราจีนบุรี	บ้านสร้าง
7	ชลบุรี	พานทอง
		เมืองชลบุรี

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 26



(ก) สำหรับโซน 1, 3, 5 และ 7

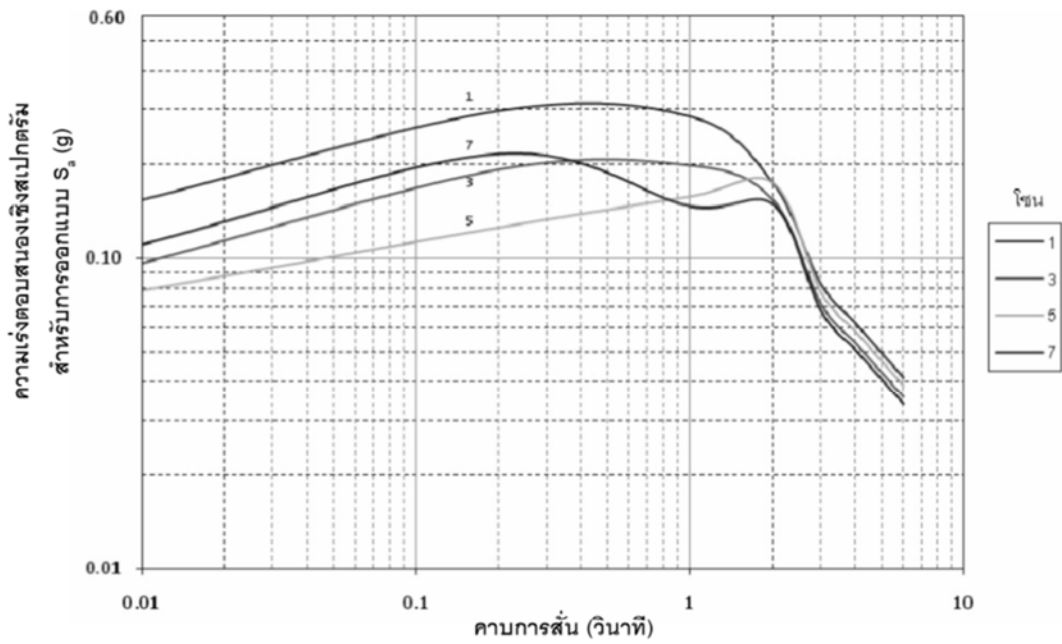


(ข) สำหรับโซน 2, 4 และ 6

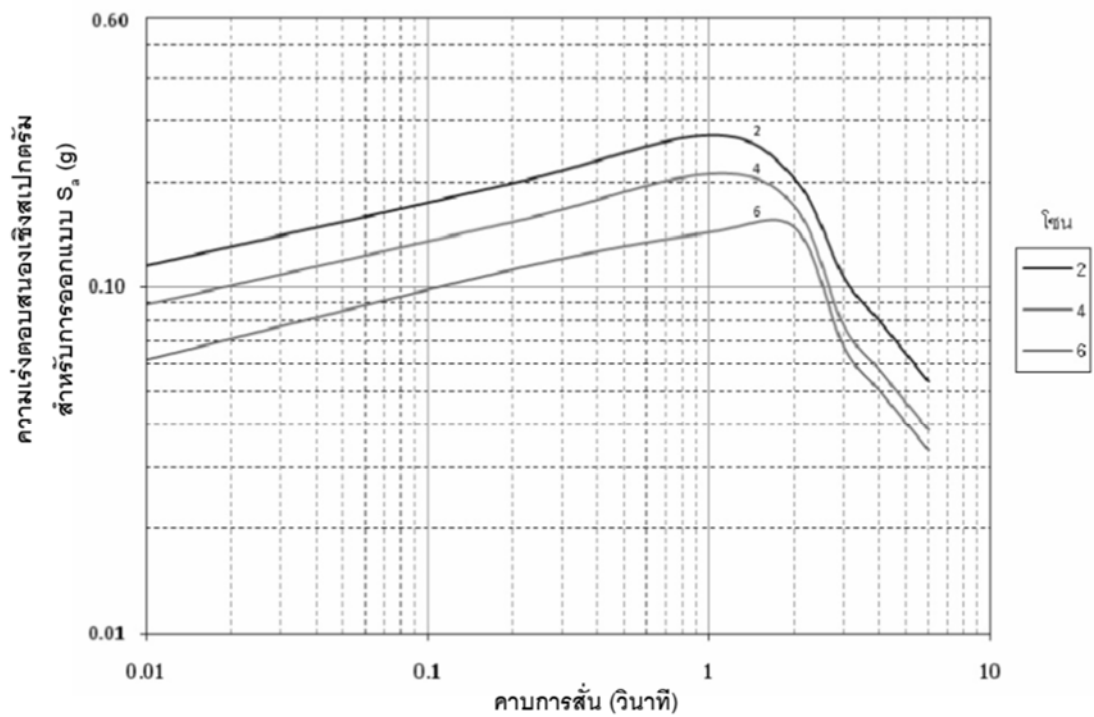
รูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

สำหรับโซนต่าง ๆ ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 27



(ก) สำหรับโซน 1, 3, 5 และ 7



(ข) สำหรับโซน 2, 4 และ 6

รูปที่ 2.16 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์
สำหรับโซนต่าง ๆ ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 28

ตารางที่ 2.14 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ (หน่วยเป็น g)

พื้นที่	S_a (0.1 s)	S_a (0.2 s)	S_a (1 s)	S_a (2 s)	S_a (3 s)	S_a (4 s)	S_a (5 s)	S_a (6 s)
1	0.297	0.297	0.284	0.174	0.083	0.062	0.050	0.041
2	0.199	0.199	0.274	0.205	0.107	0.082	0.064	0.054
3	0.192	0.192	0.198	0.154	0.071	0.053	0.043	0.036
4	0.154	0.154	0.211	0.170	0.077	0.058	0.046	0.039
5	0.126	0.126	0.158	0.174	0.078	0.058	0.047	0.039
6	0.113	0.113	0.144	0.149	0.067	0.050	0.040	0.034
7	0.217	0.217	0.147	0.149	0.068	0.051	0.041	0.034

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 29

ตารางที่ 2.15 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์สำหรับ พื้นที่ในโซนต่าง ๆ ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ (หน่วยเป็น g)

พื้นที่	S_a (0.01 s)	S_a (0.2 s)	S_a (1 s)	S_a (2 s)	S_a (3 s)	S_a (4 s)	S_a (5 s)	S_a (6 s)
1	0.154	0.297	0.284	0.174	0.083	0.062	0.050	0.041
2	0.116	0.199	0.274	0.205	0.107	0.080	0.064	0.054
3	0.097	0.192	0.198	0.154	0.071	0.053	0.043	0.036
4	0.089	0.154	0.211	0.170	0.077	0.058	0.046	0.039
5	0.079	0.126	0.158	0.174	0.078	0.058	0.047	0.039
6	0.062	0.113	0.144	0.149	0.067	0.050	0.040	0.034
7	0.111	0.217	0.147	0.149	0.068	0.051	0.041	0.034

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 29

2.8.7 ประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร

จัดทำโดยกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 1302 ระบุสภาพของชั้นดินบริเวณที่ตั้งของอาคารสามารถเปลี่ยนแปลงระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวได้ ดังนั้นการนำค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมมาใช้ในการออกแบบ จึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่าให้เหมาะสมกับสภาพดิน ณ บริเวณที่ตั้งของอาคารนั้น ๆ ประเภทของชั้นดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภท คือ A (หินแข็ง) B (หิน) C (ดินแข็ง) D (ดินปกติ) E (ดินอ่อน) และ F (ดินที่มีลักษณะพิเศษ) โดยเกณฑ์การจัดแบ่งประเภทของชั้นดินในกรณีที่ไม่มีความถี่ดิน และไม่สามารถทำการสำรวจดินได้ ให้สมมุติว่าประเภทของชั้นดินเป็น แบบประเภท D (ดินปกติ)

ตารางที่ 2.16 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของชั้นดินแต่ละประเภท

ประเภทชั้นดิน	\bar{v}_s	\bar{N} หรือ \bar{N}_{ch}	\bar{S}_u
A	>1500 เมตร/วินาที	-	-
B	750 - 1500 เมตร/วินาที	-	-
C	360 - 750 เมตร/วินาที	>50	>100 กิโลปาสกาล
D	180 - 360 เมตร/วินาที	15 - 50	50 - 100 กิโลปาสกาล
E	< 180 เมตร/วินาที	< 15	< 50 กิโลปาสกาล
	มีชั้นดินที่มีความหนามากกว่า 3 เมตร ที่มีคุณสมบัติดังนี้ ค่าความชื้นในสถานภาพพลาสติกของดิน (PI) > 20 ค่าความชื้น (w) > 40% $\bar{S}_u < 25$ กิโลปาสกาล		
F	เกณฑ์ตามที่กำหนด ด้านล่าง		

ที่มา: มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว-1302. หน้า 85

ชั้นดินที่มีลักษณะต่อไปนี้ ให้จัดเป็นชั้นดินประเภท F และต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินต่อคลื่นการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

- (1) ชั้นดินมีโอกาสสวิตติภายใต้แผ่นดินไหว เช่น ดินที่สามารถเกิดการเหลวตัว (Liquefaction) หรือ ดินเหนียวที่อ่อนมาก เป็นต้น
- (2) ชั้นดินเหนียวที่วัตุอินทรีย์อยู่มาก และมีความหนามากกว่า 3 เมตร
- (3) ชั้นดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง (มีความหนามากกว่า 7.6 เมตรและมีค่า PI มากกว่า 75)

(4) ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางที่หนามาก (มีความหนามากกว่า 37 เมตรและมีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ S_u น้อยกว่า 50 กิโลปาสคาล)

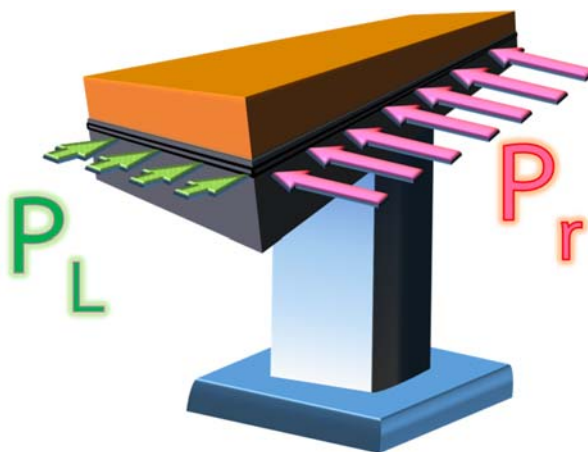
2.9 การรวมผลของแรง

2.9.1 การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวจากทิศทางต่าง ๆ

การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวในทิศทางต่าง ๆ ที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานให้ดำเนินการดังนี้

1. ทิศทางของแรงแผ่นดินไหวที่พิจารณาการออกแบบต้องทำให้เกิดผลที่วิกฤตที่สุด
2. การรวมแรงในทิศทางที่ตั้งฉากกัน เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีแรงด้านข้างเทียบเท่า หรือ วิธีสเปกตรัมการตอบสนองเชิงโหมต โดยให้รวมผลของแรงโดยใช้ 100 เปอร์เซ็นต์ ของผลจากแรงในทิศทางหนึ่งกับ 30 เปอร์เซ็นต์ ของผลจากแรงในทิศทางที่ตั้งฉากกัน

การรวมแรงนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างหนึ่งต่อการคำนวณในการออกแบบโครงสร้างจาก American Association of State Highway and Transportation Officials Standard 2002 ต้องคิดผลของแรงกระทำใน 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน

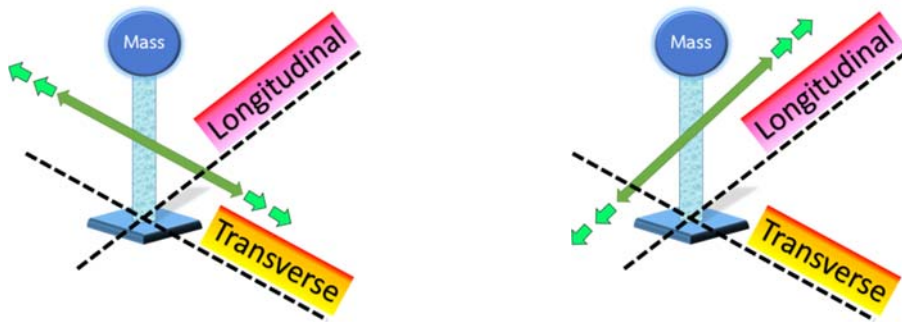


รูปที่ 2.17 ภาพแสดงแนวแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง

เนื่องจากความไม่แน่นอนของทิศทางของแรงแผ่นดินไหว จึงต้องพิจารณาแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างในทุกทิศทาง แต่เพื่อความสะดวก AASHTO แนะนำให้พิจารณาการรวมแรงที่กระทำตั้งฉากกันในแนวราบ และเลือกผลรวมในรูปแบบที่ก่อให้เกิดผลที่รุนแรงที่สุด โดยรูปแบบแนะนำดังตารางที่ 2.17 ซึ่งแสดงถึงการออกแบบตามแนวแรง

ตารางที่ 2.17 แสดงการออกแบบแรงตามแนวแรง

แนวแรง	แรงออกแบบ
แรงออกแบบตามยาว	$EQ_L = V_L + 0.3V_T$
แรงออกแบบตามขวาง	$EQ_L = V_T + 0.3V_L$



รูปที่ 2.18 แสดงแนวแรงในทิศตามยาวและตามขวาง

2.9.2 การรวมผลของแรงกตที่กระทำต่อโครงสร้าง

สำหรับแรงที่สภาวะประลัยตามมาตรฐาน AASHTO 2002 กำหนดให้นำแรงที่ใช้ในการออกแบบคูณกับ 1.3 ซึ่งจะแบ่งคิดตามแกนทั้งตามขวางและตามยาว ดังสมการ

$$P_u = 1.3EQ \quad (2-14)$$

สำหรับแรงที่สภาวะประลัยตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2010 กำหนดให้นำแรงที่ใช้ในการออกแบบโดยมีการรวมแรงที่เกิดขึ้นตามสมการดังนี้

- ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักมากที่สุด

$$\text{Maximum } U_1 = 1.25DC + 1.5DW + \gamma(LL + IM) \quad (2-15)$$

- ตัวคูณเพิ่มลดน้ำหนักคงที่น้อยที่สุด

$$\text{Maximum } U_1 = 0.9DC + 0.65DW + \gamma(LL + IM) \quad (2-16)$$

โดยที่	DC	คือ	น้ำหนักคงที่ หน่วย กิโลนิวตัน
	DW	คือ	น้ำหนักวัสดุเททับหน้า หน่วย กิโลนิวตัน
	LL	คือ	น้ำหนักจร หน่วย กิโลนิวตัน
	IM	คือ	แรงกระแทก หน่วย กิโลนิวตัน
	γ	คือ	แฟคเตอร์ตัวคูณกับแรงในกลุ่มน้ำหนักจร

2.10 การวิเคราะห์การเสริมเหล็ก

จากการออกแบบวิเคราะห์โครงสร้างพบว่าแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้าง มีมากเกินไปที่ก้ำกัรับแรงเฉือนของคอนกรีตรับได้ จำเป็นต้องมีการเสริมเหล็ก เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างขึ้น

2.10.1 วิธี 1 วิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างแบบคงที่ (6%)

ในการเสริมเหล็กของวิธีที่หนึ่งจะใช้หลักการของการเสริมเหล็กในคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการคำนวณหาค่าแรงเฉือนประลัยจากมาตรฐานของ AASHTO 1973 จะได้ค่าแรงเฉือนประลัยที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวดังสมการ

$$V_u = \gamma_1 EQ \quad (2-17)$$

โดยที่ V_u คือ แรงเฉือนประลัยที่ใช้คือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหว หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

ขั้นตอนที่ 2 ทำการคำนวณแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตได้จากสมการ

$$V_c = 0.17(1 + \frac{P_u}{14A_g})\sqrt{f'_c} b_w d \quad (2-18)$$

โดยที่ P_e คือ แรงกดที่กระทำต่อโครงสร้าง หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของเสา หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดประลัยอิฐผล หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 3 ทำการคำนวณหาค่าแรงเฉือนที่ต้านด้วยแรงของเหล็กที่ตั้งได้จากสมการ

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2-19)$$

โดยที่ V_n คือ แรงเฉือนที่หน้าตัดรับได้ หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

V_s คือ แรงเฉือนในเหล็ก หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

V_c คือ แรงเฉือนในคอนกรีต หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบค่าของแรงเฉือนที่กระทำต่อเหล็ก

กรณีที่ 1 : เมื่อ $V_s \leq 0.5\phi V_c$ ไม่ต้องทำการเสริมเหล็กที่ตั้งรับแรงเฉือน

กรณีที่ 2 : เมื่อ $V_s \leq \phi V_c$ ต้องทำการเสริมเหล็กที่ตั้งรับแรงเฉือนที่น้อยที่สุด

กรณีที่ 3 : เมื่อ $V_s > \phi V_c$ ต้องทำการเสริมเหล็กที่ตั้งรับแรงเฉือน

ขั้นตอนที่ 5 นำค่า V_s มาเปรียบเทียบกับข้อกำหนดการรับแรงเฉือนโดยเหล็กดัดรับแรงเฉือนพร้อมทั้งข้อกำหนดที่ยอมให้ของการเสริมเหล็กดัดซึ่งมีข้อกำหนดดังนี้

ข้อกำหนดข้อที่ 1 : แรงเฉือนที่ยอมให้ของการเสริมเหล็กดัดขั้นต่ำคำนวณได้จากสมการ

$$0.33\sqrt{f_c'}b_wd \quad (2-20)$$

โดยที่ f_c' คือ กำลังรับแรงกดประลัยของคอนกรีต หน่วยเป็น เมกะปาสคาล
 b_w คือ ความกว้างของหน้าตัด หน่วยเป็น มิลลิเมตร
 d คือ ความลึกประสิทธิผลจากผิวรับแรงอัดจนถึงเหล็กรับแรงดึง หน่วยเป็น มิลลิเมตร

ข้อกำหนดข้อที่ 2 : แรงเฉือนที่ยอมให้ของการเสริมเหล็กดัดรับแรงเฉือนที่มากที่สุดคำนวณได้จากสมการ

$$0.66\sqrt{f_c'}b_wd \quad (2-21)$$

โดยที่ f_c' คือ กำลังรับแรงกดประลัยของคอนกรีต หน่วยเป็น เมกะปาสคาล
 b_w คือ ความกว้างของหน้าตัด หน่วยเป็น มิลลิเมตร
 d คือ ความลึกประสิทธิผลจากผิวรับแรงอัดจนถึงเหล็กรับแรงดึง หน่วยเป็น มิลลิเมตร

กรณีที่ 1 : เมื่อ $V_s \leq 0.33\sqrt{f_c'}b_wd$ จะได้ระยะเรียง

$$s = \min\left\{\frac{A_v F_{yh}}{0.35b_w}, 0.5d, 600\right\} \quad \text{มิลลิเมตร}$$

กรณีที่ 2 : เมื่อ $0.33\sqrt{f_c'}b_wd < V < 0.66\sqrt{f_c'}b_wd$ จะได้ระยะเรียง

$$s = \min\left\{\frac{A_v F_{yh} d}{V_s}, \frac{A_v F_{yh}}{0.35b_w}, 0.25d, 300\right\} \quad \text{มิลลิเมตร}$$

2.10.2 วิธี 2 วิธีเปิดแผนกที่เสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหว ของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วินิชชัยร่วมกับ AASHTO Standard 2002

ในวิธีที่ 2 ทำการเสริมเหล็กตามมาตรฐาน AASHTO 2002 กรณีเสาเดี่ยวได้ตั้งขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่า Over Strength Moment Capacity ได้จากสมการ

$$M_u \leq \phi M_n \quad (2-22)$$

โดยที่ ϕ คือ ค่า Strength Reduction Factor โดย AASHTO ระบุให้สำหรับสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าเท่ากับ 1.3

M_n คือ ค่าโมเมนต์ที่หน้าตัดรับได้ หน่วยเป็น กิโลนิวตัน*เมตร

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่าแรงเฉือนที่ทำให้โครงสร้างประลัยจากสมการ

$$V_u = \frac{M_n}{L} \quad (2-23)$$

โดยที่ L คือ ความสูงของเสา หน่วยเป็น เมตร

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตได้จากสมการ

$$V_c = 0.17 \left(1 + \frac{P_u}{14A_g}\right) \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2-24)$$

โดยที่ P_e คือ แรงกดที่กระทำต่อโครงสร้าง หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณแรงเฉือนที่ยอมให้ของเหล็ก

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2-25)$$

โดยที่ ϕ คือ ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (0.85)

V_c คือ แรงเฉือนในคอนกรีต หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

ขั้นตอนที่ 5 นำค่า V_s มาเปรียบเทียบกับข้อกำหนดการรับแรงเฉือนโดยเหล็กดัดรับแรงเฉือนพร้อมทั้งข้อกำหนดที่ยอมให้ของการเสริมเหล็กดัดซึ่งมีข้อกำหนดดังนี้

ข้อกำหนดข้อที่ 1 : แรงเฉือนที่ยอมให้ของการเสริมเหล็กดัดยกเว้นค่าคำนวณได้จากสมการ

$$0.33 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2-26)$$

โดยที่ f'_c คือ กำลังรับแรงกดประลัยของคอนกรีต หน่วยเป็น เมกะปาสกาล

b_w คือ ความกว้างของหน้าตัด หน่วยเป็น มิลลิเมตร

d คือ ความลึกประสิทธิภาพจากผิวรับแรงอัดจนถึงเหล็กรับแรงดึง หน่วยเป็น มิลลิเมตร

ข้อกำหนดข้อที่ 2 : แรงเฉือนที่ยอมให้ของการเสริมเหล็กที่ตั้งรับแรงเฉือนที่มากที่สุดคำนวณได้

จากสมการ

$$0.66\sqrt{f_c'}b_wd \quad (2-27)$$

โดยที่ f_c' คือ กำลังรับแรงกดประลัยของคอนกรีต หน่วยเป็น เมกกะปาสคาล
 b_w คือ ความกว้างของหน้าตัด หน่วยเป็น มิลลิเมตร
 d คือ ความลึกประสิทธิผลจากผิวรับแรงอัดจนถึงเหล็กรับแรงดึง หน่วยเป็น มิลลิเมตร

กรณีที่ 1 : เมื่อ $V_s \leq 0.33\sqrt{f_c'}b_wd$ จะได้ระยะเรียง

$$s = \min\left\{\frac{A_v f_{yh}}{0.35b_w}, 0.5d, 600\right\} \quad \text{มิลลิเมตร}$$

กรณีที่ 2 : เมื่อ $0.33\sqrt{f_c'}b_wd < V_s < 0.66\sqrt{f_c'}b_wd$ จะได้ระยะเรียง

$$s = \min\left\{\frac{A_v f_{yh} d}{V_s}, \frac{A_v f_{yh}}{0.35b_w}, 0.25d, 300\right\} \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ซึ่งระยะเรียงที่ได้นี้เป็นระยะเรียงที่บริเวณกลางเสา

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณความสูงช่วงจุดหมุนพลาสติกของเสาโดยเลือกค่ามากระหว่างสมการ

$$L_e = \max\left\{\frac{h_c}{6}, H\right\} \quad (2-28)$$

โดยที่ h_c คือ ความสูงของเสาถึงศูนย์กลางของโครงสร้าง หน่วยเป็น มิลลิเมตร

H คือ ด้านยาวของหน้าตัดของเสา หน่วยเป็น มิลลิเมตร

L_c คือ ความสูงของเสาช่วงปลายของเสา หน่วยเป็น มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาระยะเรียงของเหล็กที่ตั้งช่วงจุดหมุนพลาสติกของเสา สำหรับเสาที่จัดอยู่ในพื้นที่

อยู่ในโซน C และ D ตามมาตรฐาน AASHTO 2002

$$S = \min\left\{\frac{A_{sh}}{0.3h_c \frac{f_c'}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right)}, \frac{A_{sh}}{0.12h_c \frac{f_c'}{f_{yh}}}, 100\right\} \quad (2-29)$$

โดยที่ A_{sh} คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กที่ตั้งทั้งหมด หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร

A_c	คือ	พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร
b_w	คือ	ความกว้างของหน้าตัด หน่วยเป็น มิลลิเมตร
S	คือ	ระยะเรียง หน่วยเป็น มิลลิเมตร

2.10.3 วิธี 3 เปิดคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงปี

พ.ศ.2559

ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ อันได้แก่

1.1 คาบแผ่นดินไหวและระดับภัยแผ่นดินไหว

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

ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Acceleration Response Spectrum) สำหรับการออกแบบที่ใช้ประกอบการคำนวณหาค่าแรงในโครงสร้างสะพานในประเทศไทยให้อ้างอิงมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย พ.ศ.2552 (มยผ.1302-52) โดยมาตรฐานดังกล่าวได้ระบุความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบไว้แล้ว สำหรับการประมาณหาค่าของคาบการสั่นและวิธีการวิเคราะห์และออกแบบรวมทั้งการให้รายละเอียดความเหนียวของสะพานตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวของกระทรวงคมนาคม

1.2 ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว (Seismic Ground Motion Values)

โครงสร้างสะพานเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวจะมีผลตอบสนองที่แตกต่างกัน โดยจะขึ้นกับคาบธรรมชาติของโครงสร้าง แรงกระทำจะนำเสนอในรูปของค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม สำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ขึ้นอยู่กับคาบธรรมชาติของโครงสร้างสอดคล้องกับ มยผ. 1302-52

โดยใช้ค่า S_{DI} ซึ่งเป็นค่าของผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของสะพานที่ใช้ในการออกแบบที่คาบการสั่นเท่ากับ 1.0 วินาที และ S_{DS} เป็นค่าของผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของสะพานที่ใช้ในการออกแบบที่คาบการสั่นเท่ากับ 0.2 วินาที

1.3 เลือกประเภทของสะพาน และความสำคัญของสะพานและประเภทของสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหว ซึ่งคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงนี้ได้จำแนกประเภทของสะพาน และความสำคัญของสะพานรวมทั้งประเภทของสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหวอันได้แก่ สะพานที่สำคัญที่สุด (Critical Bridges) สะพานสำคัญ (Essential Bridges) และสะพานทั่วไป (Other Bridges)

ทั้งนี้ประเภทของสมรรถนะด้านทางแรงแผ่นดินไหวของสะพานขึ้นกับผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมโดยจำแนกไว้ดังตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.18 แสดงประเภทสมรรถนะด้านแรงแผ่นดินไหวที่สัมพันธ์กับผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 1302

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

ที่มา: คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวปี 2559. หน้า 5

ตารางที่ 2.19 แสดงค่าสมรรถนะด้านแรงแผ่นดินไหวที่สัมพันธ์กับผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของมาตรฐาน AASHTO

Acceleration Coefficient , S_{DI}	Seismic Zone
$S_{DI} \leq 0.15$	1
$0.15 < S_{DI} \leq 0.30$	2
$0.30 < S_{DI} \leq 0.50$	3
$0.50 < S_{DI}$	4

ที่มา: AAHSTO 1669

โดยเพื่อให้เหมาะสมกับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวในประเทศไทย ประเภทของสมรรถนะด้านทานแรงแผ่นดินไหวของสะพานได้ปรับใช้เพียง 3 ระดับดังแสดงในตารางข้างต้น โดยสะพานที่มีค่า

ของผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมอยู่ในช่วงของสมรรถนะด้านทานแรงแผ่นดินไหวใด จะต้องออกแบบและวิเคราะห์ รวมทั้งให้รายละเอียดความเหนียวให้เหมาะสมตามประเภทของสมรรถนะนั้น โดยวิธีวิเคราะห์และออกแบบ

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบโครงสร้างสะพาน

ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างสะพานเพื่อด้านทานแรงแผ่นดินไหวในคู่มือของกระทรวงคมนาคมได้กำหนดไว้ดังนี้

2.1 พิจารณาดำเนินการที่ตั้งสะพานและประเภทของชั้นดิน

2.2 สร้างค่าของสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบสะพาน

2.3 กำหนดประเภทของสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหวของสะพาน โดยมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

2.3.1 พื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 1

สะพานที่อยู่ในพื้นที่แผ่นดินไหวระดับ 1 หรือพื้นที่แผ่นดินไหวระดับต่ำที่ครอบคลุมในหัวข้อนี้มีความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมออกแบบที่คาบการสั่น 1.0 วินาที (S_{d1}) ซึ่งน้อยกว่า 0.15 สำหรับสะพานที่ตั้งอยู่บนพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 1 ที่มี S_{D1} น้อยกว่า 0.10 ให้ผลของแผ่นดินไหวในการคำนวณออกแบบของอาคารต่างๆและอาจละเว้นการออกแบบรอยต่อระหว่างโครงสร้างส่วนบน สำหรับค่า S_{D1} มากกว่าหรือเท่ากับ 0.10 แต่ไม่เกินกว่าหรือเท่ากับ 0.15 ให้ผลของแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหวในการออกแบบของอาคารต่างๆของโครงสร้าง

2.3.2 พื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 2

สะพานที่อยู่ในพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 2 หรือพื้นที่แผ่นดินไหวระดับกลางที่ครอบคลุมในหัวข้อนี้ มี S_{D1} มากกว่า 0.15 แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.30 ข้อกำหนดต่างๆสำหรับสะพานในพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 2 นี้ ให้ใช้ข้อกำหนดในพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 3 ยกเว้นปริมาณเหล็กเสริมตามแนวยาวต้องไม่น้อยกว่า 0.01 แต่ไม่เกิน 0.06 เท่าของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด

2.3.3 พื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 3

สะพานที่อยู่ในพื้นที่แผ่นดินไหวระดับ 3 หรือพื้นที่แผ่นดินไหวระดับสูงที่ครอบคลุมในหัวข้อนี้ มี S_{D1} มากกว่า 0.30 โดยข้อกำหนดของการทำรายละเอียดของเหล็กเสริมของสะพานเพื่อด้านแผ่นดินไหวในพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับ 3 มีข้อกำหนดของการออกแบบเสา คือ ปริมาณเหล็กเสริมตามแนวยาวต้องไม่น้อยกว่า 0.01 แต่ไม่เกินกว่า 0.04 เท่าของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด

2.4 พิจารณาลักษณะของโครงสร้างสะพานและคำนวณตัวประกอบลดผลตอบแทน

2.5 พิจารณาความสำคัญและลักษณะของโครงสร้างสะพานและกำหนดวิธีการวิเคราะห์โครงสร้าง

2.6 คำนวณหาค่าของแรงภายในและค่าของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างโดยที่กำลังดัดสองแกนของเสาต้องไม่น้อยกว่าแรงดัดที่กระทำต่อเสา ทั้งนี้เสาข้างต้นในการตรวจสอบ ณ สภาวะขีดสุด มีตัวประกอบลดกำลังเท่ากับ 0.90 สำหรับเสาปลอกเกลียวและเสาปลอกเดี่ยว

2.7 รวมแรงภายในของสะพานเนื่องจากแผ่นดินไหวในทิศทางตามยาวและตามขวางของสะพาน กำลังดัดสองแกนของเสามีตัวประกอบลดกำลังให้ใช้เท่ากับ 0.90 สำหรับเสาปลอกเกลียว และเสาปลอกเดี่ยวและผลรวมของแรง (Load Combination) ที่พิจารณาตัวคูณเพิ่มค่า (Factored Load) แล้วตามขีดจำกัดอื่น (Other Limit States) มีค่ามากกว่าค่าแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (Extreme Event Limit States) ให้ออกแบบฐานรากของสะพานโดยพิจารณาผลของ ตัวเพิ่มกำลังของวัสดุ Over Strength ของเสาหรือตอม่อที่ใช้ในการคำนวณกำลังของหน้าตัดซึ่งแสดงในตารางที่ 2.20

ตารางที่ 2.20 แสดงค่ากำลังครากของเหล็กและคอนกรีต

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

ที่มา : คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวปี 2559. หน้า 13

2.8 รวมแรงแผ่นดินไหวกับแรงประเภทอื่นๆตามสภาวะขีดจำกัดที่กำหนด

2.9 นำแรงภายในและการเคลื่อนตัวตามสภาวะขีดจำกัดไปทำการออกแบบโครงสร้างสะพาน

2.10 หารายละเอียดการเสริมเหล็กเพิ่มความเหนียวและอุปกรณ์ป้องกันโครงสร้างต่างๆ

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณปริมาณเหล็กเสริมเอกได้จากสมการ

$$M_u = EQ \times L \quad (2-30)$$

โดยที่ M_u คือ โมเมนต์ประลัยที่ได้จากแรงแผ่นดินไหว หน่วยเป็น กิโลนิวตัน*เมตร

EQ คือ แรงแผ่นดินไหว หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

L คือ ความสูงของเสาถึงศูนย์กลางของโครงสร้าง หน่วยเป็น เมตร

$$\phi M_n = 0.9 M_u \quad (2-31)$$

สำหรับวิธี Capacity Design Philosophy ($\phi = 0.9$)

- โดยที่ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังเท่ากับ 0.9
 M_u คือ โมเมนต์จากการออกแบบ หน่วยเป็น กิโลนิวตัน*เมตร
 M_n คือ โมเมนต์ต้านที่หน้าตัดรับได้ หน่วยเป็น กิโลนิวตัน*เมตร

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณแรงเฉือนที่หน้าตัดรับได้จากสมการ

$$V_o = \frac{M_n}{L} \quad (2-32)$$

- โดยที่ M_n คือ โมเมนต์ต้านที่หน้าตัดรับได้ หน่วยเป็น กิโลนิวตัน-เมตร
 L คือ ความสูงของเสาถึงศูนย์กลางของโครงสร้าง หน่วยเป็น เมตร
 EQ คือ แรงจากแผ่นดินไหว หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

และ

$$v_n = 0.25 f'_c b d_v \quad (2-33)$$

- โดยที่ v_n คือ แรงเฉือนที่หน้าตัดรับได้ หน่วยเป็น กิโลนิวตัน
 f'_c คือ กำลังรับแรงกดประลัยของคอนกรีต หน่วยเป็น เมกกะปาสคาล
 b คือ ความกว้างของหน้าตัด หน่วยเป็น มิลลิเมตร
 d_v คือ ระยะจากศูนย์กลางของเหล็กรับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กรับแรงดึง หน่วยเป็น มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาความเครียดในเหล็กจากสมการ

$$\varepsilon_s = \left(\frac{\frac{|M_u|}{d_v} + 0.5 N_u + |V_u - V_p|}{E_s A_s + E_p A_{ps}} \right) \quad (2-34)$$

- โดยที่ M_u คือ โมเมนต์ประลัยที่ได้จากแรงแผ่นดินไหว หน่วยเป็น กิโลนิวตัน*เมตร
 d_v คือ ระยะจากศูนย์กลางของเหล็กรับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กรับแรงดึง หน่วยเป็น เมตร
 N_u คือ แรงกดที่กระทำต่อโครงสร้าง หน่วยเป็น กิโลนิวตัน
 E_s คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก หน่วยเป็น กิโลนิวตัน/ตารางเมตร
 A_s คือ ค่าพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก หน่วยเป็น ตารางเมตร

และ

$$\theta = 29 + (3500\varepsilon_s) \quad (2-35)$$

โดยที่

θ คือ มุมเอียงของคอนกรีตรับแรงอัดในแนวทแยง

ε_s คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก

$$\beta = \frac{4.8}{1 + (750\varepsilon_s)} \quad (3-36)$$

โดยที่

β คือ แฟกเตอร์แสดงความสามารถในการรับแรงดึงในแนวทแยงของคอนกรีต

ε_s คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณแรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้จากสมการ

$$V_c = 0.083\beta(f'_c)^{0.5}b_v d_v \quad (2-37)$$

โดยที่

β คือ ตัวคูณปรับแก้ความลึก

f'_c คือ กำลังรับแรงกดประลัยของคอนกรีต หน่วยเป็น เมกะปาสกาล

b คือ ความกว้างหน้าตัด หน่วยเป็น มิลลิเมตร

d_v คือ ระยะจากศูนย์กลางของเหล็กรับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กรับแรงดึง หน่วยเป็น เมตร

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณแรงเฉือนที่เหล็กรับได้จากสมการ

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2-38)$$

โดยที่

V_c คือ แรงเฉือนโดยคอนกรีต หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

V_u คือ แรงเฉือนประลัยที่ใช้คือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหว หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

ϕ คือ แฟกเตอร์ลดค่า มีค่า 0.9

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณความสูงของเสาช่วงจุดหมุนพลาสติกของเสา

$$L_e = \max\left\{\frac{h_c}{6}, H, 0.45\right\} \quad (2-39)$$

โดยที่

h_c คือ ความสูงของเสาถึงศูนย์กลางของโครงสร้าง หน่วยเป็น มิลลิเมตร

H คือ ด้านยาวของหน้าตัดของเสา หน่วยเป็น มิลลิเมตร

L_c คือ ความสูงของเสาช่วงปลายของเสา หน่วยเป็น มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 9 คำนวณระยะเรียงเหล็กที่ตั้งในช่วงจุดหมุนพลาสติกของเสา

$$S = \min \left\{ \frac{A_{sh}}{0.3h_c \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right)}, \frac{A_{sh}}{0.12h_c \frac{f'_c}{f_{yh}}}, 100 \right\} \quad (2-40)$$

โดยที่ A_{sh} คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กที่ตั้งทั้งหมด หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร

b_w คือ ความกว้างของหน้าตัด หน่วยเป็น มิลลิเมตร

S คือ ระยะเรียง หน่วยเป็น มิลลิเมตร

หรือใช้ระยะเรียงของเหล็กปลอกรัดรอบ (S) ที่แปรผันตามพื้นที่สมรรถนะแผ่นดินไหวดังตารางที่ 2.21

ตารางที่ 2.21 แสดงระยะเรียงของเหล็กที่ตั้งตามพื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหว

พื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหว	ระยะเรียง (มิลลิเมตร.)
1 (สำหรับ $0.10 \leq S_{D1} \leq 0.15$) และ 2A	150
2B และ 3	100

ที่มา : คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวปี 2559. หน้า 32

2.11 กฎกระทรวงที่กำหนดเกี่ยวกับแรงลมที่กระทำต่อองค์อาคาร

กฎกระทรวง ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522

ข้อ 17 ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างอาคาร ให้คำนึงถึงแรงลมด้วย หากจำเป็นต้องคำนวณและไม่มีเอกสารที่รับรองโดยสถาบันที่เชื่อถือได้ให้ใช้หน่วยแรงลม ดังตารางที่ 2.22

ตารางที่ 2.22 แสดงหน่วยแรงลมตามความสูงขององค์อาคาร

ความสูงของอาคารหรือส่วนขององค์อาคาร	หน่วยแรงลมอย่างน้อยกิโลปาสกาล (กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
ส่วนของอาคารที่สูงไม่เกิน 10 เมตร	0.5 (50)
ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	0.8 (80)
ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.2 (120)
ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 40 เมตร	1.6 (160)

ที่มา : <http://www.nsplusengineering.com>

2.12 ข้อกำหนดการคำนวณแรงลมอ้างอิงจาก ASSHTO 2002

แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างเป็นแรงที่กระทำเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกสม่ำเสมอ (Uniformly Distributed Load) มีความเร็วลมจากสมมติฐานเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ยกเว้นแรงลมในกลุ่ม ของการรวมแรงที่ II และ IV อาจปรับเปลี่ยนค่าแรงลมได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วสูงสุดของพื้นที่นั้น

$$\text{ตัวคูณปรับค่าแรงลม} = \left(\frac{V_D}{V_B} \right)^2 \quad (2-41)$$

โดย V_D คือ ความเร็วลมที่ทำการออกแบบ หน่วยเป็น เมตรต่อวินาที
 V_B คือ ความเร็วลมพื้นฐาน หน่วยเป็น เมตรต่อวินาที ซึ่งปกติจะพิจารณาจากการใช้ความเร็ว 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตร

2.12.1 แรงลมต่อโครงสร้างส่วนบน (กระทำทั้งสองทิศทางพร้อมกัน)

2.12.1.1 แรงลมตามขวาง

สำหรับโครงสร้าง Truss และ Arch = 3.60 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

สำหรับโครงสร้าง คาน = 2.40 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

2.12.1.2 แรงลมตามยาว

จะมีแรงลมที่กระทำในแนวตามยาว = 0.57 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

2.12.2 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure)

แรงลมตามขวางที่กระทำนั้น = 2.40 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

2.12.3 แรงลมที่กระทำต่อน้ำหนักบรรทุกจร

ซึ่งกระทำที่ระดับ 1.80 เมตร เหนือผิวของทางรถวิ่ง

แรงลมตามขวาง = 1.46 กิโลนิวตันต่อเมตร

แรงลมตามยาว = 0.58 กิโลนิวตันต่อเมตร

2.12.4 แรงลมที่กระทำให้เกิดการพลิกคว่ำ (Overturning Forces)

เป็นแรงที่กระทำต่อพื้นที่ข้างล่างทั้งหมดของสะพาน และกระทำที่ระยะ 1 ใน 4 ของความกว้างของสะพาน

สำหรับแรงลมที่กระทำในกลุ่ม 2 และ 5 = 0.96 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

สำหรับแรงลมที่กระทำในกลุ่ม 3 และ 6 = 0.29 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

2.13 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง อ้างอิงจาก ASSTHO LRFD 2010

แรงลมที่กระทำในข้อกำหนดของ ASSTHO LRFD 2010 กล่าวว่า แรงลมเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศในบริเวณที่มีความกดอากาศสูงมาสู่บริเวณที่มีความกดอากาศต่ำกว่า เนื่องจากอากาศเป็นของไหลชนิดหนึ่งมีคุณสมบัติความหนืดและความเสียดทานดังนั้นบริเวณที่อากาศเคลื่อนที่ติดกับพื้นผิวโลกที่มีความขรุขระย่อมเกิดแรงเสียดทาน มีผลให้ความเร็วของการเคลื่อนที่ลดลงตามความสูง และที่ระดับสูงขึ้นไปจากพื้นโลกประมาณ 366 เมตร ความขรุขระไม่ส่งผลให้ความเร็วลมลดลง

ในการคำนวณแรงลมของมาตรฐาน ASSTHO LRFD 2010 จะกล่าวว่า

$$V_{DZ} = 2.5V_0 \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad (2-42)$$

โดยที่	V_{DZ}	คือ	ความเร็วลมออกแบบที่ความสูง Z หน่วยเป็น กิโลเมตรต่อชั่วโมง
	V_0	คือ	ความเร็วเสียดทาน (Friction Velocity) หน่วยเป็น กิโลเมตรต่อชั่วโมง ได้จากการวัดความเร็วลมปะทะบนผิวต่าง ๆ
	V_{10}	คือ	ความเร็วลมที่ความสูง 10 เมตรเหนือระดับพื้นดินหน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อชั่วโมง
	V_B	คือ	ความเร็วลมพื้นฐานเท่ากับ 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตร
	Z	คือ	ความสูงของโครงสร้างสะพาน วัดจากระดับพื้นดินด้านล่าง ที่ความสูงมากกว่า 10 เมตร
	Z_0	คือ	ระยะเสียดทาน (Friction Length) ระหว่างอากาศและพื้นดิน เป็นระยะความสูงเหนือพื้นดินซึ่งมีความเร็วเสียดทานเป็นศูนย์ $V_0 = 0$

แรงลมที่กระทำบนโครงถัก หรือคาน มีสมมติฐานจากลมเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และสูงจากพื้นดิน 10 เมตร เทียบเท่าแรงลมเท่ากับ 1.23 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร แต่ตามมาตรฐาน ASSTHO LRFD 2010

โครงถัก เสา และโครงสร้างโค้งงอ ด้านประทะแรงลม 2.40 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

โครงถัก เสา และโครงสร้างโค้งงอ ด้านท้ายลม 1.20 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

คาน 2.40 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

แรงที่กระทำต่อพื้นที่ผิวขรุขระ 1.90 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

ทั้งนี้ด้านประทะแรงลม สำหรับคานหรือโครงสร้างที่เป็นโครงถัก โครงสร้างโค้งงอ แรงลมต้องไม่น้อยกว่า 4.4 กิโลนิวตันต่อเมตร ด้านท้ายลม จะต้องไม่น้อยกว่า 2.2 กิโลนิวตันต่อเมตร

ตารางที่ 2.23 ค่าความเร็วเสียดทาน (V_0) และระยะเสียดทาน (Z_0) บนสภาพพื้นผิวต่าง ๆ

สภาพพื้นที่	โล่งแจ้ง	ชานเมือง	เขตเมือง
V_0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	13.2	17.6	19.3
Z_0 มิลลิเมตร	70	1,000	2,500

ตารางที่ 2.24 แรงลมพื้นฐาน, P_B ในทิศทางต่างๆ เมื่อความเร็วลมที่ฐานเท่ากับ 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

องศา	โครงถัก เสา และคานโค้ง หน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อตารางเมตร		คาบ หน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อตาราง เมตร	
	แรงในตามขวาง	แรงในตามยาว	แรงในตามขวาง	แรงในตามยาว
0	3.60	0.00	2.40	0.00
15	3.4	0.60	2.10	0.30
30	3.10	1.30	2.00	0.60
45	2.30	2.00	1.60	0.80
60	1.10	2.40	0.80	0.90

ซึ่งการคำนวณโครงสร้างส่วนบนที่สูงกว่าพื้นดินเกินกว่า 10 เมตร หรือความเร็วลมที่เกิดขึ้นจริงน้อยกว่า 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ให้ปรับแก้ความเร็วลมตามสมการ

$$P_D = P_B \left(\frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 = P_B \frac{V_{DZ}^2}{25600} \quad (2-43)$$

3.5 ตารางการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 แผนระยะเวลาในการดำเนินงานในแต่ละกิจกรรมของงานวิจัย

กิจกรรม	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
เลือกหัวข้อโครงการ	←→												
หาอาจารย์ที่ปรึกษา		←→											
ขอบเขต/วัตถุประสงค์			←→										
ค้นคว้า/รวบรวมข้อมูล			←→										
นำเสนอหัวข้อโครงการ				←→									
คำนวณและออกแบบ				←→									
วิเคราะห์/เปรียบเทียบ									←→				
สรุปผลการทำโครงการ										←→			
รวบรวมเอกสาร											←→		
ตรวจสอบ/จัดทำเล่ม												←→	
ส่งเล่มให้กรรมการคุม สอบ												←→	
นำเสนอโครงการ												←→	
แก้ไขและจัดทำเล่ม												←→	
ส่งรูปเล่ม												←→	

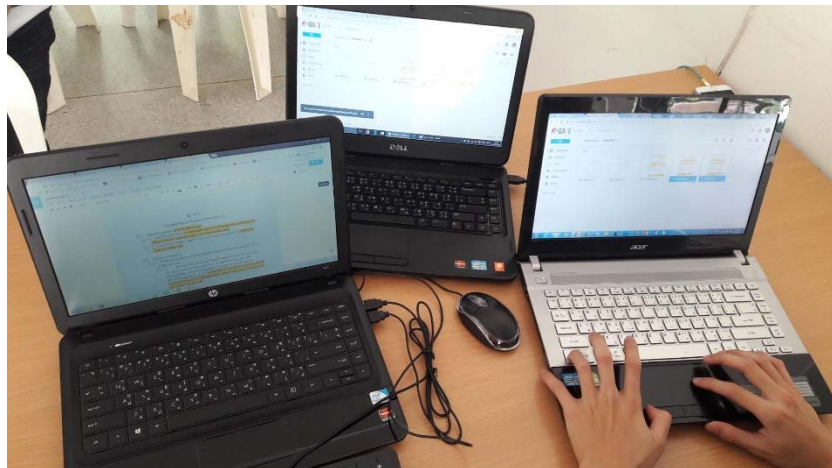
บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 คอมพิวเตอร์ (PC)

เป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์แบบอัตโนมัติ ทำหน้าที่เหมือนสมองกล ใช้สำหรับแก้ปัญหาต่างๆที่ทั้งง่ายและซับซ้อนโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ คอมพิวเตอร์ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ทำงานแทนมนุษย์ในด้านการคิดคำนวณ และสามารถจัดเก็บข้อมูลได้ทั้งตัวเลขและตัวอักษรได้ เพื่อการเรียกใช้งานในครั้งต่อไปดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงถึงคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำงาน

3.1.2 คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว

คู่มือนี้แสดงหลักเกณฑ์การออกแบบ แรงที่ใช้ในการออกแบบ ข้อพิจารณาในการออกแบบโครงสร้าง การวิเคราะห์และรายละเอียดในการออกแบบสะพานต้านทานแผ่นดินไหวสำหรับสะพานในประเทศไทย จากกรมทางหลวง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงถึงคู่มือที่ใช้ในการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแรงแผ่นดินไหว

3.1.3 มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1302)

มาตรฐานนี้กำหนดหลักเกณฑ์ตัวประกอบในการคิดคำนวณ และวิธีการออกแบบอาคารต้านแรงแผ่นดินไหวภายในประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 คู่มือมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว

3.1.4 คู่มือมาตรฐานการออกแบบสะพานต้านทานแรงแผ่นดินไหว ASSHTO ตามมาตรฐานสหรัฐอเมริกา

- 3.1.4.1 AASHTO Standard 1973
- 3.1.4.2 Seismic Design from AASHTO Standard 2002
- 3.1.4.3 Seismic Design from AASHTO LRFD 2010

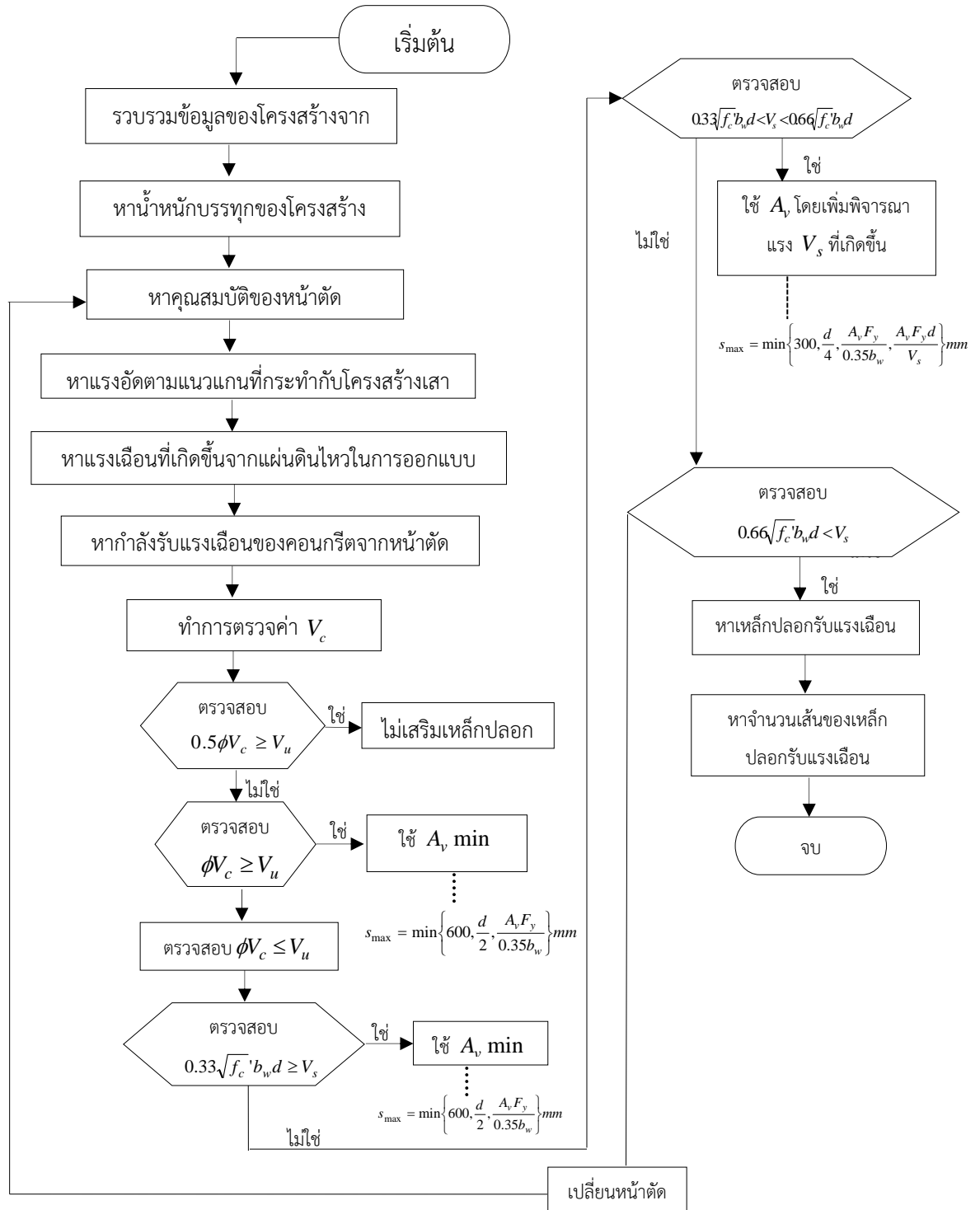
3.2 วิธีดำเนินการ

- 3.2.1 การศึกษาข้อมูลทางด้านการออกแบบสะพานรับแรงแผ่นดินไหวในมาตรฐานต่าง ๆ
- 3.2.2 กำหนดพื้นที่อ้างอิง
 - โดยทำการกำหนดพื้นที่ที่ใช้ในการอ้างอิงถึงการสร้างแบบจำลองในพื้นที่ 4 จังหวัด จังหวัดเชียงราย จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดกำแพงเพชร และกรุงเทพมหานครซึ่งพื้นที่สี่จังหวัดนี้มีความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมพื้นที่ในประเทศไทยมากที่สุด
- 3.2.3 ออกแบบต่อม่อสะพานเสาเดี่ยวตามที่มาตรฐานกำหนด
 - ซึ่งมาตรฐานที่เลือกมามี 3 มาตรฐานดังนี้
 - 3.2.3.1 ออกแบบต่อม่อสะพานตามมาตรฐานที่ใช้กันมา 20 ปี
 - 3.2.3.2 ออกแบบต่อม่อสะพานตามมาตรฐานของ AASHTO 2002
 - 3.2.3.3 ออกแบบต่อม่อสะพานตามมาตรฐานของการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวปีพ.ศ. 2559

3.3 รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการ

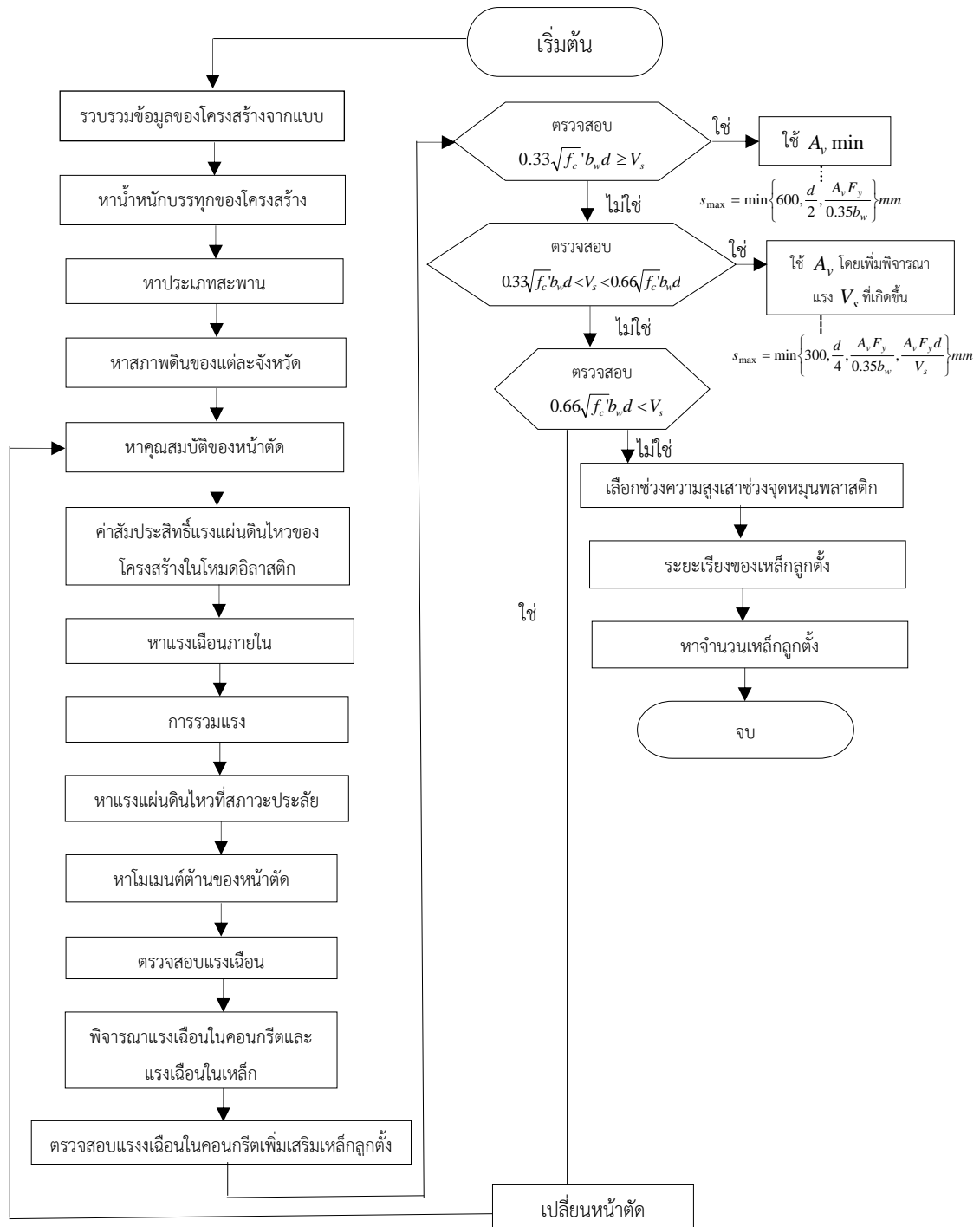
3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบวิธีที่ 1 วิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างแบบคทงที่

(6%)



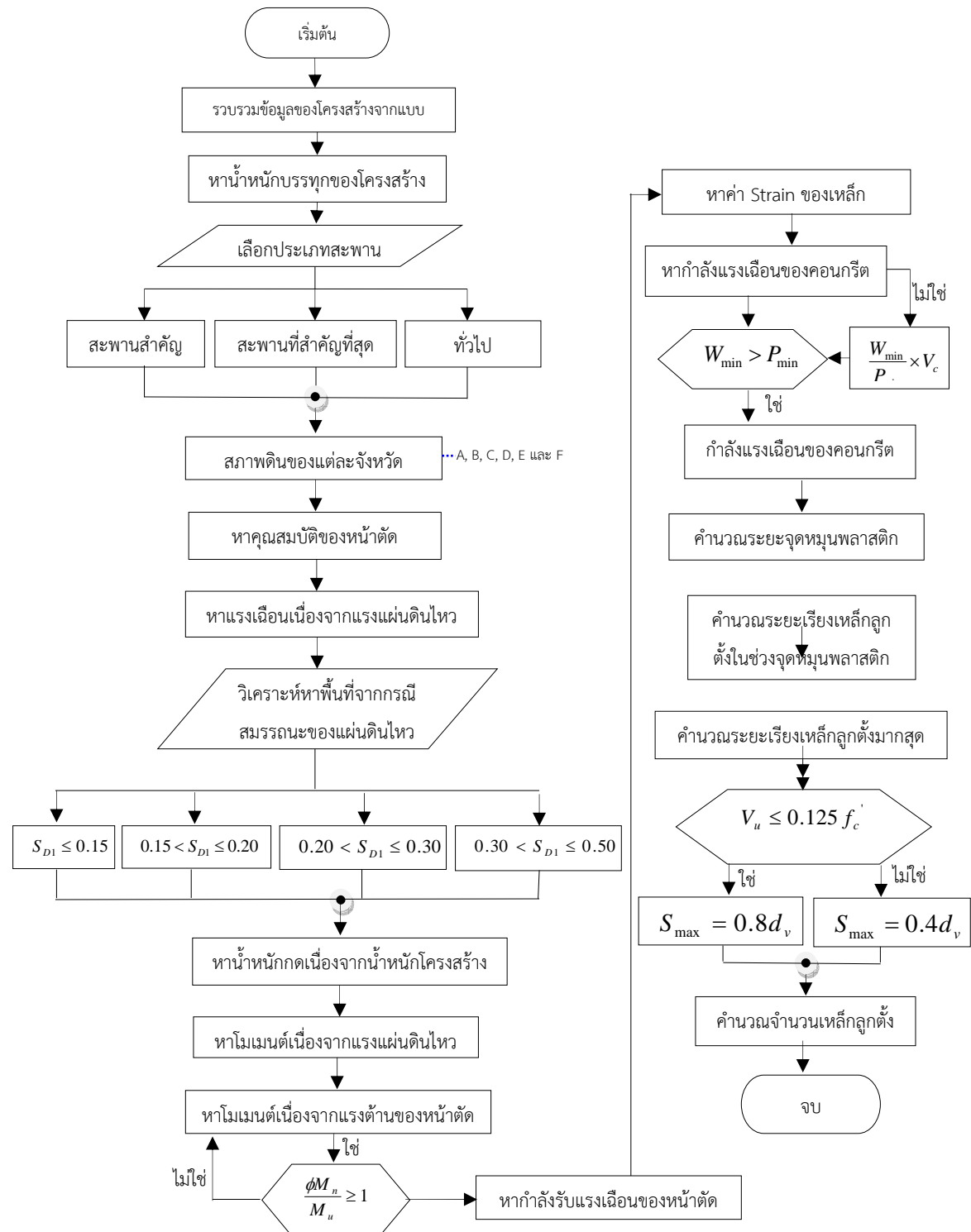
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการออกแบบวิธีที่ 1 วิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างแบบคทงที่ (6%)

3.3.2 ขั้นตอนการออกแบบวิธีที่ 2 วิธีเปิดแผนทีที่เสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหว ของ รศ.ดร.เป็นหนึ่ง วานิชชัยร่วมกับ AASHTO Standard 2002



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการออกแบบวิธีที่ 2 วิธีเปิดแผนทีที่เสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวของรศ.ดร.เป็นหนึ่ง วานิชชัย ร่วมกับ AASHTO Standard 2002

3.3.3 ขั้นตอนการออกแบบวิธีที่ 3 เปิดคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2559



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการออกแบบวิธีที่ 3 เปิดคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงปี พ.ศ.2559

3.6 เปรียบเทียบผลของการออกแบบ

ทำการเปรียบเทียบผลของการออกแบบจากทั้งสามวิธีข้างต้นในเรื่องของกำลังรับแรงต้าน แผ่นดินไหว และค่าใช้จ่ายในเหล็กเสริมต่อม่อสะพานเสาเดียวโดยไม่รวมค่าใช้จ่ายอื่น

3.7 ประเมินปริมาณเหล็กที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

โดยทำการประเมินปริมาณเหล็กที่เป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการก่อสร้างต่อม่อสะพานเสาเดียวทั้งสามทฤษฎี

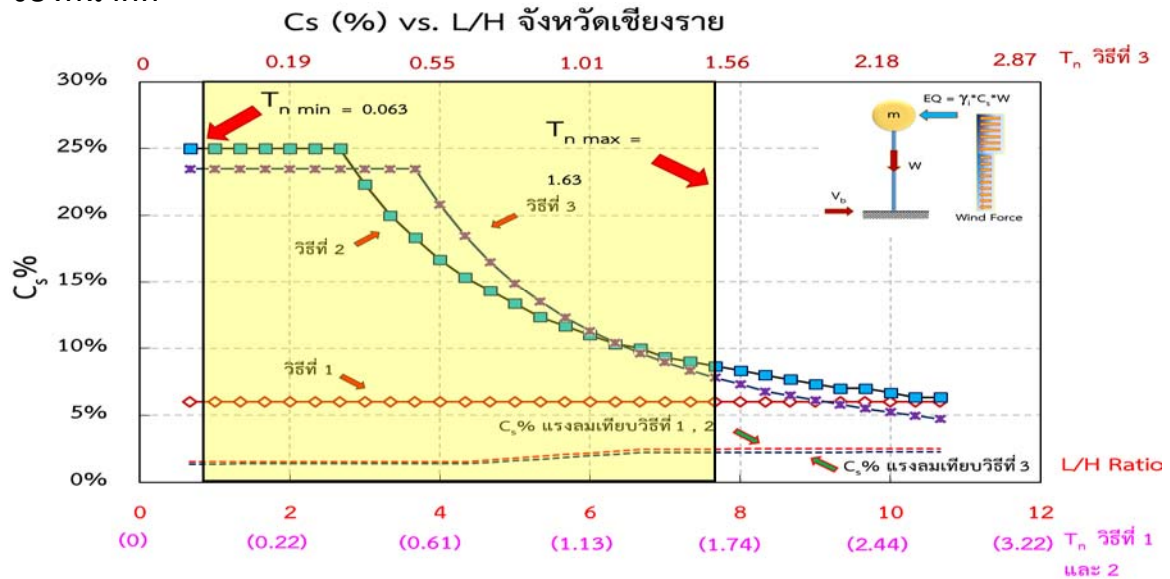
3.8 สรุปผลการดำเนินงาน

นำผลที่ได้จากการออกแบบ และค่าใช้จ่ายของวัสดุจากทั้งสามวิธีมาเปรียบเทียบเพื่อหาทฤษฎีที่เหมาะสมและคุ้มค่าที่สุดที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในประเทศไทย

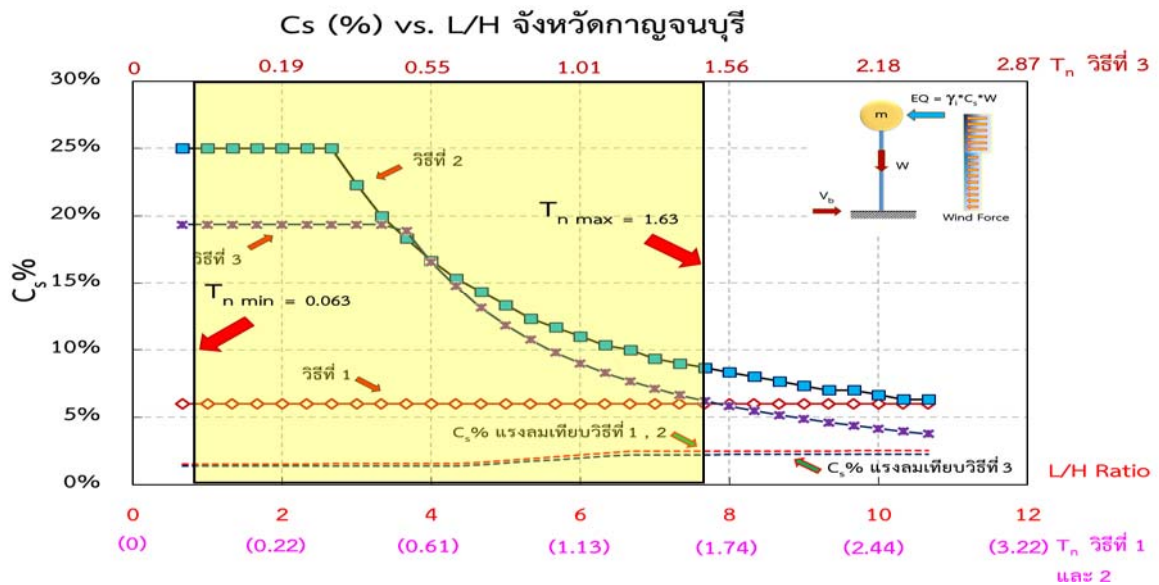
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัด

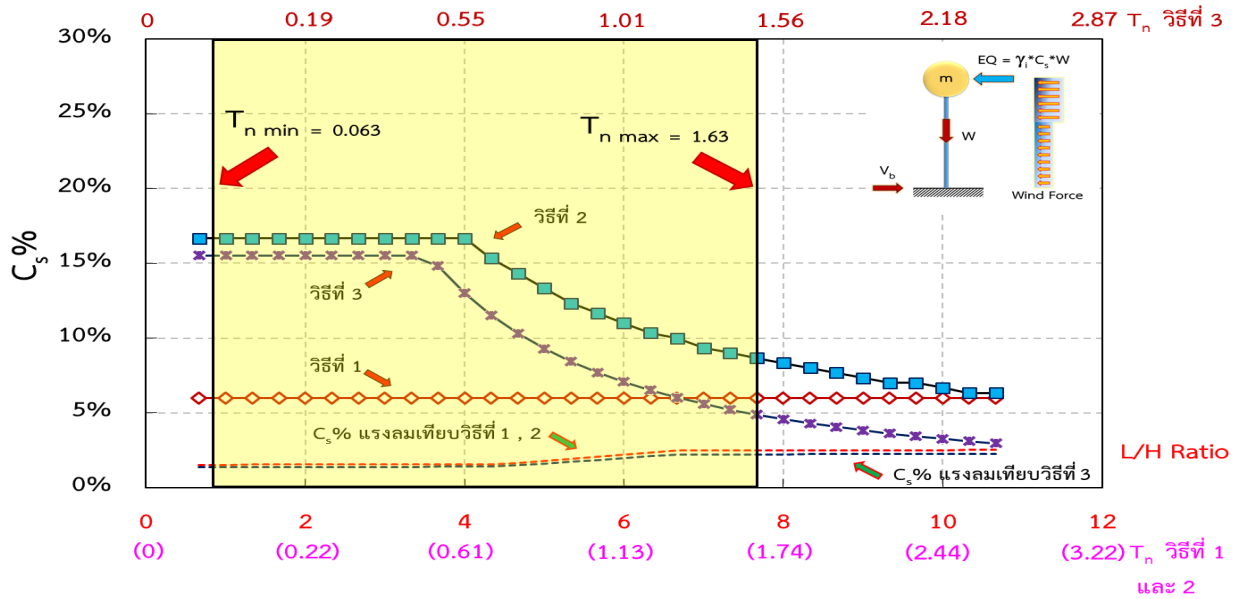


รูปที่ 4.1 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัด จังหวัดเชียงราย



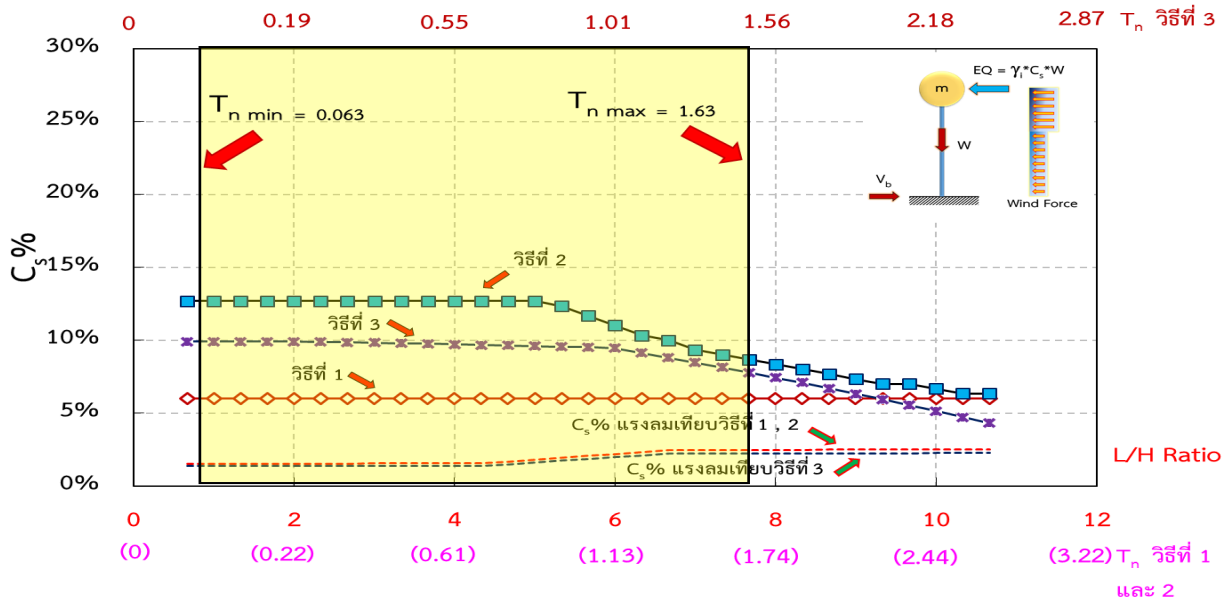
รูปที่ 4.1 (ข) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัด จังหวัดกาญจนบุรี

Cs (%) vs. L/H จังหวัดกำแพงเพชร



รูปที่ 4.1 (ค) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัด จังหวัดกำแพงเพชร

Cs (%) vs. L/H จังหวัดกรุงเทพมหานคร

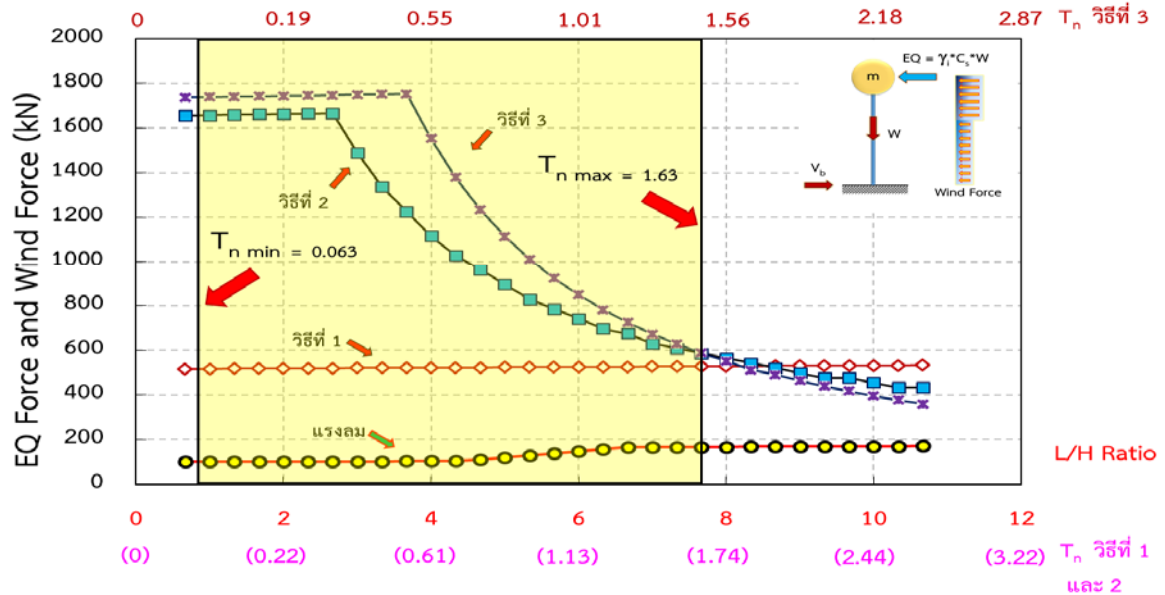


รูปที่ 4.1 (ง) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัด พบว่าที่จุดเริ่มต้นกราฟ วิธีที่ 2 ให้ค่า C_s มากที่สุด ตามด้วยวิธีที่ 3 และวิธีที่ 1 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าเมื่อค่า L/H เท่ากับ 8 พื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีและจังหวัดกำแพงเพชร ค่า C_s วิธีที่ 3 จะเริ่มมีค่าน้อยกว่าวิธีที่ 1 รูปที่ 4.1 (ข) – 4.2 (ค) แต่เมื่อพิจารณาที่ค่า L/H เท่ากับ 9 พบว่า C_s วิธีที่ 3 พื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครมีค่าน้อยกว่าวิธีที่ 1 ส่วนในพื้นที่จังหวัดเชียงรายนั้นเมื่อค่า L/H มีค่าเท่ากับ 3 ค่า C_s วิธีที่ 3 จะมามีค่ามากกว่าวิธีที่ 2 แต่จะเป็นเฉพาะช่วง ที่ค่า L/H เท่ากับ 3 จนไปถึงช่วง L/H เท่ากับ 6 การลดลงของค่า C_s วิธีที่ 3 จะลดลงมากกว่าวิธีที่ 2 จนทำให้ค่า C_s วิธีที่ 2 มากกว่าตามเดิม แต่ในทุกพื้นที่นั้นค่า C_s วิธีที่ 2 มีการลดลงจนทำให้บอกถึงแนวโน้มได้ว่าค่า C_s วิธีที่ 2 จะลดลงจนมีค่าน้อยกว่าค่า C_s วิธีที่ 1 ที่เป็นค่าคงที่คือ 6% และการพิจารณาค่า C_s ของทุกจังหวัดเห็นได้ว่าค่า C_s ของแรงลมนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเป็นแนวโน้มได้ว่าเมื่อค่า L/H มีค่าสูงขึ้นค่า C_s ของแรงลมจะมีค่ามากกว่า C_s ของวิธีที่ 1 วิธีที่ 2 และวิธีที่ 3

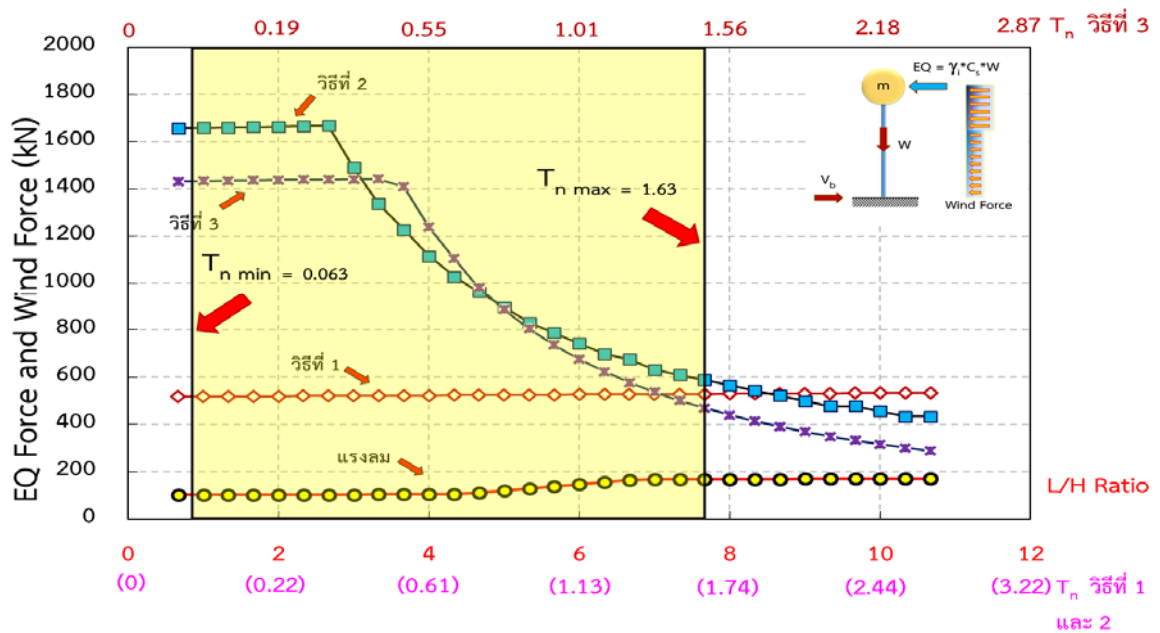
4.2 เปรียบเทียบหน่วยแรงจากแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาคู่ต่อนานยาวของหน้าตัด

EQ FORCE VS. L/H จังหวัดเชียงราย

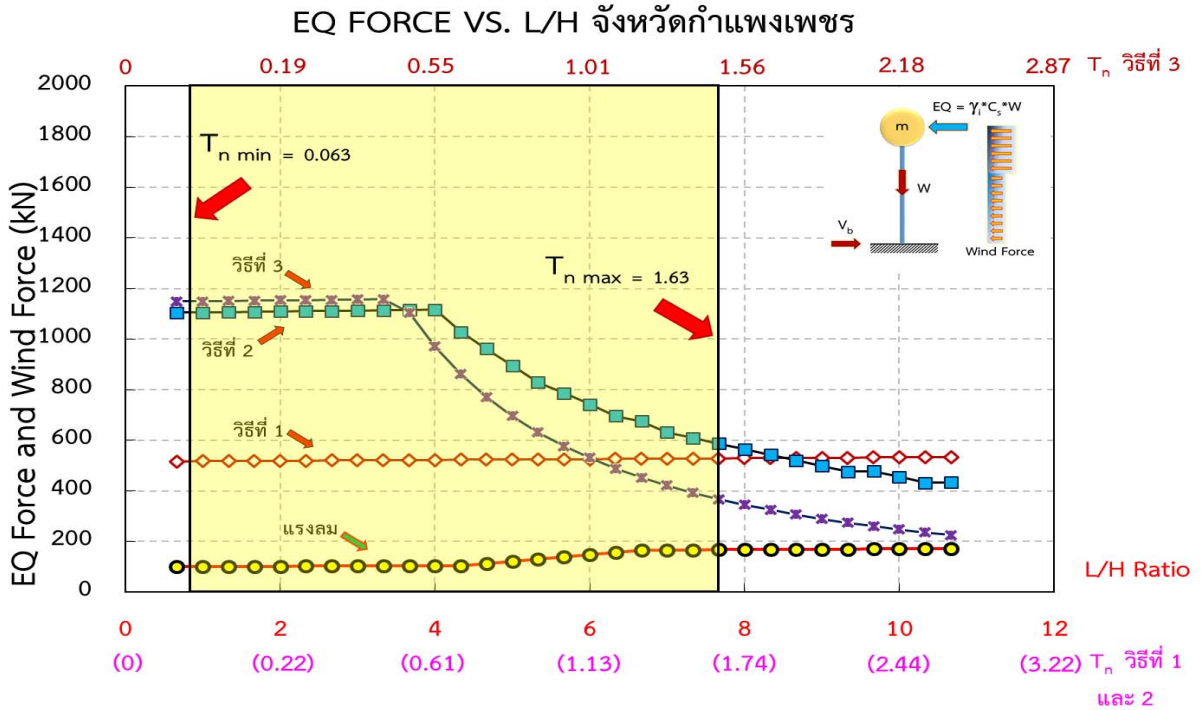


รูปที่ 4.2 (ก) กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงจากแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัดที่จังหวัดเชียงราย

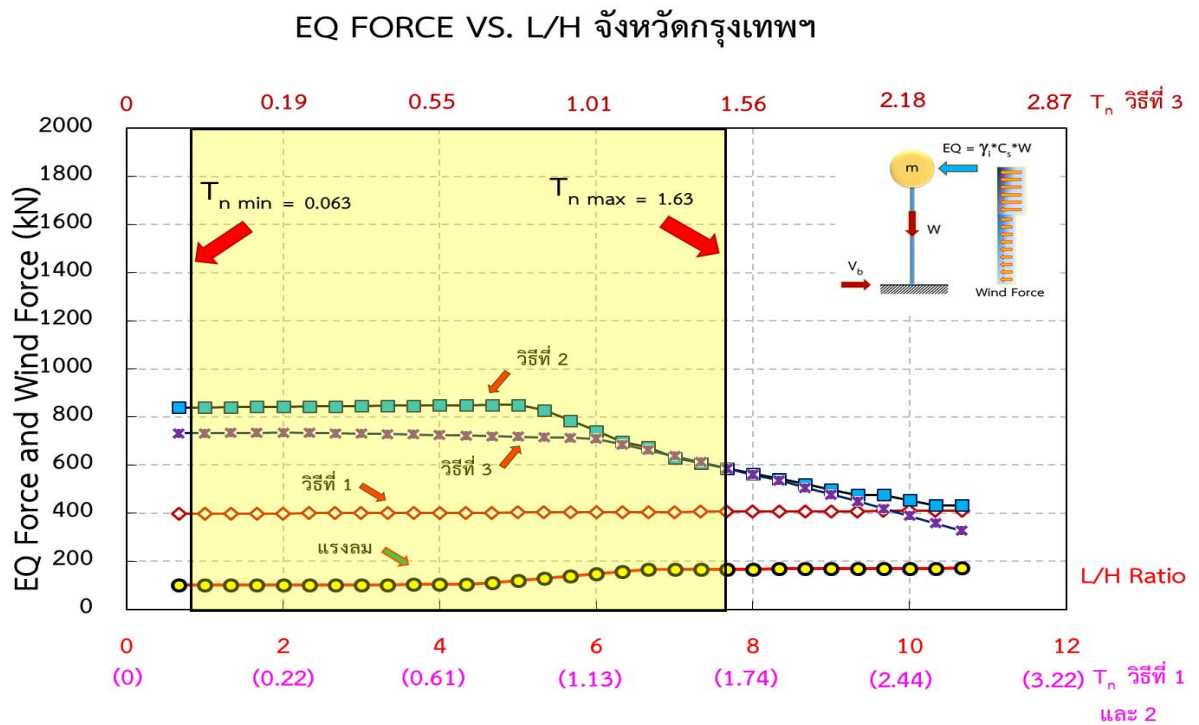
EQ FORCE VS. L/H จังหวัดกาญจนบุรี



รูปที่ 4.2 (ข) กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงจากแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัดที่จังหวัดกาญจนบุรี



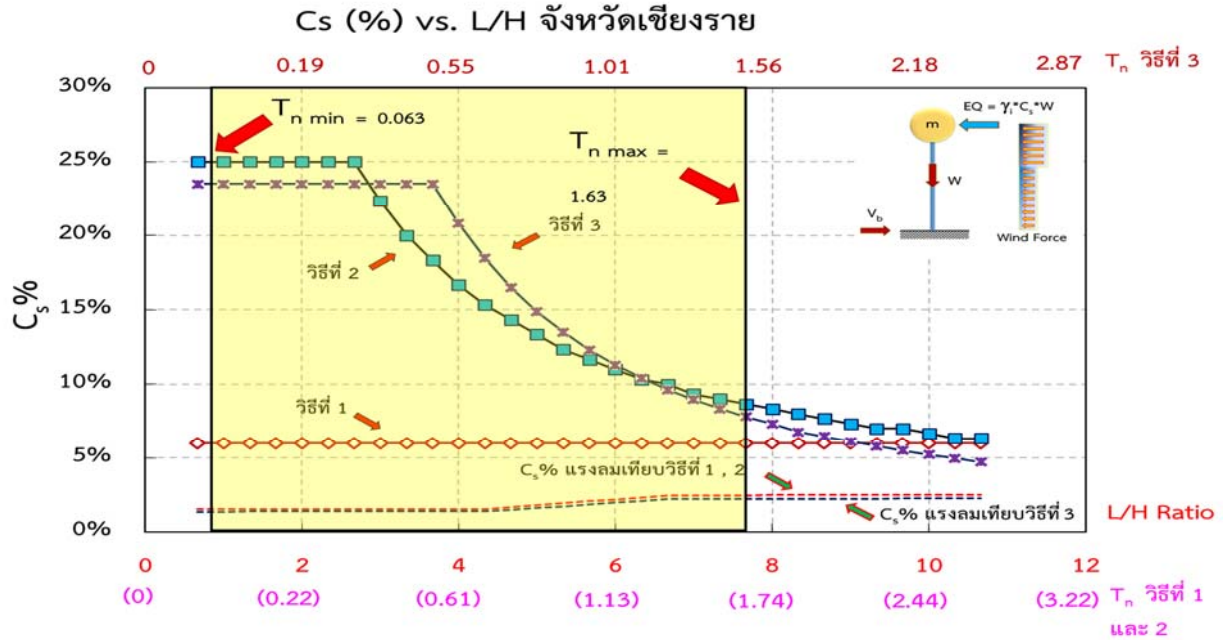
รูปที่ 4.2 (ค) กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงจากแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัดที่จังหวัดกำแพงเพชร



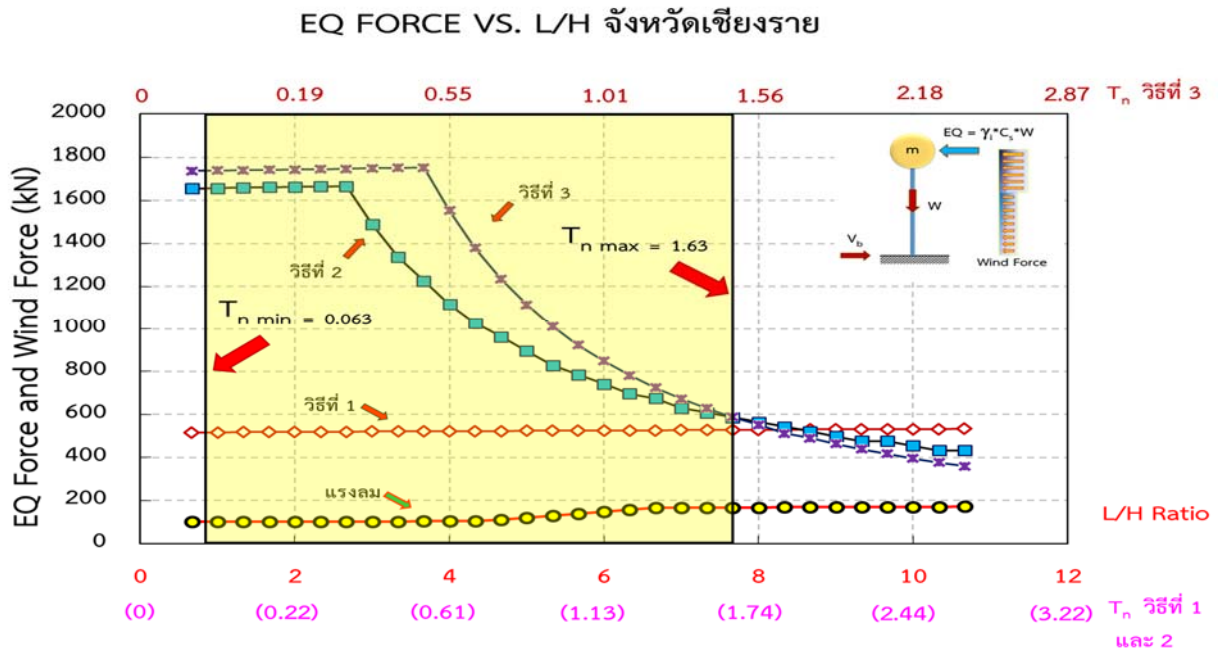
รูปที่ 4.2 (ง) กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงจากแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

กราฟแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวและแรงเฉือนจากแรงลมในจังหวัดเชียงราย และจังหวัดกำแพงเพชรดังรูปที่ 4.2 (ก) , (ค) แรงที่เกิดจากวิธีที่ 3 จะมีค่ามากที่สุดตามด้วยวิธีที่ 2 และวิธีที่ 1 แต่จากหัวข้อ 4.1 ค่า c_s ในจังหวัดเชียงรายนั้น วิธีที่ 2 มีค่ามากที่สุด แต่เมื่อนำมาคิดหาแรงเฉือนจากแผ่นดินไหววิธีที่ 3 กลับได้ค่ามากสุดใน 2 พื้นที่นี้ เป็นเพราะการคิดคำนวณของน้ำหนักโครงสร้างวิธีที่ 3 จะรวมน้ำหนักของน้ำหนักบรรทุกจร และน้ำหนักของแรงกดรวมด้วย ต่างจากวิธีที่ 2 ที่คิดแค่น้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้าง เมื่อพิจารณากราฟแรงเฉือนจังหวัดกาญจนบุรี และจังหวัดกรุงเทพมหานครดังรูปที่ 4.2 (ข) , (ง) พบว่าวิธีที่ 2 มีค่ามากที่สุดเนื่องจากค่า c_s ในวิธีที่ 2 มีค่ามากกว่าวิธีที่ 3 และวิธีที่ 1 พื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีดังรูปที่ 4.2 (ข) ช่วงที่ L/H เท่ากับ 3 ไปจนถึง L/H เท่ากับ 5 ค่าแรงแผ่นดินไหววิธีที่ 3 มากกว่าวิธีที่ 2 และเมื่อ L/H มากกว่า 5 จะทำให้ค่าแรงเฉือนในวิธีที่ 2 จะมากกว่าวิธีที่ 3 เช่นเดิมในจังหวัดเชียงรายเมื่อ L/H เท่ากับ 8 ค่าแรงเฉือนแผ่นดินไหววิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 จะเริ่มมีค่าน้อยกว่าวิธีที่ 1 และเมื่อ L/H มีค่ามากกว่า 8 แรงเฉือนแผ่นดินไหววิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 จะมีค่าน้อยกว่าวิธีที่ 1 และแรงเฉือนแผ่นดินไหววิธีที่ 2 จะมีค่ามากกว่าวิธีที่ 3 ในจังหวัดกำแพงเพชรการลดลงของแรงแผ่นดินไหววิธีที่ 3 จะเกิดขึ้นไวกว่าวิธีที่ 2 เป็นเพราะว่าค่า c_s วิธีที่ 3 มีค่าน้อยกว่าวิธีที่ 2 เมื่ออิงถึงหัวข้อ 4.1 แต่น้ำหนักของโครงสร้างวิธีที่ 3 จะมีค่ามากกว่าวิธีที่ 2 ตามแบบวิธีการคิดคำนวณในข้างต้น พิจารณาจุด L/H เท่ากับ 6 แรงแผ่นดินไหววิธีที่ 3 มีค่าใกล้เคียงวิธีที่ 1 และเมื่อ L/H มากกว่า 6 ค่าแรงแผ่นดินไหววิธีที่ 3 มีค่าน้อยกว่าวิธีที่ 1 อย่างเห็นได้ชัดเจนแต่ต่างจากวิธีที่ 2 แรงเฉือนแผ่นดินไหวจะน้อยกว่าวิธีที่ 1 เมื่อ L/H มากกว่า 8 เป็นต้นไป ในส่วนของพื้นที่กรุงเทพฯจะเห็นได้ว่าเมื่อ L/H มีค่าเท่ากับ 6 แรงเฉือนแผ่นดินไหววิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 จะมีค่าใกล้เคียงกันแต่เมื่อ L/H เท่ากับ 9 แรงวิธีที่ 3 จะแรงเฉือนแผ่นดินไหวเริ่มลดลงกว่าวิธีที่ 2 และน้อยกว่าวิธีที่ 1 แต่วิธีที่ 2 จะมีแนวโน้มที่แรงเฉือนแผ่นดินไวน้อยกว่าวิธีที่ 1 เมื่อค่า L/H มีค่ามากกว่า 10 และเมื่อมองเส้นกราฟแรงลมทุกพื้นที่จะเห็นได้ว่าแรงลมมีค่าที่เพิ่มขึ้นตลอดและมีแนวโน้มที่จะมากกว่าแรงเฉือนแผ่นดินไหวในทุกวิธีเป็นแนวโน้มได้อีกว่าเมื่อค่า L/H มีค่ามากความสูงเสามาการออกแบบโดยใช้แรงแผ่นดินไหวอาจจะทำให้เสามีการเสริมเหล็กกับแรงเฉือนที่ไม่มากต่อการรับแรงเฉือนจากแรงลม

4.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างที่มีผลต่อแรงแผ่นดินไหวที่จังหวัด เชียงราย



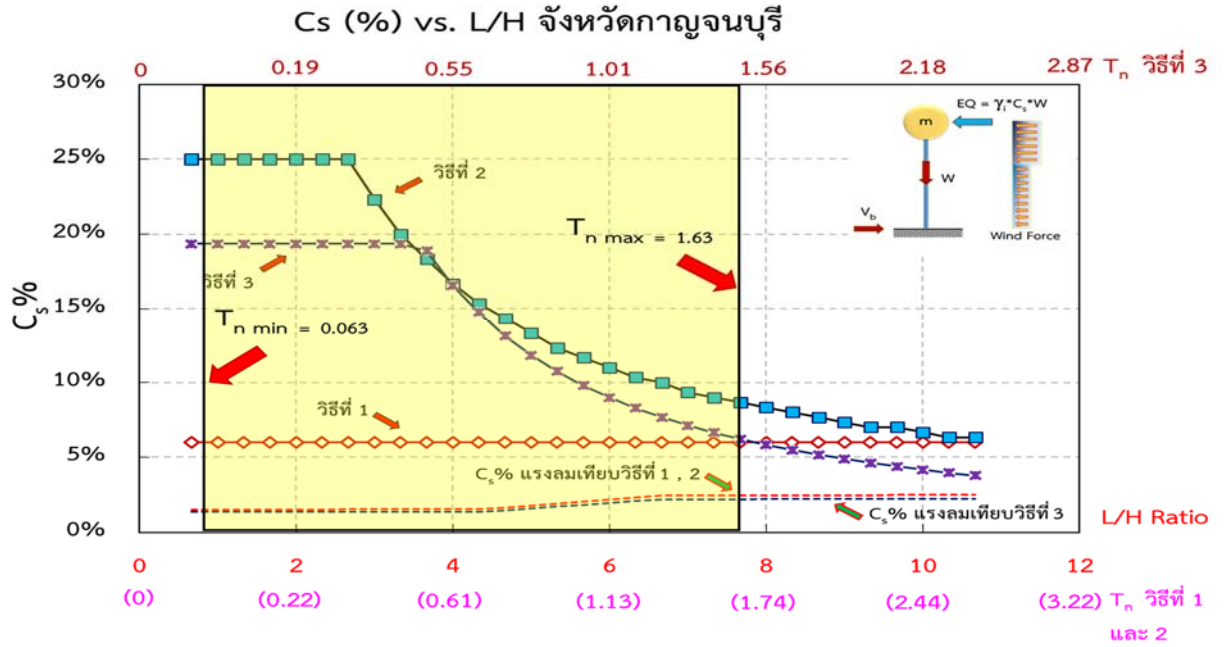
รูปที่ 4.3 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย



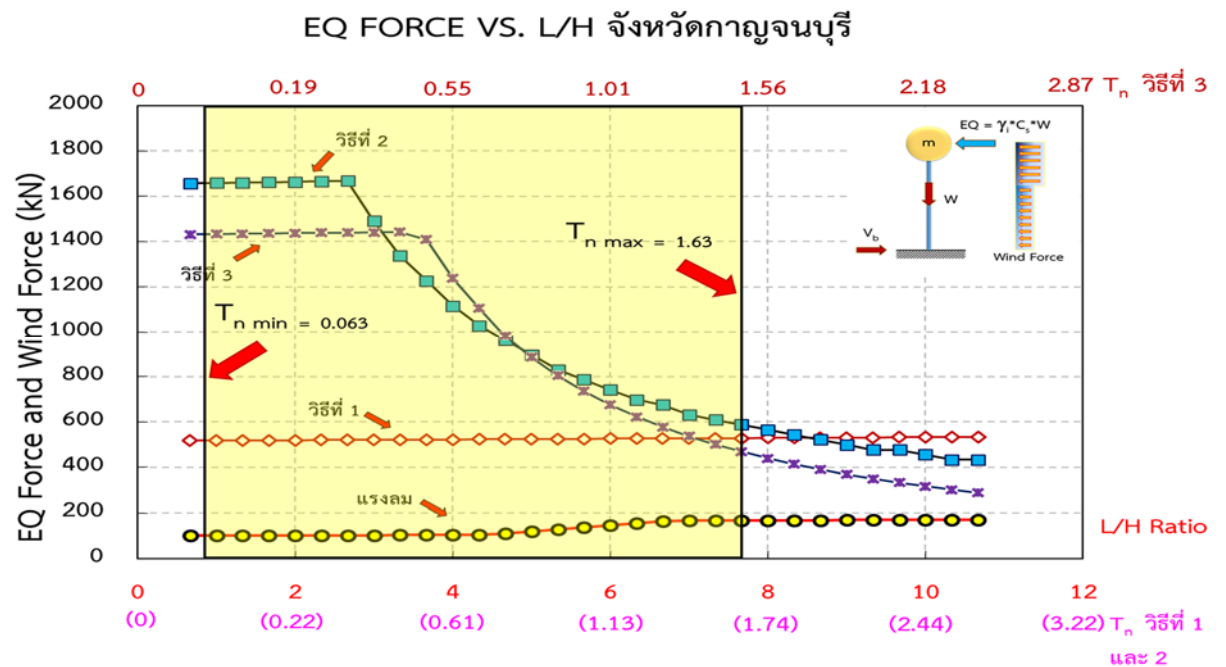
รูปที่ 4.3 (ข) กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย

จากการเทียบค่า c_s จะว่าวิธีที่ 2 จะมีค่ามากที่สุดแต่การลดค่าจะเกิดขึ้นในช่วงที่ L/H เท่ากับ 3 ซึ่งต่างจากวิธีที่ 3 จะเกิดขึ้นเมื่อ L/H เท่ากับ 4 ในทางกลับกันแรงเฉือนแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นวิธีที่ 3 ที่ค่ามากที่สุดเป็นเนื่องมาจากการคิดคำนวณน้ำหนักโครงสร้างที่ต่างกันวิธีที่ 3 มีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรน้ำหนักการกระแทก แต่ในของวิธีที่ 2 จะคิดค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ซึ่งเป็นเหตุที่ว่าวิธีที่ 3 ให้ค่าแรงแผ่นดินไหวมากกว่าวิธีที่ 2 ถึงแม้ว่าค่า c_s วิธีที่ 2 จะมีค่ามากกว่าก็ตาม แต่เมื่อสังเกตว่าที่ L/H เท่ากับ 9 การออกแบบแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวนั้นวิธีที่ 1 จะให้ค่าแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวมากกว่าวิธีที่ 3 และวิธีที่ 2 นั้นแสดงว่าวิธีที่ 1 จะสามารถนำมาออกแบบได้แต่ค่า L/H จะต้องมีความมากกว่า 9 แล้วเท่านั้น แรงลมที่เกิดขึ้นจากกฎกระทรวงถ้านำมาเทียบในพื้นที่จังหวัดเชียงรายอาจจะใช้ค่า L/H ที่มีค่ามากจึงจะทำให้แรงลมที่มีแนวโน้มมากขึ้น มีค่ามากกว่าแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวเพราะพื้นที่จังหวัดเชียงรายเป็นพื้นที่ ที่มีค่าแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวมากที่สุด

4.4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างที่มีผลต่อแรงแผ่นดินไหวที่จังหวัดกาญจนบุรี



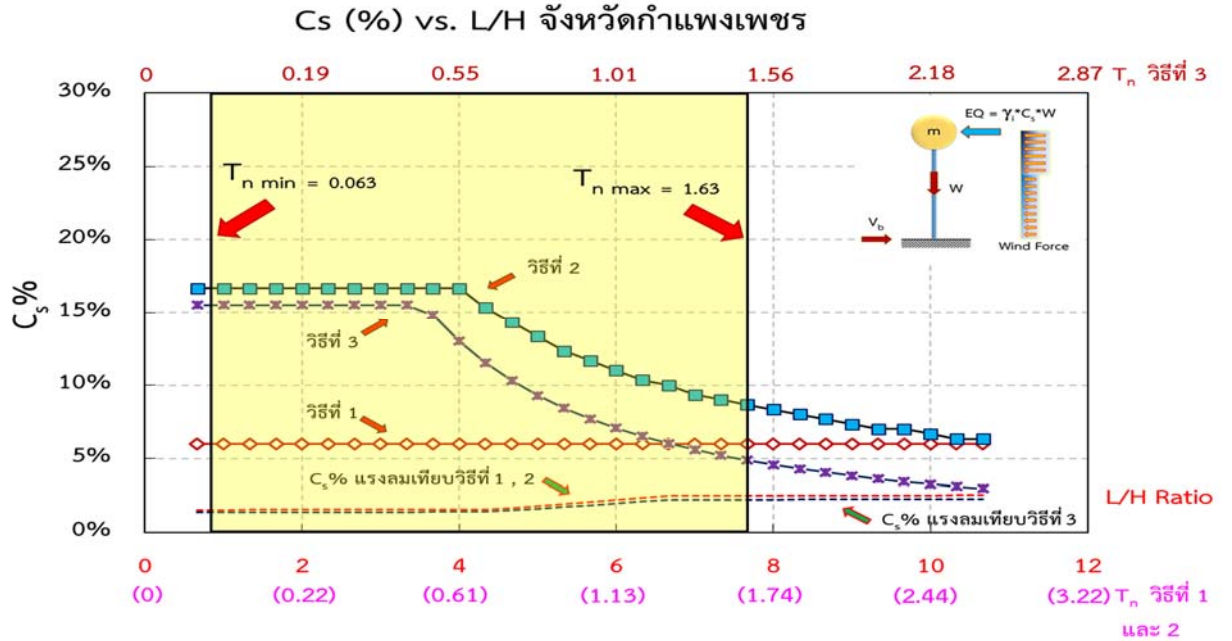
รูปที่ 4.4 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี



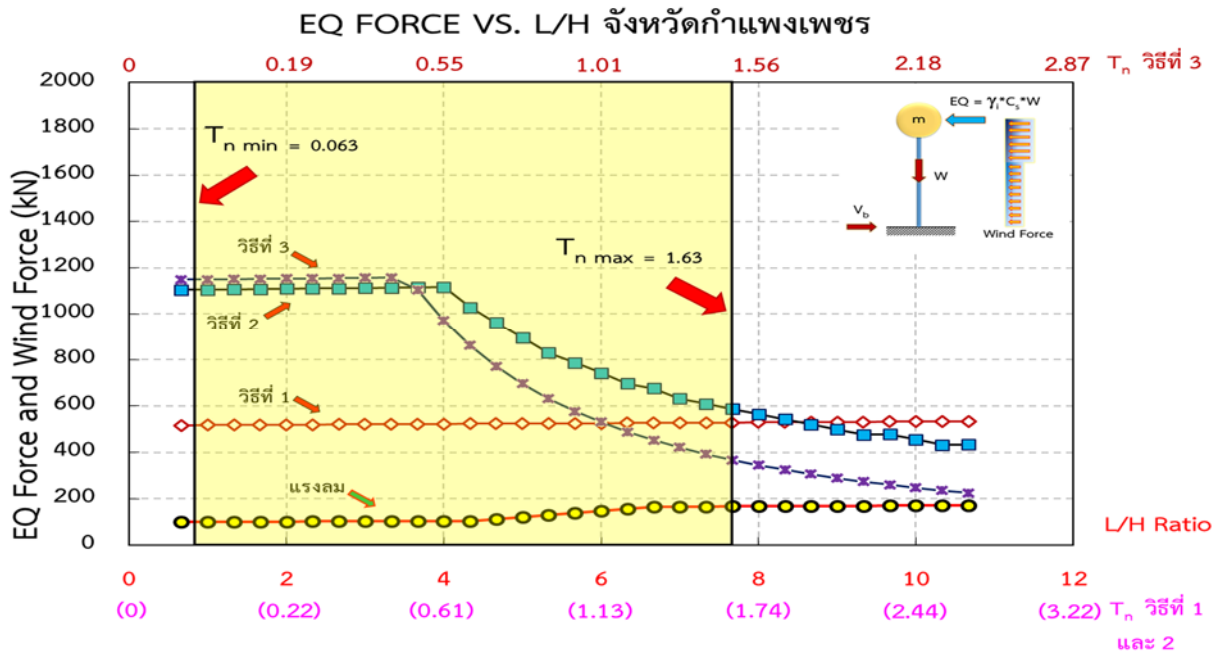
รูปที่ 4.4 (ข) กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี

จังหวัดกาญจนบุรีกราฟ C_s จะคงเป็นวิธีที่ 2 มากกว่าในทุกวิธี แต่การลดลงจะเกิดขึ้นไวกว่าวิธีที่ 3 การลดค่าวิธีที่ 2 จะเกิดขึ้นเมื่อ L/H เท่ากับ 3 ส่วนวิธีที่ 3 จะเกิดขึ้นเมื่อ L/H เท่ากับ 4 จึงส่งผลต่อแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวในช่วง L/H เท่ากับ 3 จนถึง 4 แรงเฉือนจากแผ่นดินไหววิธีที่ 3 จะมากกว่าวิธีที่ 2 แต่เมื่อ L/H มากกว่า 4 เป็นต้นไป วิธีที่ 2 จะมีค่ามากกว่าวิธีที่ 3 เช่นเดิม และการหาแรงเฉือนวิธีที่ 1 จะสามารถใช้ได้ในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีได้นั้นค่า L/H จะต้องมีความมากกว่า 9 เป็นต้นไปเพราะถ้าใช้ค่า L/H เท่ากับ 5 จะเป็นได้แค่วิธีที่ 1 มีค่ามากกว่าวิธีที่ 3 แต่ยังน้อยกว่าวิธีที่ 2 ซึ่งถ้าจะนำมาใช้ในการคิดหาแรงเพื่อออกแบบแล้วนั้นควรที่จะใช้วิธีที่ 1 มีค่ามากกว่าทุกวิธีในการหาแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวแรงลมจากกฎกระทรวงถ้านำมาใช้เทียบในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีนั้นเห็นได้ว่าเมื่อ L/H มากกว่า 12 มีแนวโน้มว่าแรงลมจะมากกว่าแรงเฉือนแผ่นดินไหวจากวิธีที่ 3 และมีแนวโน้มว่าจะมากกว่าวิธีที่ 2 และวิธีที่ 1 เมื่อ L/H มีค่ามากพอที่จะทำให้แรงลมเพิ่มขึ้น

4.5 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างที่มีผลต่อแรงแผ่นดินไหว จังหวัด
กำแพงเพชร



รูปที่ 4.5 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อ
ความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร

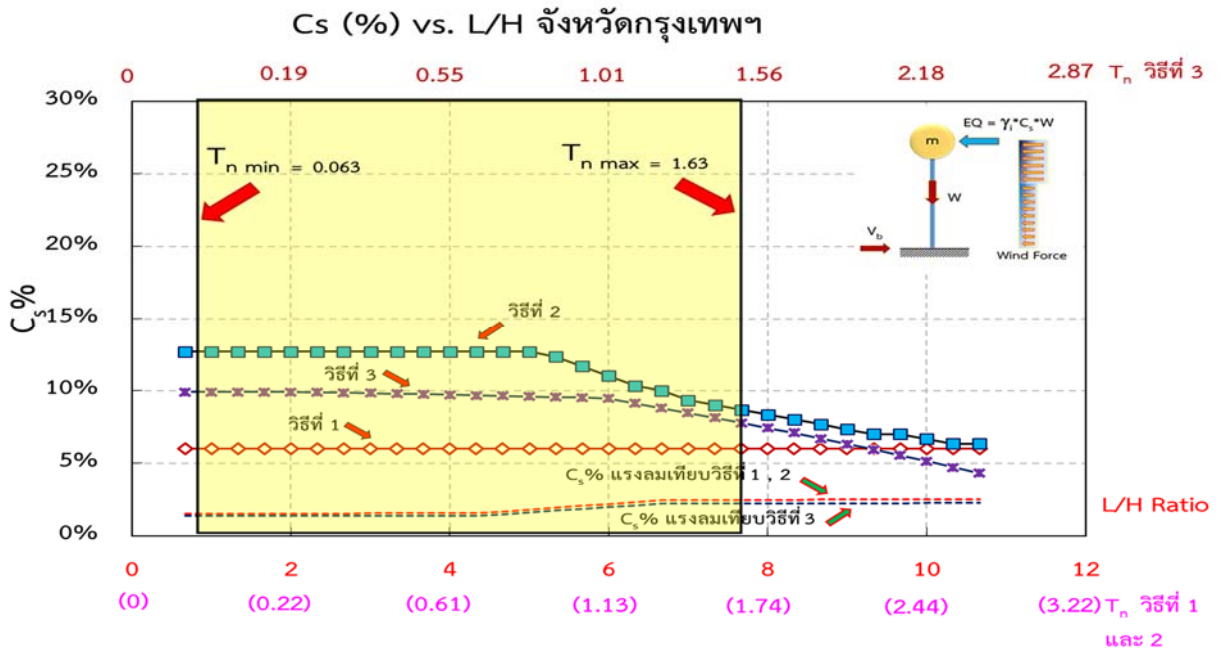


รูปที่ 4.5 (ข)

รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างที่มีผลต่อแรงแผ่นดินไหว
จังหวัดกำแพงเพชร

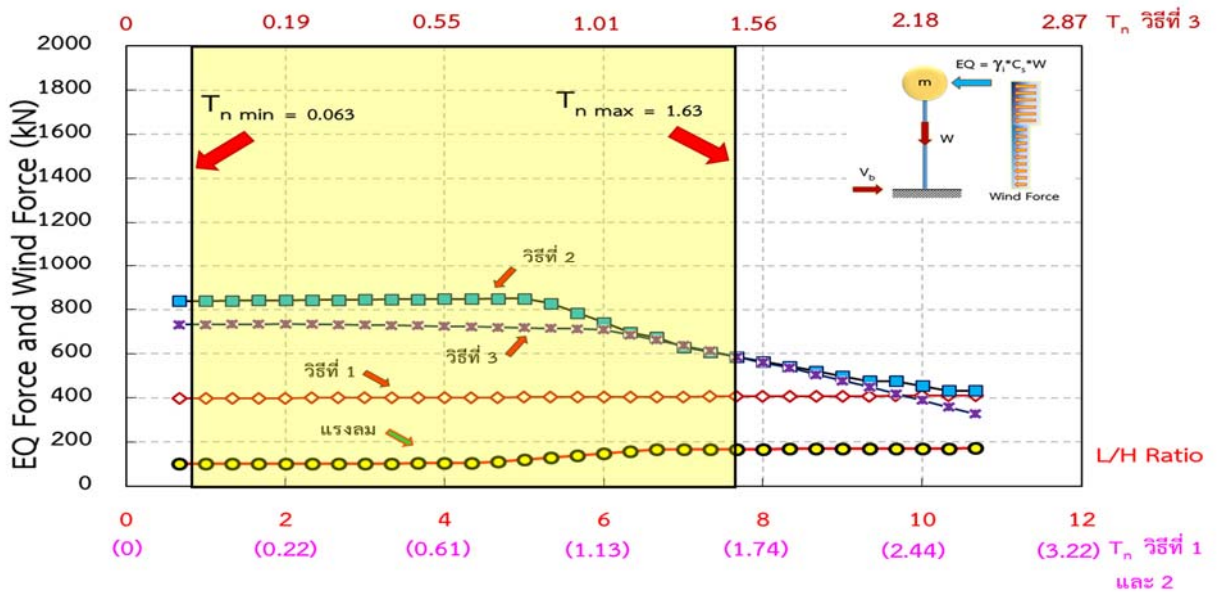
จังหวัดกำแพงเพชรการเปรียบเทียบค่า C_s จากรูปที่ 4.5 (ก) พบว่าค่า C_s ของวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 จะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลทำให้กราฟแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวรูปที่ 4.5 (ข) วิธีที่ 3 มีค่ามากกว่าวิธีที่ 2 ดังที่กล่าวไว้ในพื้นที่จังหวัดเชียงรายคือในการคำนวณวิธีที่ 3 มีการคำนวณน้ำหนักบรรทุกจร และ น้ำหนักการกระทำ แต่การมากกว่าของแรงเฉือนนั้นจะเกิดขึ้นในช่วง L/H เท่ากับ 1 ไปจนถึง L/H เท่ากับ 4 การลดลงของค่า C_s และค่าแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวจะลดลงเป็นคู่กันไปที่ L/H เท่ากัน เมื่อ C_s ลดลง ค่าแรงเฉือนแผ่นดินไหวก็ลดลงตามไปเช่นกัน การลดลงของค่า C_s ในวิธีที่ 3 นั้นลดลงจนใกล้เคียงค่า C_s ของแรงลมที่นำมาเปรียบเทียบ ทำให้ระบุได้ว่าพื้นที่จังหวัดกำแพงเพชรแรงลมเมื่อ L/H มากกว่า 11 จะมีความมากกว่าแรงเฉือนแผ่นดินไหววิธีที่ 3 และยังสามารถบอกได้ว่าพื้นที่จังหวัดกำแพงเพชรเมื่อ L/H เท่ากับ 8.5 แรงเฉือนแผ่นดินไหววิธีที่ 1 จะมีความมากกว่าวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ทำให้สามารถนำมาคิดหาแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวในการออกแบบได้ แต่เมื่อค่า L/H มากขึ้น แรงลมจะมีความมากกว่าแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวเร็วกว่าพื้นที่จังหวัดเชียงราย และกาญจนบุรีเมื่อเทียบกับวิธีที่ 3

4.6 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างที่มีผลต่อแรงแผ่นดินไหวที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.6 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

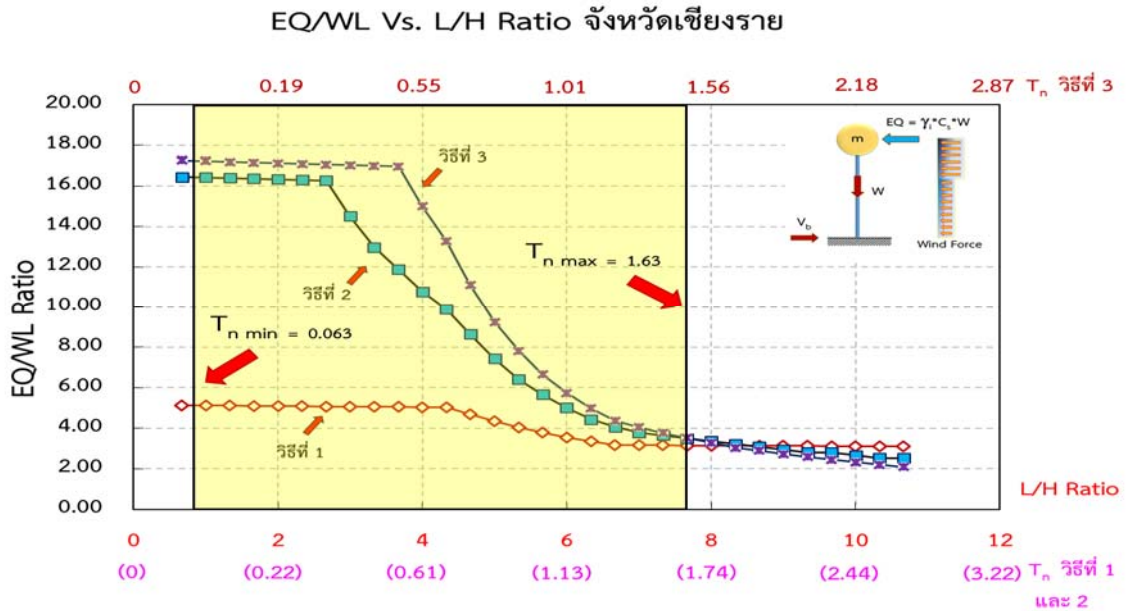
EQ FORCE VS. L/H จังหวัดกรุงเทพฯ



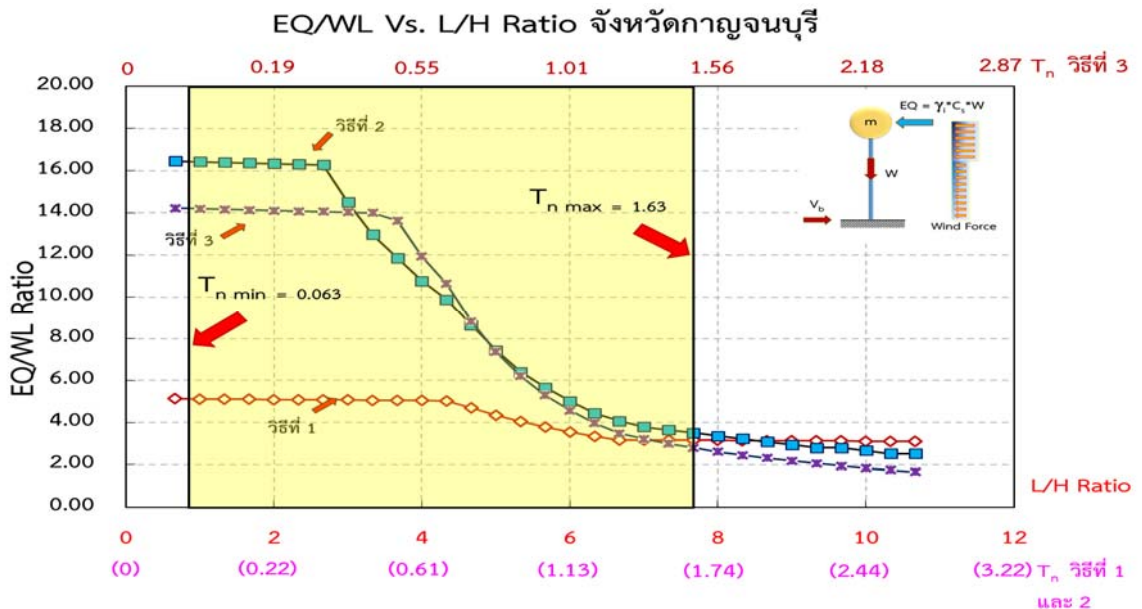
รูปที่ 4.6 (ข) กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแผ่นดินไหวกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

จากการศึกษาจังหวัดกรุงเทพมหานครจะเกิดแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวน้อยสุดในพื้นที่ 4 จังหวัดที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบ และด้วยค่าแรงที่น้อยสุดในทุกพื้นที่แต่การลดลงของค่า C_s นั้นจะลดลงเป็นเส้นตรงทำให้ค่าแรงเฉือนแผ่นดินไหวมีค่าใกล้เคียงกันระหว่างวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 การที่แรงเฉือนแผ่นดินไหววิธีที่ 1 มีค่ามากกว่าวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 จะเกิดขึ้นเมื่อค่า L/H มีค่า มากกว่า 11 ซึ่งจะเกิดเหตุการณ์นี้ซ้ำสุดใน 4 พื้นที่ที่ได้ทำการศึกษา เป็นเพราะการลดลงของค่า C_s ที่ทำให้ค่า C_s วิธีที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับวิธีที่ 1 แต่แรงลมจากกฎกระทรวงจะเหมือนกันในทุกพื้นที่เมื่อ L/H ที่มีค่ามาก ส่งผลที่ให้แรงเฉือนที่เกิดจากแรงลมตามกฎกระทรวงจะมีค่ามากกว่าแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวในทุกวิธี

4.7 เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลมกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัด

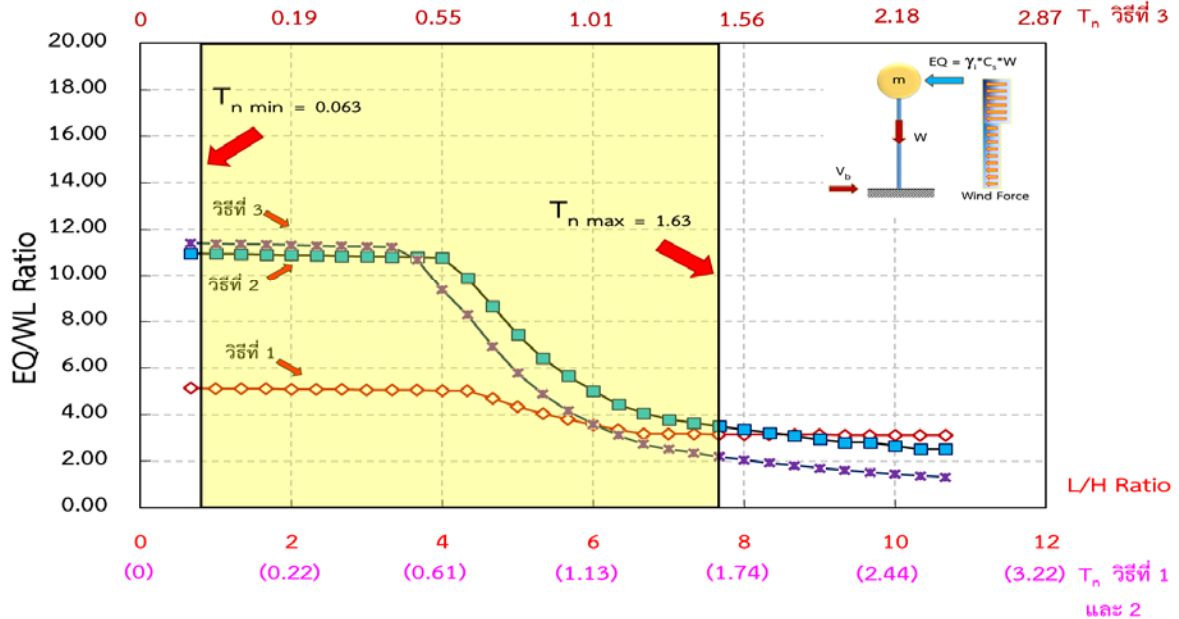


รูปที่ 4.7 (ก) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลมกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย



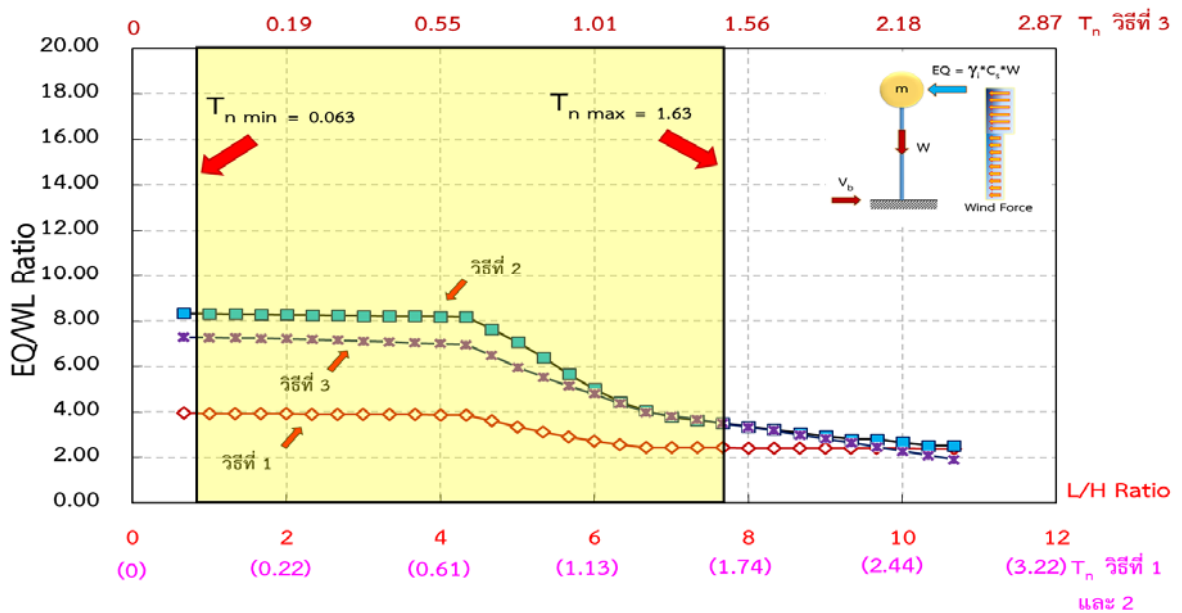
รูปที่ 4.7 (ข) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลมกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี

EQ/WL Vs. L/H Ratio จังหวัดกำแพงเพชร



รูปที่ 4.7 (ค) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลมกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร

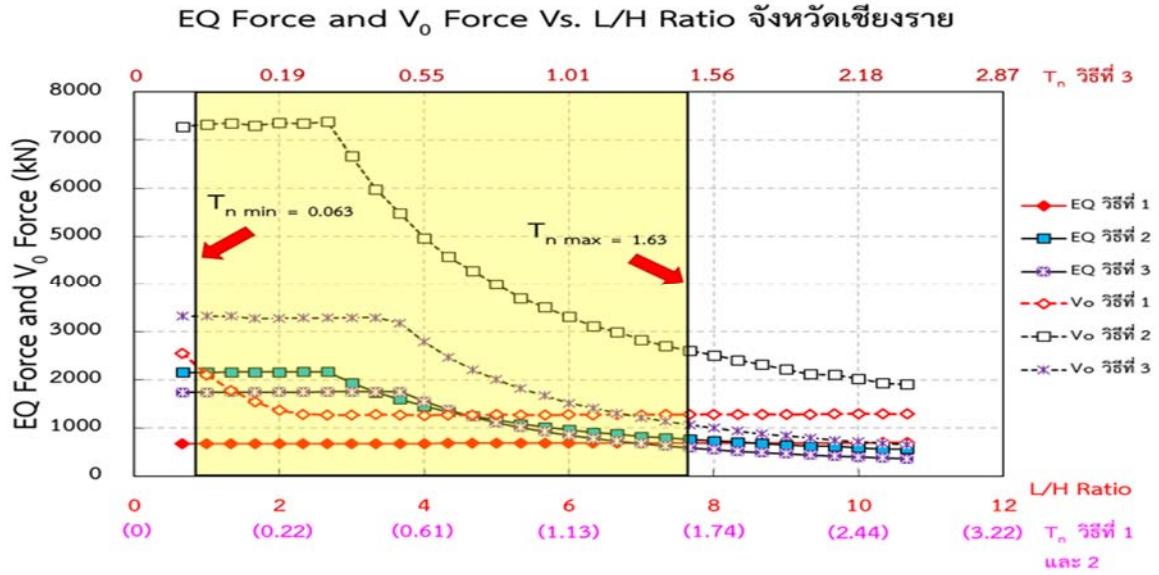
EQ/WL Vs. L/H Ratio จังหวัดกรุงเทพฯ



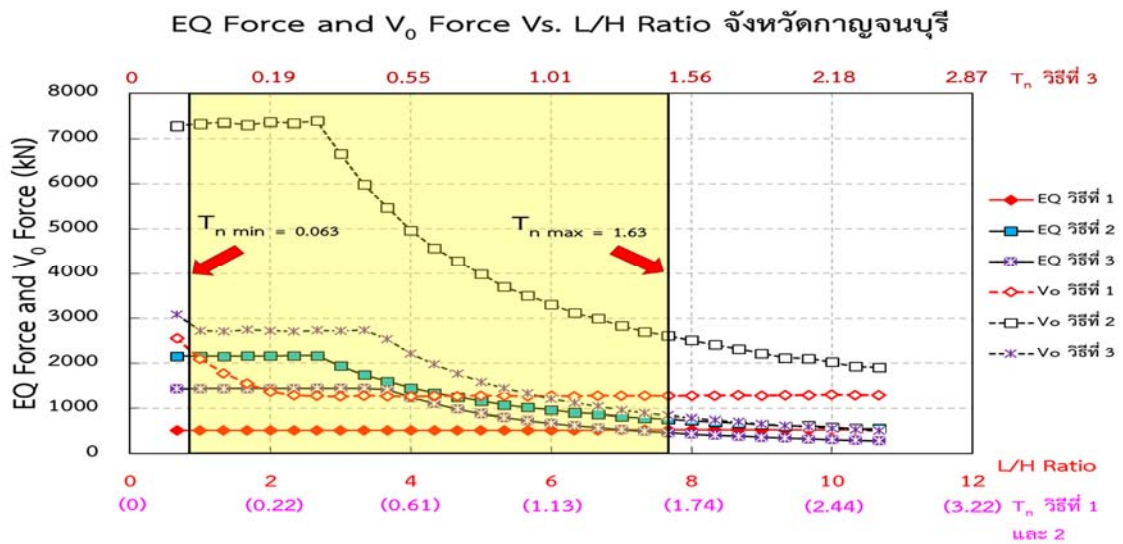
รูปที่ 4.7 (ง) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลมกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

จากกราฟการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลมกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด พบว่ามีการลดลงในทุกพื้นที่ซึ่งการลดลงจะแยกเป็น 2 แนวทางหลักคือ แรงเฉือนแผ่นดินไหวลดลงพร้อมกันกับค่าแรงเฉือนแรงลมเพิ่มขึ้นจะเกิดขึ้นกับเส้นกราฟวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ในทุกพื้นที่ อีกแนวทางคือแรงเฉือนแผ่นดินไหวมากขึ้นและค่าแรงเฉือนแรงลมมากขึ้นตามแต่การเพิ่มของแรงเฉือนจากแรงลมเพิ่มขึ้นมากกว่าซึ่งแนวทางนี้จะเกิดขึ้นกับเส้นกราฟวิธีที่ 1 ในทุกพื้นที่ ซึ่งยิ่งสนับสนุนแนวทางที่ว่าแรงลมจะมีค่ามากกว่าแรงแผ่นดินไหวเมื่อความสูงเสามีค่าที่ทำให้อัตราส่วนแรงลมมีค่าน้อยกว่า 1

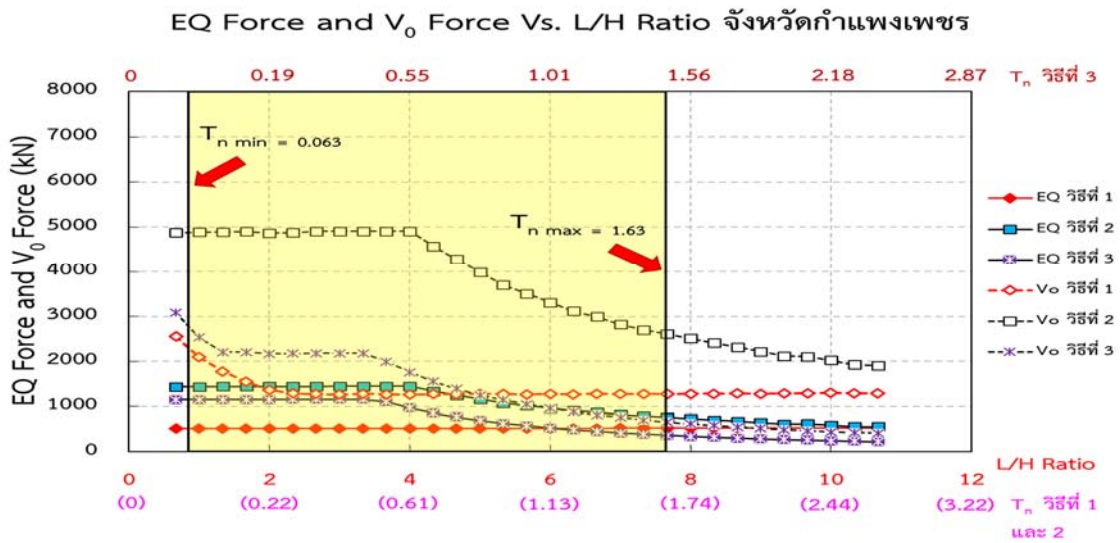
4.8 เปรียบเทียบแรงแผ่นดินไหวและแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระบุ กับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด



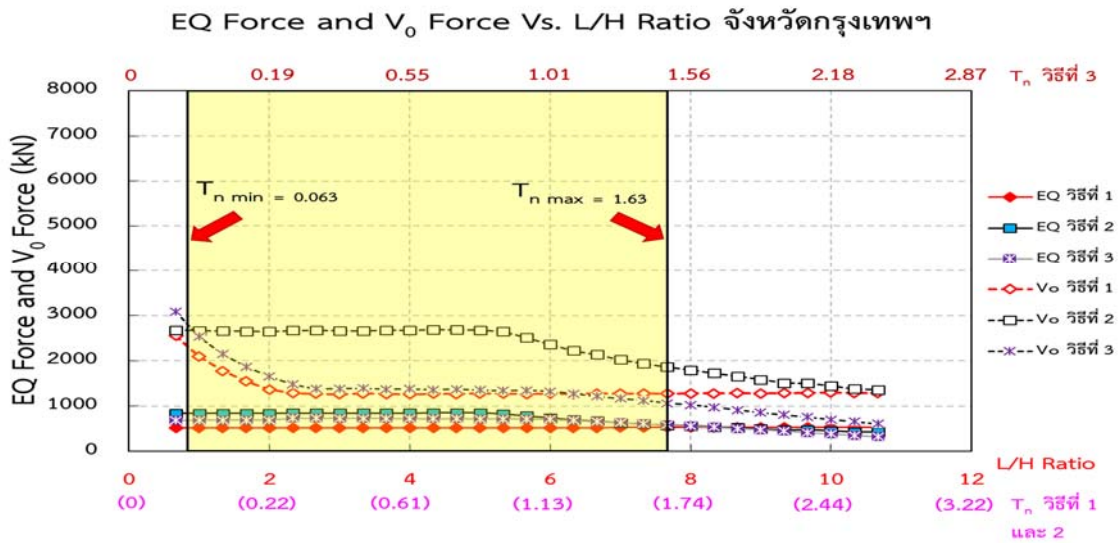
รูปที่ 4.8 (ก) กราฟเปรียบเทียบแรงแผ่นดินไหวและแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระบุ กับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 4.8 (ข) กราฟเปรียบเทียบแรงแผ่นดินไหวและแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระบุ กับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี



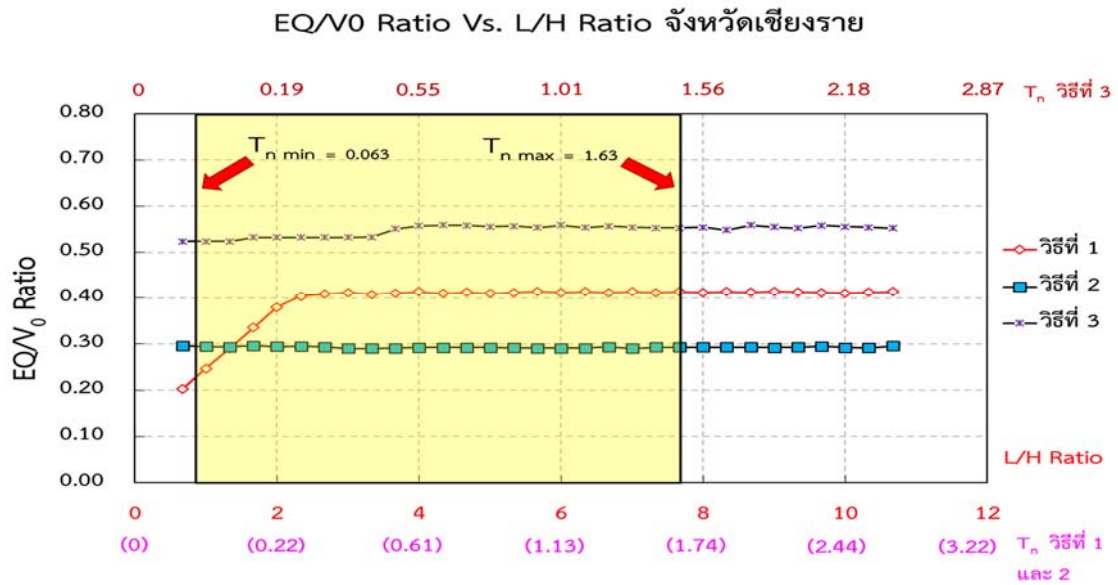
รูปที่ 4.8 (ค) กราฟเปรียบเทียบแรงแผ่นดินไหวและแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระบุ กับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร



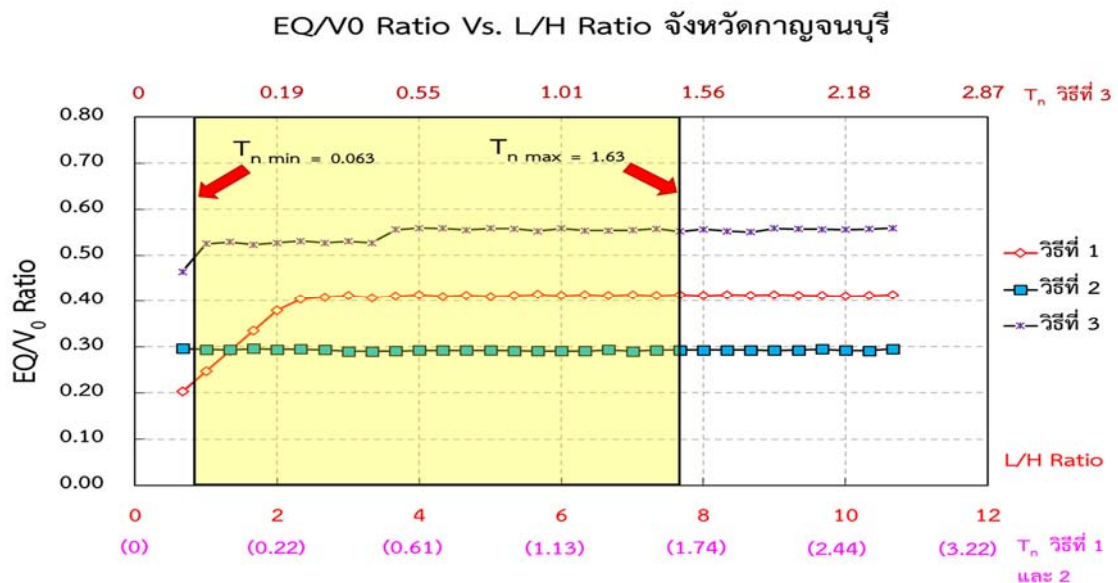
รูปที่ 4.8 (ง) กราฟเปรียบเทียบแรงแผ่นดินไหวและแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระบุ กับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

จากการศึกษาเปรียบเทียบแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวกับแรงเฉือนจากโมเมนต์ระบุ จะพบว่าทุกพื้นที่ที่ทำการศึกษาแรงเฉือนที่ได้จากโมเมนต์ระบุในการออกแบบมีค่ามากกว่าแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นดินไหว โดย จังหวัดเชียงราย จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดกำแพงเพชร สังเกตได้ว่า วิธีที่ 1 และวิธีที่ 3 นั้นมีค่าแรงที่ใกล้เคียงกัน เป็นเพราะแรงเฉือนจากโมเมนต์ระบุเกิดจากการเสริมเหล็กยื่นต่ำสุดจึงทำให้ค่าระหว่างโมเมนต์ระบุกับโมเมนต์ประลัยมีค่ามากกว่า 1 จะทำให้ค่าของแรงในช่วงที่ L/H เท่ากับ 1 จนถึง L/H เท่ากับ 3 เส้นกราฟสองวิธีนี้ไม่เป็นคู่ขนานกัน ซึ่งต่างจากวิธีที่ 2 ที่มีแรงเฉือนจากโมเมนต์ระบุมากสุดในทุกพื้นที่และเส้นกราฟยังเป็นเส้นคู่ขนานกันไปกับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหว จากกราฟเปรียบเทียบทำให้ทราบถึงแนวโน้มการตรวจสอบแรงเฉือนที่ออกแบบเหล็กปลอกรับแรงเฉือนควรมีค่าอยู่ระหว่างเส้นกราฟแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวและเส้นกราฟแรงเฉือนจากโมเมนต์ระบุ

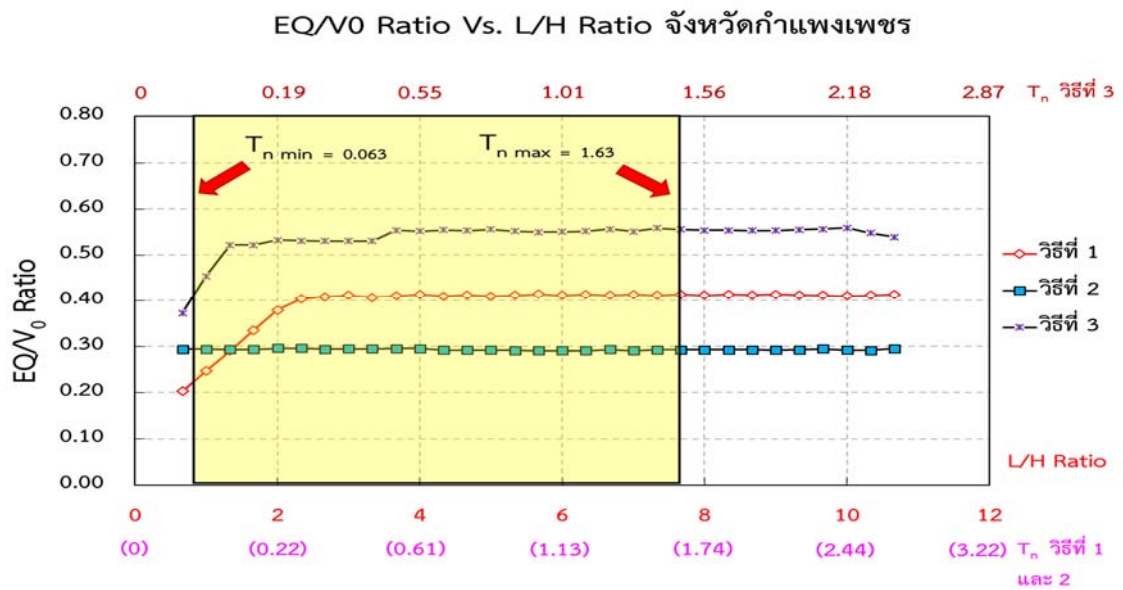
4.9 เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างแรงแผ่นดินไหวโดยตรงต่อแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์
ระบุน กับ อัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัด



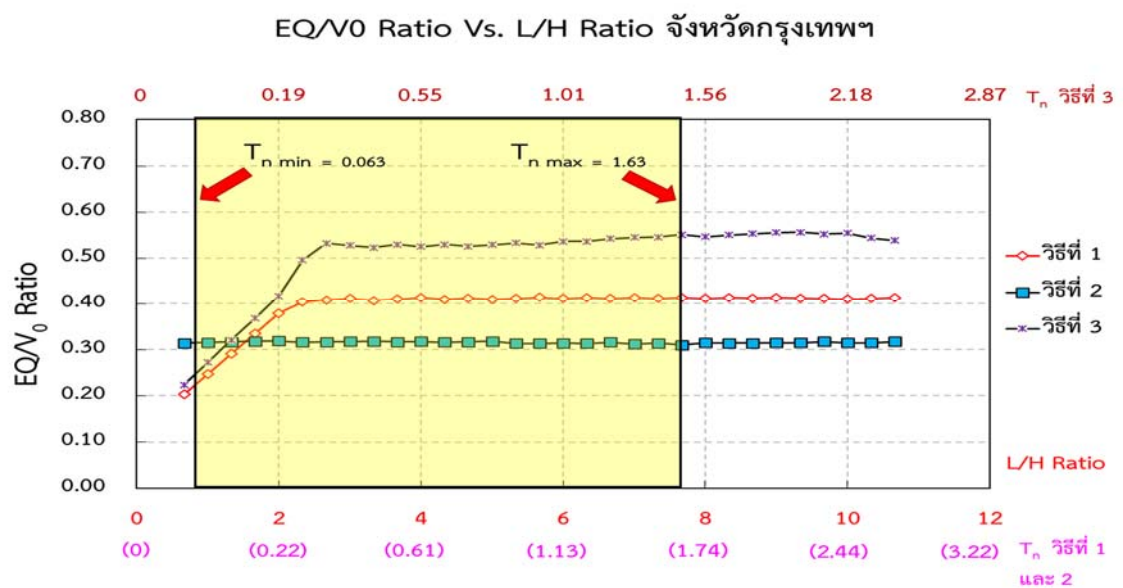
รูปที่ 4.9 (ก) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระบุน
กับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัด จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 4.9 (ข) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระบุน
กับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัด จังหวัดกาญจนบุรี



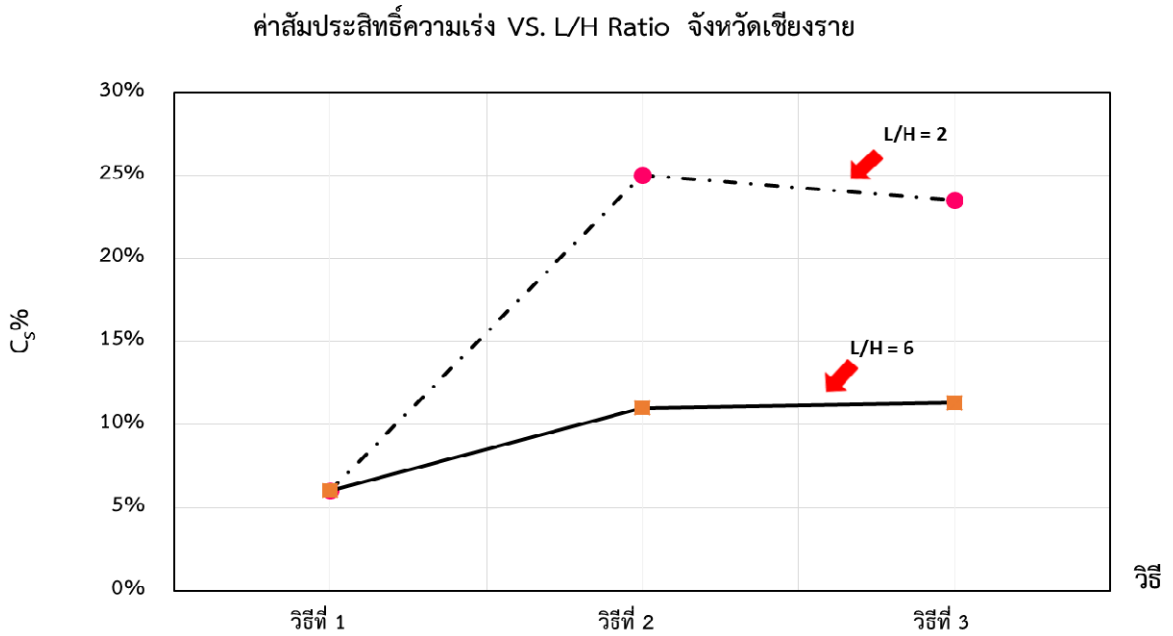
รูปที่ 4.9 (ค) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระดับ
กับอัตราส่วนความสูงเสาคู่ความยาวของหน้าตัด จังหวัดกำแพงเพชร



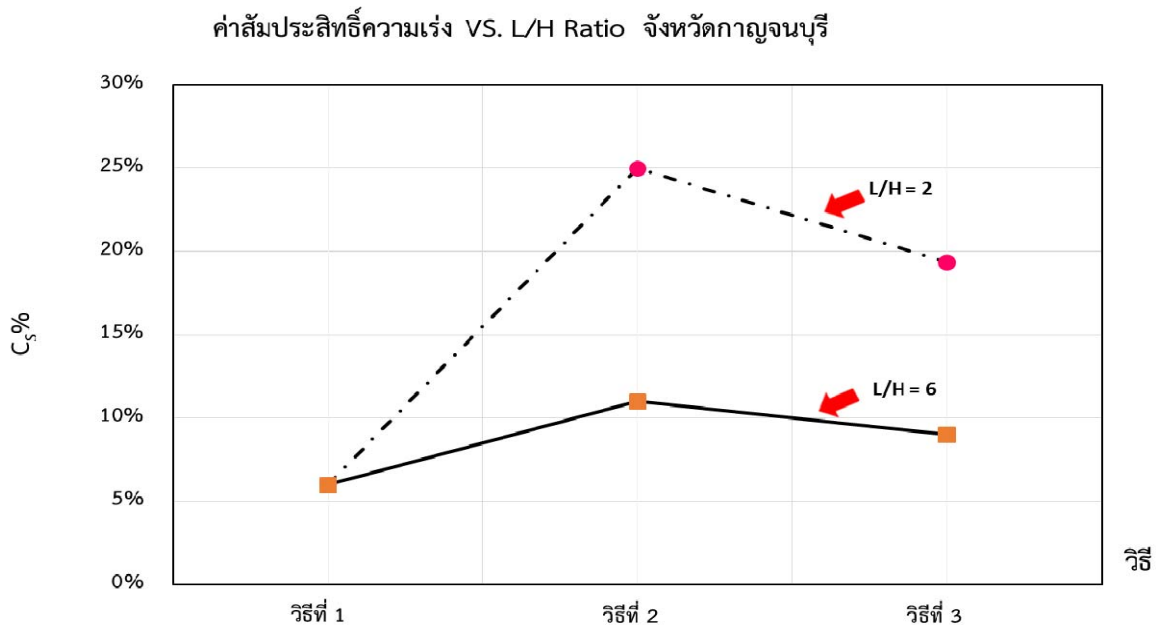
รูปที่ 4.9 (ง) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงแผ่นดินไหวจากโมเมนต์ระดับ
กับอัตราส่วนความสูงเสาคู่ความยาวของหน้าตัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร

จากการศึกษากราฟแสดงอัตราส่วนของแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวต่อแรงเฉือนที่เกิดจากโมเมนต์ระบุนในพื้นที่ศึกษาทุกจังหวัด จังหวัดเชียงราย จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดกำแพงเพชร จังหวัดกรุงเทพมหานคร พบว่าวิธีที่มีค่าคงที่ของอัตราส่วนมากที่สุดคือ วิธีที่ 2 จะอยู่ที่ 30% และวิธีที่ 1 จะอยู่ที่ 40% ดังรูปที่ 4.9 (ก)-(ง) แต่วิธีที่มีค่าความแตกต่างของอัตราส่วนคือวิธีที่ 3 เหตุเป็นเพราะจากการคิดคำนวณวัสดุที่ต้องมีการเพิ่มความแข็งแรงในการคำนวณหาโมเมนต์ระบุนำให้อัตราส่วนแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวและแรงเฉือนที่เกิดจากโมเมนต์ระบุน มากกว่าทุกวิธีและในแต่ละค่า L/H นั้นมีค่าที่ต่างกัน แต่แนวโน้มคือเมื่อมีค่า L/H มากขึ้นอัตราส่วนของแรงเฉือนแผ่นดินไหวและแรงเฉือนโมเมนต์ระบุนจะมีค่าลดลงในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี และจังหวัดกำแพงเพชร

4.10 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด

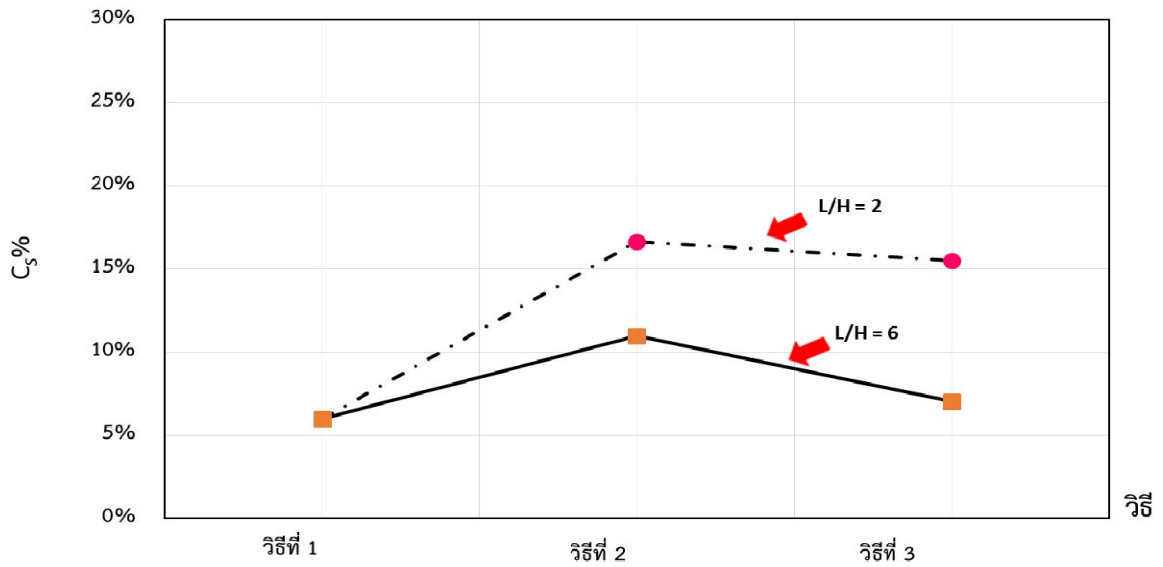


รูปที่ 4.10 (ก) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดเชียงราย



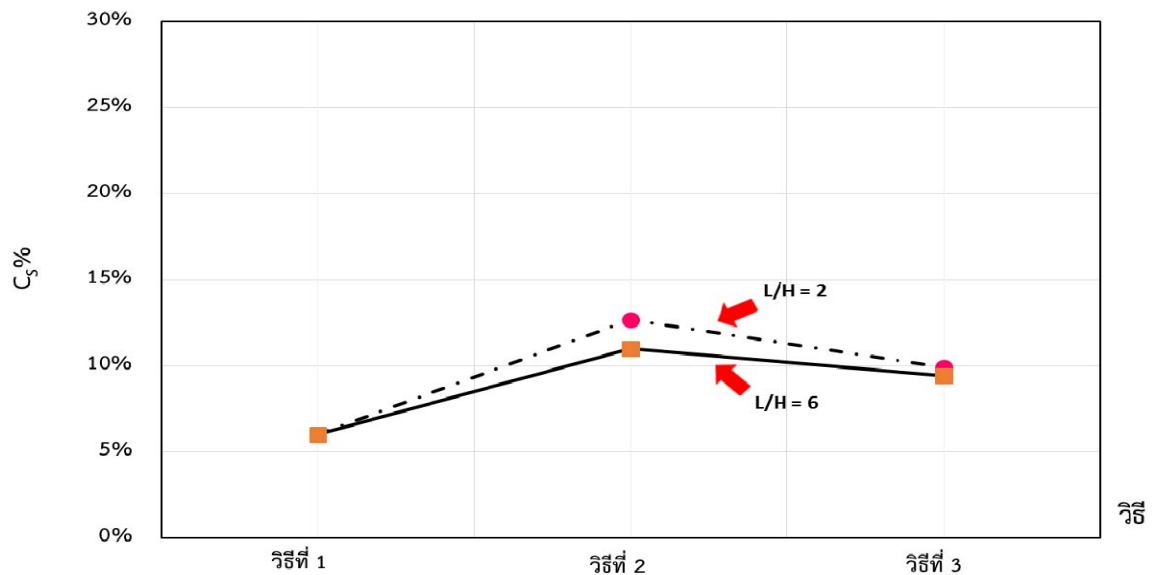
รูปที่ 4.10 (ข) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกาญจนบุรี

ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่ง VS. L/H Ratio จังหวัดกำแพงเพชร



รูปที่ 4.10 (ค) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกำแพงเพชร

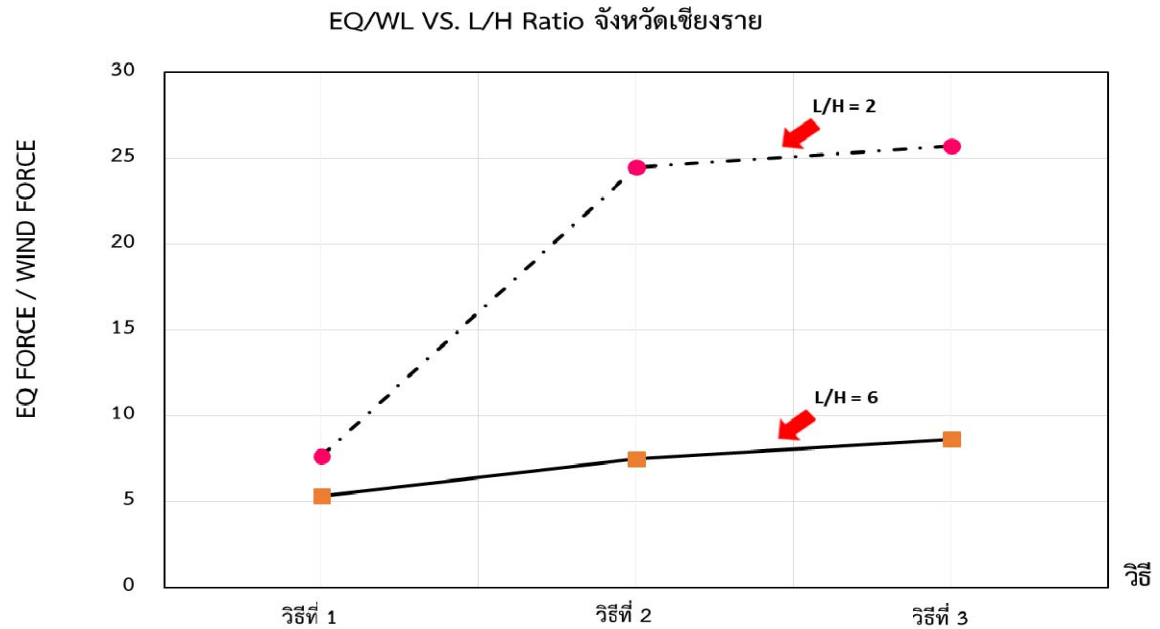
ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่ง VS. L/H Ratio จังหวัดกรุงเทพฯ



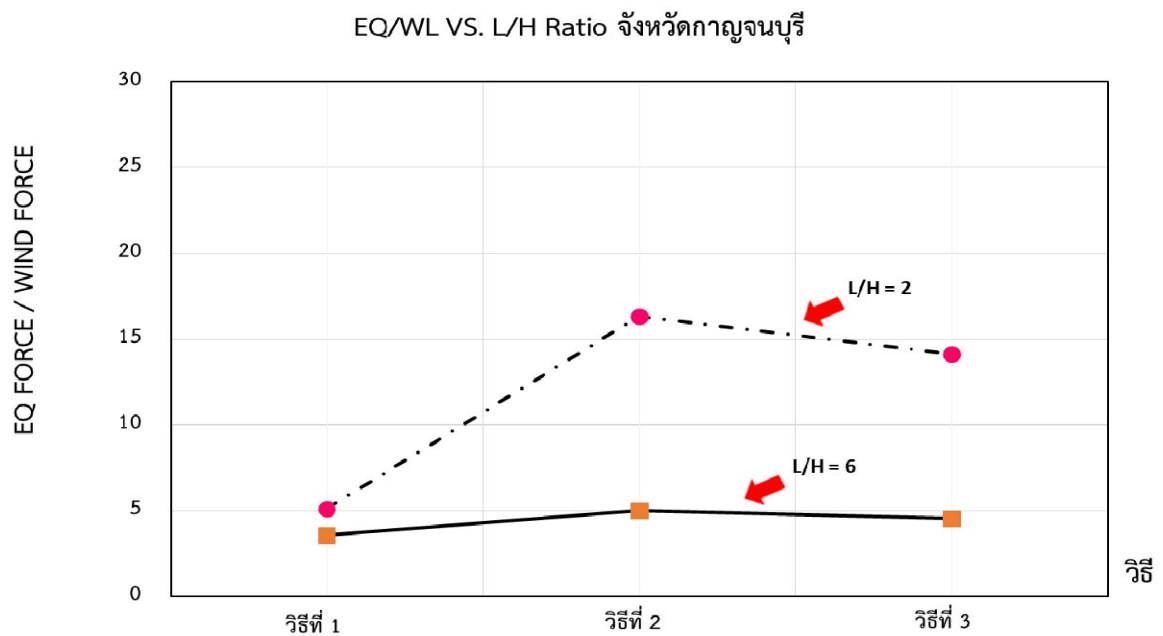
รูปที่ 4.10 (ง) กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวหน้าตัด ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง (C_s) กับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาต่อต้านยาวของหน้าตัด โดยเลือกอัตราส่วนความสูงเสาต่อต้านยาวของหน้าตัดเท่ากับ 2 และ 6 นำมาเปรียบเทียบกับกรอกแบบทั้ง 3 วิธี พบว่า ในวิธีที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งเนื่องจากโครงสร้าง (C_s) มีค่าคงที่เสมอที่ 6% ในทุกๆพื้นที่ที่ทำการศึกษ สำหรับวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 อัตราส่วนความสูงเสาต่อต้านยาวของหน้าตัดเท่ากับ 2 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง (C_s) มากกว่าจุดที่อัตราส่วนความสูงเสาต่อต้านยาวของหน้าตัดเท่ากับ 6 ดังรูปที่ 4.10 นั่นคือ ความสูงของเสามีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งเนื่องจากโครงสร้าง (C_s) โดยที่ค่าความสูงต่อความยาวของหน้าตัดยิ่งมากจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์มีค่าน้อยลง ในส่วนของพื้นที่กรุงเทพมหานคร ที่อัตราส่วนความสูงเสาต่อต้านยาวของหน้าตัดเท่ากับ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งเนื่องจากโครงสร้างใกล้เคียงกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัดเท่ากับ 6 นั้นหมายความว่า วิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ในพื้นที่กรุงเทพมหานครมีค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งที่ค่อยๆลดลงเกิดจากคาบ ทำให้สรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง (C_s) แปรผันตามความสูงเสาและคาบธรรมชาติของโครงสร้าง

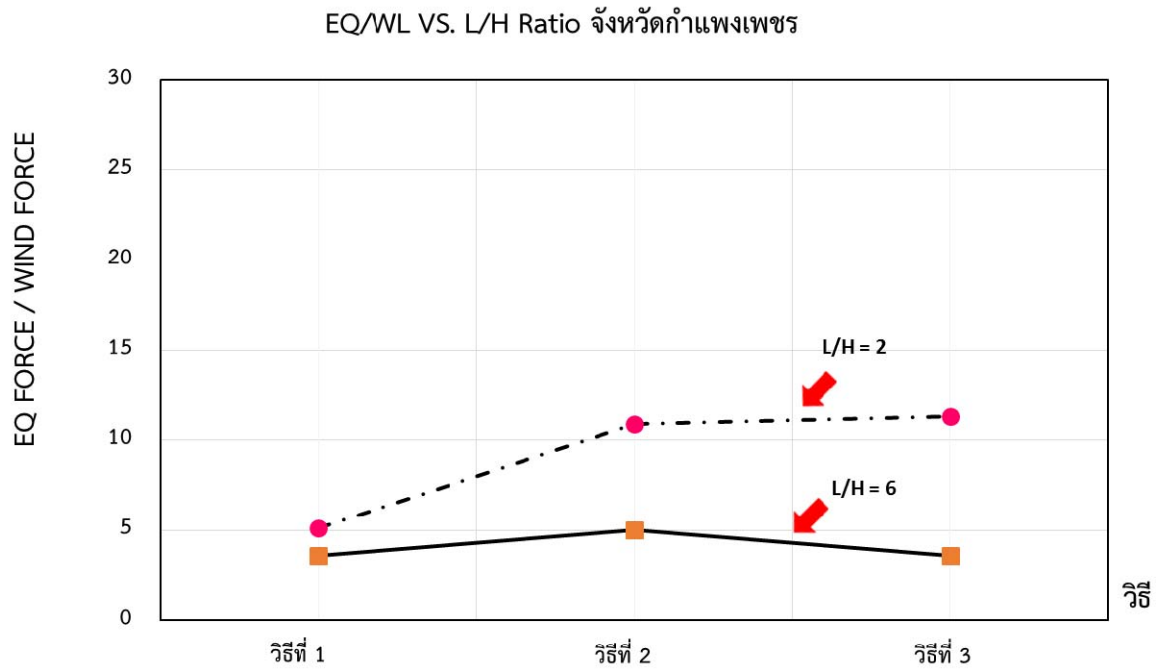
4.11 เปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลมกับอัตราส่วนความสูงเสาคือความยาวของหน้าตัดเท่ากับ 2 และ 6



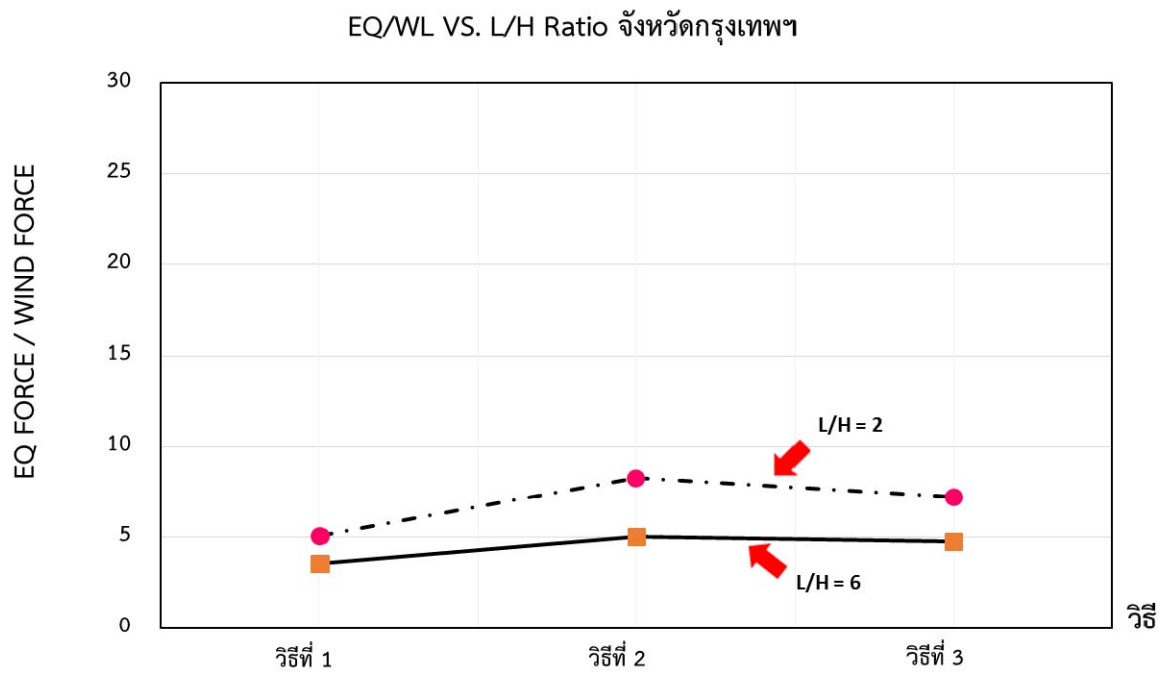
รูปที่ 4.11 (ก) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลม กับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวหน้าตัดเท่ากับ 2 และ 6 ที่จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 4.11 (ข) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลม กับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวหน้าตัดเท่ากับ 2 และ 6 ที่จังหวัดกาญจนบุรี



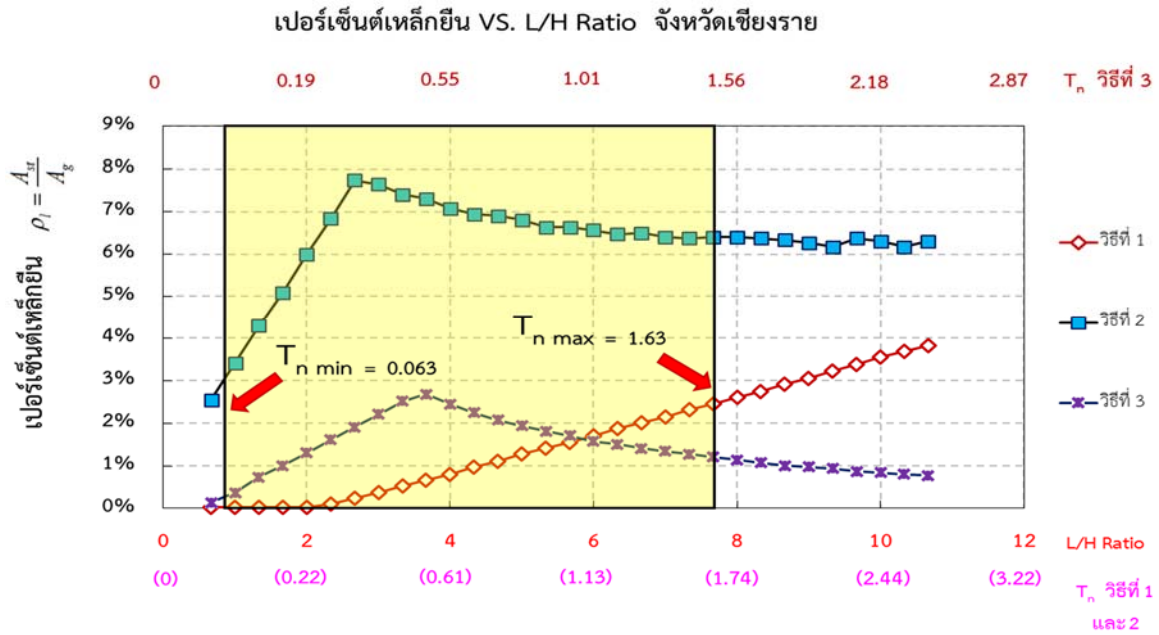
รูปที่ 4.11 (ค) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลม กับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวหน้าตัดเท่ากับ 2 และ 6 ที่จังหวัดกำแพงเพชร



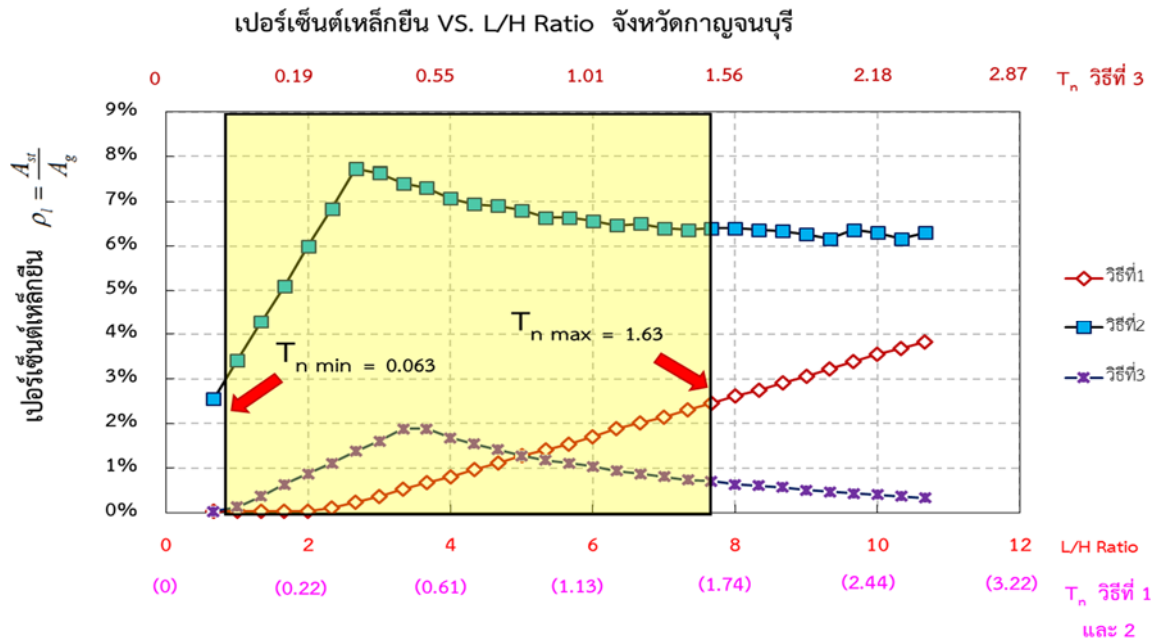
รูปที่ 4.11 (ง) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงแผ่นดินไหวต่อแรงลม กับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวหน้าตัดเท่ากับ 2 และ 6 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง EQ Force/Wind Force กับ L/H Ratio พบว่าแรงที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวมากกว่าแรงลม หากค่า L/H ratio มากขึ้นแรงลมก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่แรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวจะลดน้อยลง จนสามารถทำให้แรงลมมีค่าที่มากกว่าแรงแผ่นดินไหวได้ จากวิธีที่ 1 ค่า EQ Force/Wind Force ที่ L/H Ratio เท่ากับ 2 และ 6 มีค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่อัตราส่วนความสูงเสาคู่ต่อด้านยาวของหน้าตัดต่างกัน วิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ค่า EQ Force/Wind Force ที่ L/H Ratio เท่ากับ 2 และ 6 มีค่าที่แตกต่างกันเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่อัตราส่วนความสูงเสาคู่ต่อด้านยาวของหน้าตัดเพิ่มขึ้นทำให้แรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวมีค่าลดลง ส่วนแรงลมมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับทำให้สรุปได้ว่าความสูงมีผลต่อแรงลม โดยพื้นที่ของจังหวัดกรุงเทพมหานครแรงลมมีผลมากกว่าต่างจังหวัดในการพิจารณาแรงลม

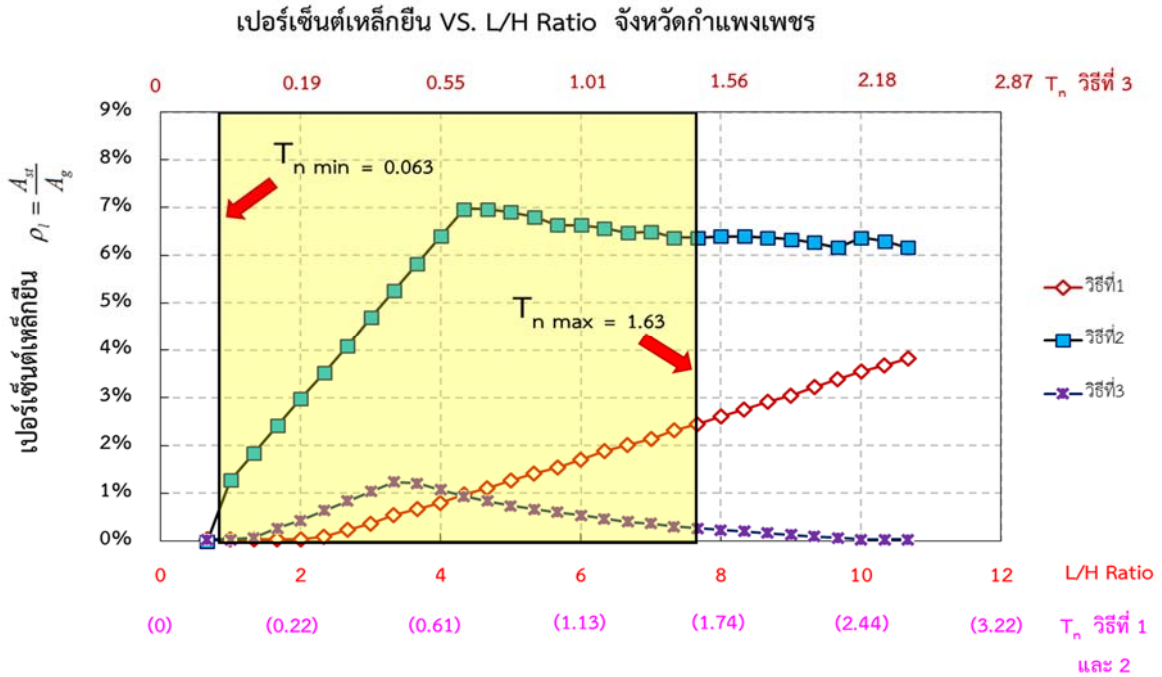
4.12 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคู่ด้านยาวของหน้าตัด



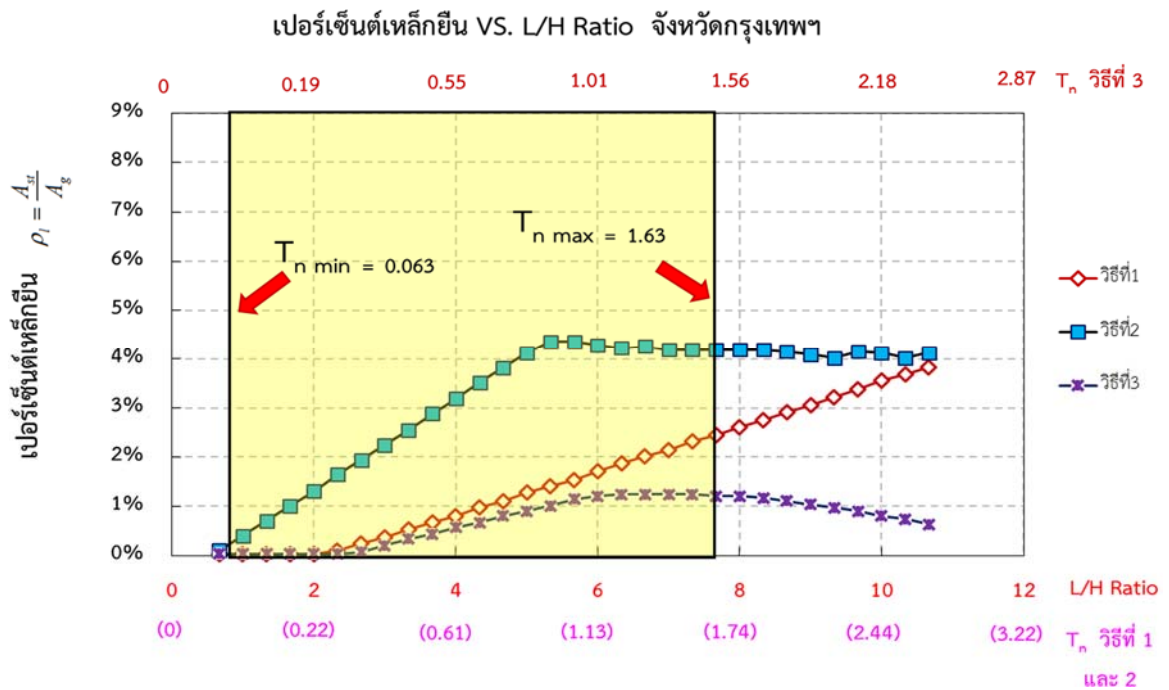
รูปที่ 4.12 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคู่ด้านยาวหน้าตัดที่จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 4.12 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคู่ด้านยาวหน้าตัดที่จังหวัดกาญจนบุรี



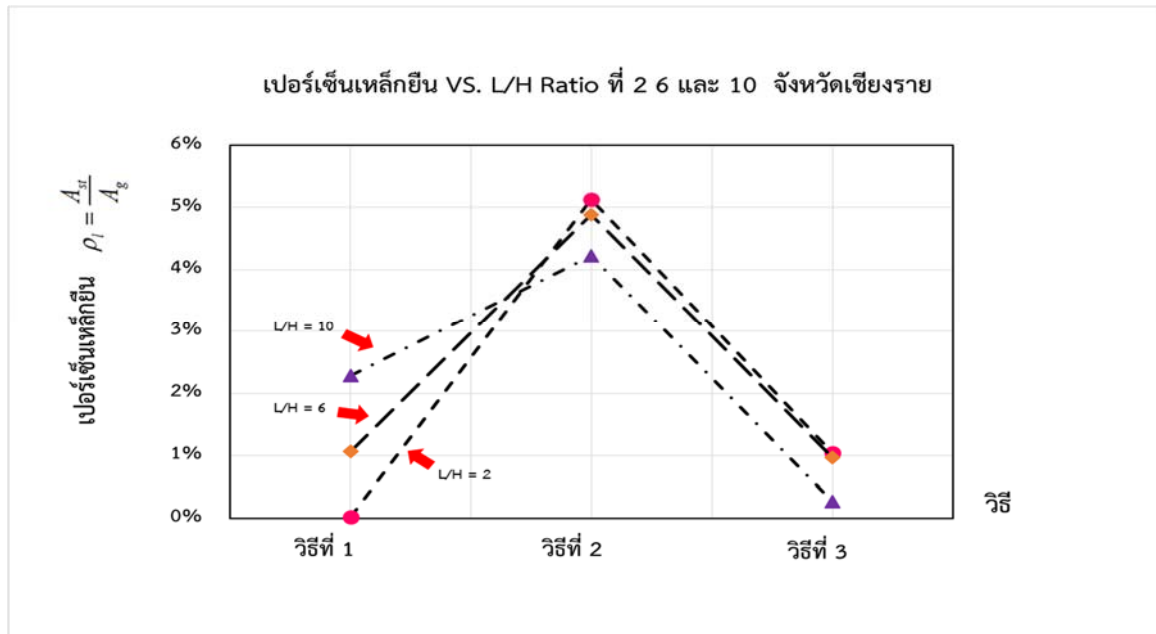
รูปที่ 4.12 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด
ที่จังหวัดกำแพงเพชร



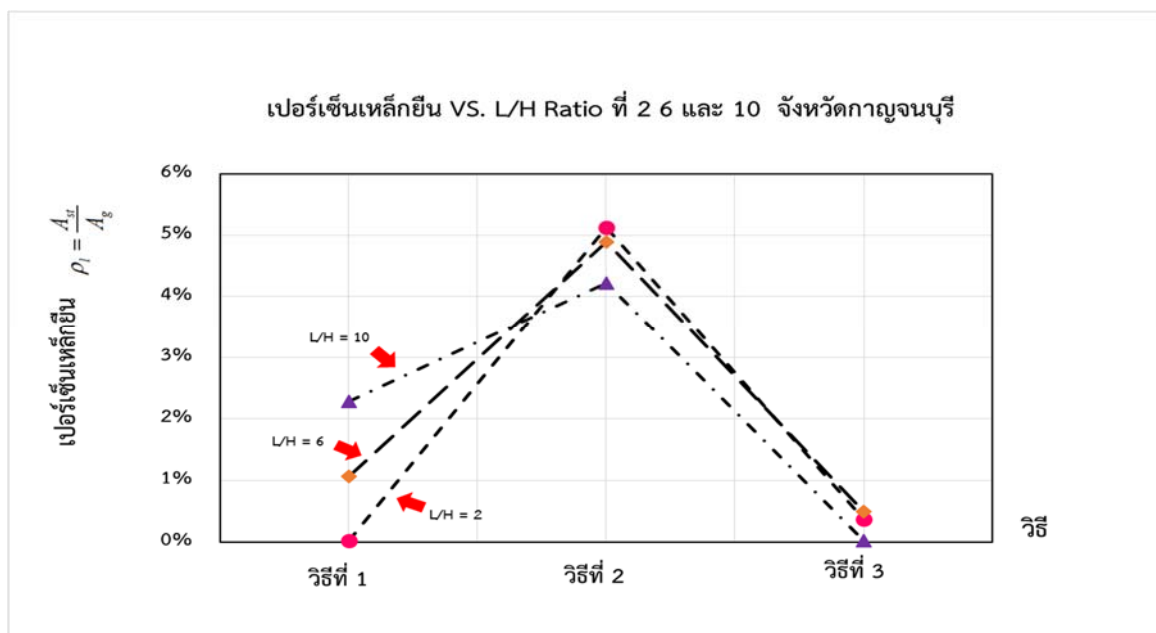
รูปที่ 4.12 (ง) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด
ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

จากการศึกษาปริมาณเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาต่อต้านยาวของหน้าตัด พบว่าวิธีที่ 2 มีค่าเปอร์เซ็นต์ของเหล็กยื่นมากที่สุดในทุกพื้นที่ที่ทำการศึกษา ทั้งจังหวัดเชียงราย กาญจนบุรี กำแพงเพชร และกรุงเทพมหานคร โดยพฤติกรรมของเส้นกราฟมีลักษณะคล้ายกับวิธีที่ 3 คือ ในช่วงแรกมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของเหล็กยื่นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดสูงสุด แล้วจึงลดปริมาณเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นลงมาดังรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของโครงสร้าง (C_s) กล่าวคือ เมื่อความสูงของเสามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงเนื่องจากโครงสร้าง (C_s) จะน้อยลง นั่นหมายความว่าแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างที่เป็นเสาสูงจะน้อยกว่าแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างที่เป็นเสาสั้น ในส่วนของการคำนวณปริมาณเปอร์เซ็นต์ของเหล็กยื่นโดยวิธีที่ 1 เส้นกราฟมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการคำนวณแรงแผ่นดินไหวใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของโครงสร้าง (C_s) คงที่ที่ 6% โดยไม่ได้พิจารณาถึงความรุนแรงของแผ่นดินไหว พิจารณาเพียงน้ำหนักของโครงสร้าง ซึ่งความสูงของโครงสร้างแปรผันตรงกับน้ำหนัก ในส่วนของวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 การคำนวณปริมาณเปอร์เซ็นต์ของเหล็กยื่นนั้น ขึ้นอยู่กับแรงแผ่นดินไหวและความสูงของโครงสร้าง ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครวิธีที่ 3 มีเส้นกราฟที่แตกต่างจากจังหวัดเชียงราย กาญจนบุรี และกำแพงเพชร เนื่องจากความสูงของโครงสร้างมีผลในการคิดหาโมเมนต์เพื่อนำไปหาเหล็กยื่น เพราะที่อัตราส่วนความสูงเสาต่อต้านยาวของหน้าตัดมีแรงแผ่นดินไหวที่แตกต่างกันน้อยมาก

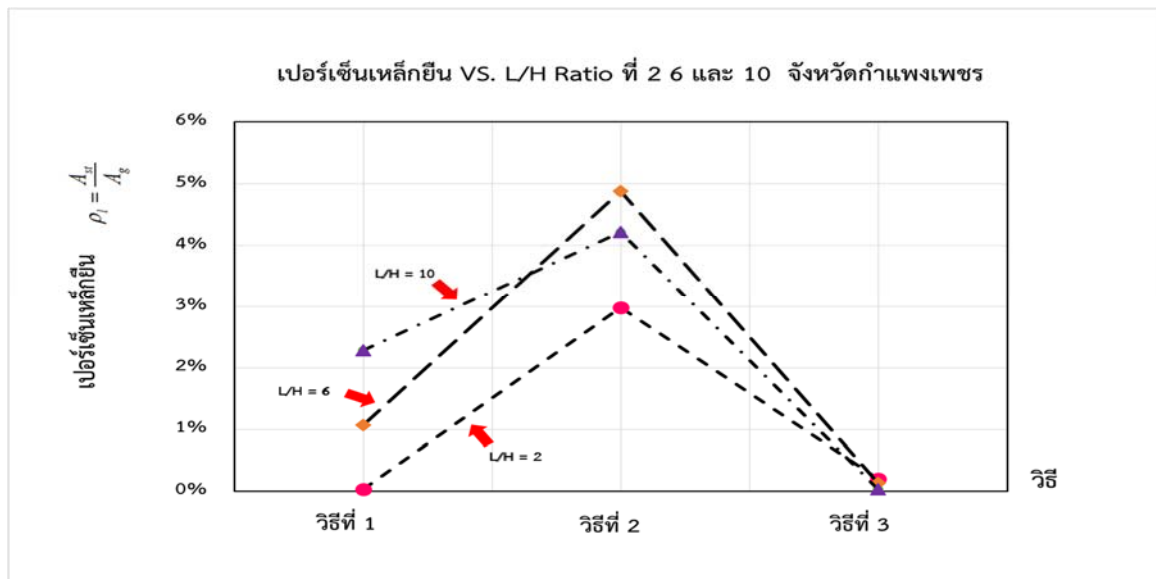
4.13 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัดที่มีค่าเท่ากับ 2 6 และ 10



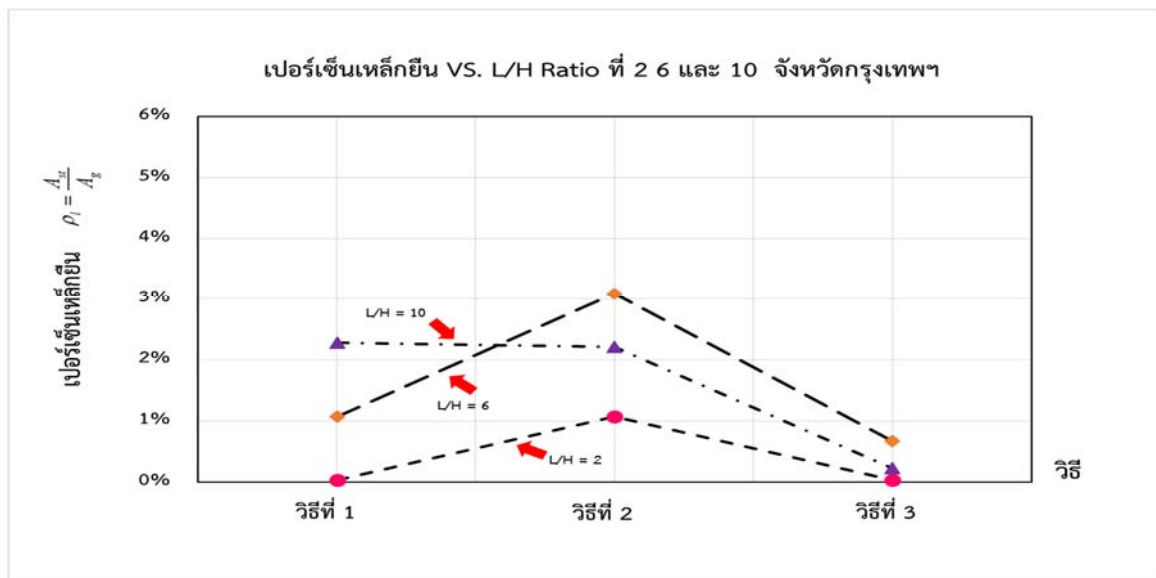
รูปที่ 4.13 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัดที่มีค่าเท่ากับ 2 6 และ 10 ที่จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 4.13 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัดที่มีค่าเท่ากับ 2 6 และ 10 ที่จังหวัดกาญจนบุรี



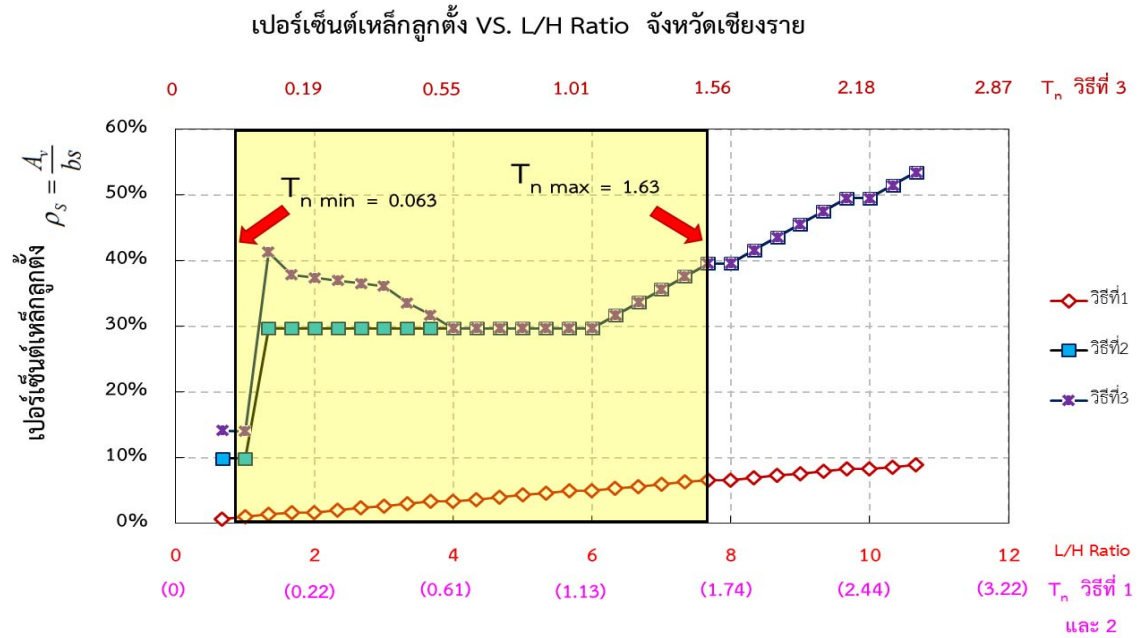
รูปที่ 4.13 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัดที่มีค่าเท่ากับ 2 6 และ 10 ที่จังหวัดกำแพงเพชร



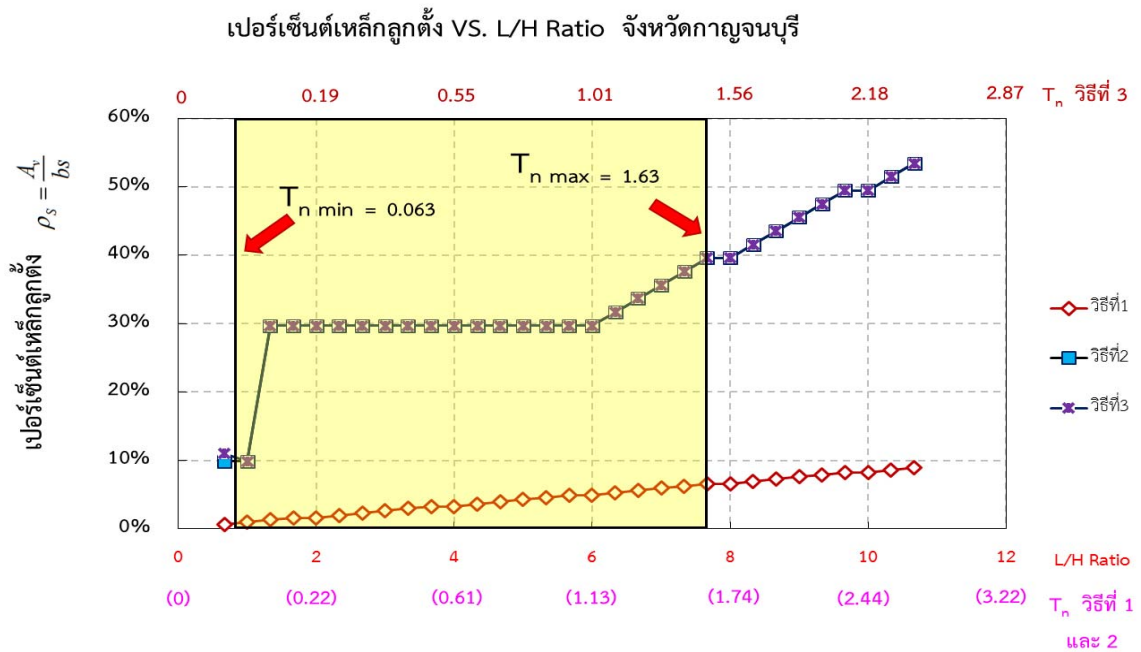
รูปที่ 4.13 (ง) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัดที่มีค่าเท่ากับ 2 6 และ 10 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่น กับ L/H ratio จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นของวิธีที่ 1 ที่ L/H ratio เท่ากับ 2 6 และ 10 จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากที่อัตราส่วนความสูงเสาต่อต้านยาวของหน้าตัดที่แตกต่างกัน น้ำหนักของโครงสร้างและแรงแผ่นดินไหวมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นที่ได้ขึ้นอยู่กับแรงแผ่นดินไหว ส่วนวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 เปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นที่ L/H ratio เท่ากับ 2 6 และ 10 จะมีค่าน้อยลงตามลำดับ เฉพาะพื้นที่จังหวัดเชียงรายและกาญจนบุรีเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวมีผลต่อเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่น เพราะแรงแผ่นดินไหวที่อัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัดมีค่าที่แตกต่างกันมาก ส่วนพื้นที่จังหวัดกำแพงเพชรและกรุงเทพมหานครเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่นที่ L/H ratio เท่ากับ 6 10 และ 2 จะมีค่าน้อยลงตามลำดับ เนื่องจากความสูงของโครงสร้าง

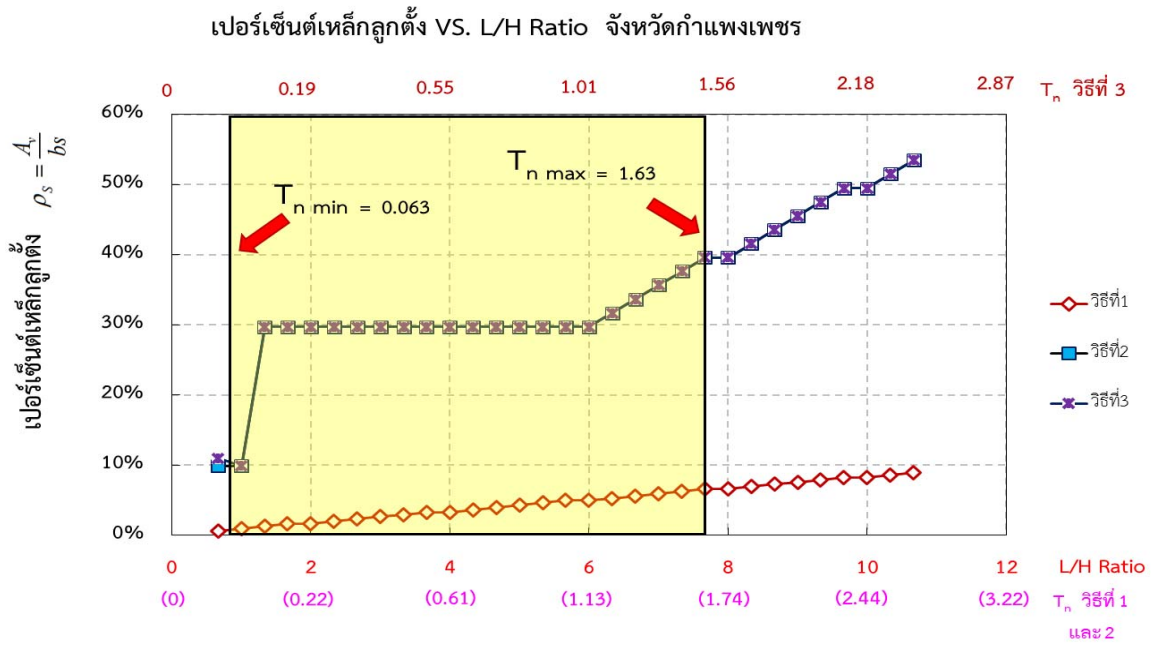
4.14 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัด



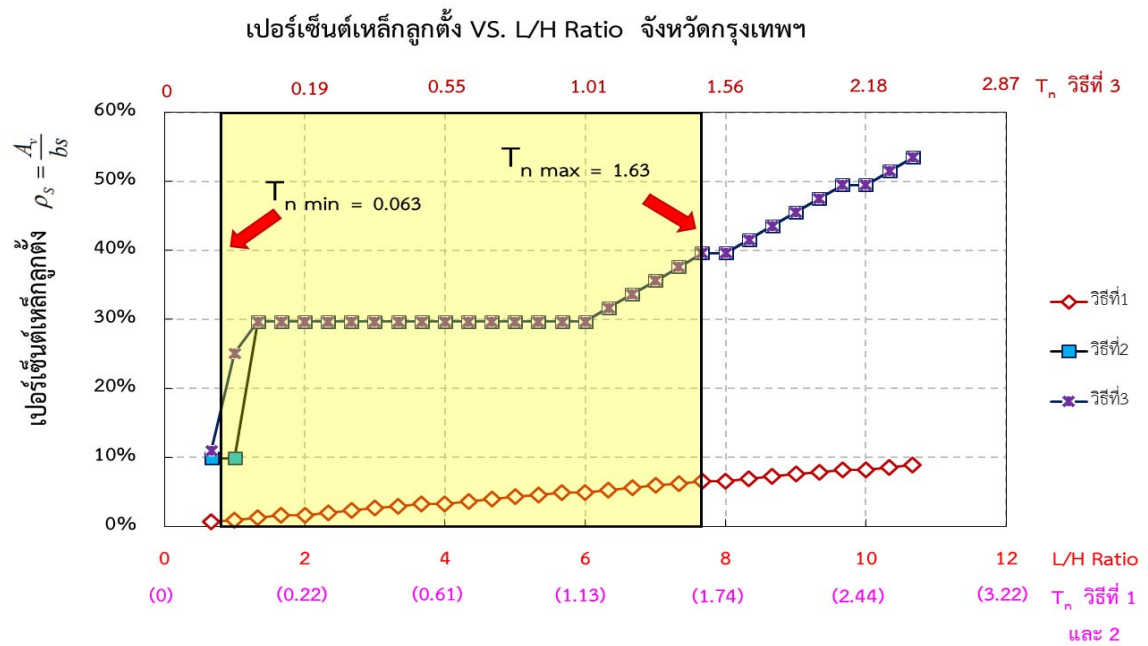
รูปที่ 4.14 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัดที่จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 4.14 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัดที่จังหวัดกาญจนบุรี



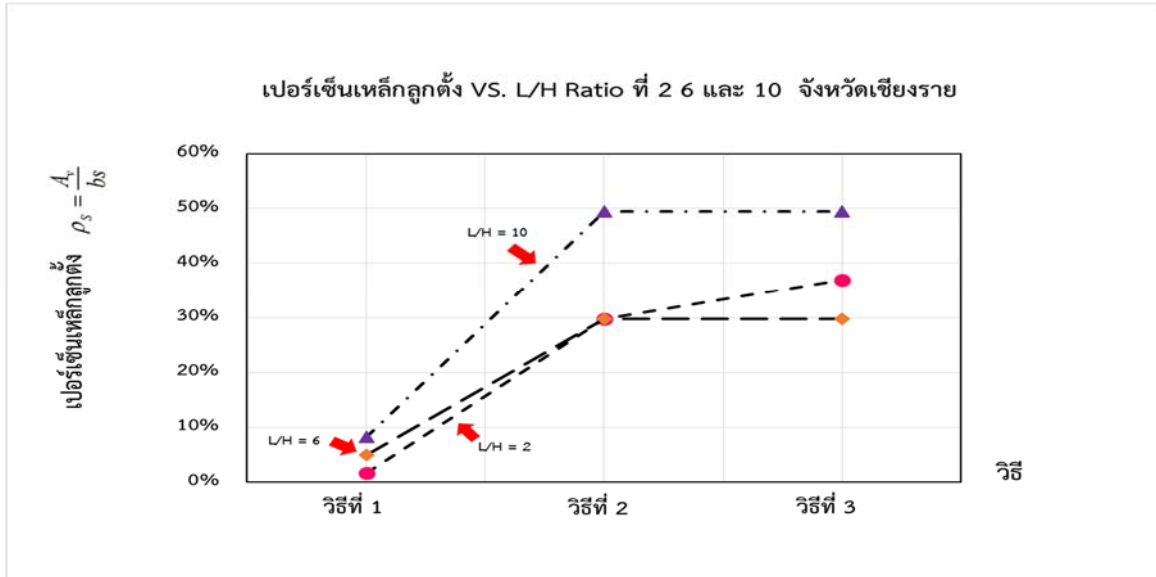
รูปที่ 4.14 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวหน้าตัดที่จังหวัดกำแพงเพชร



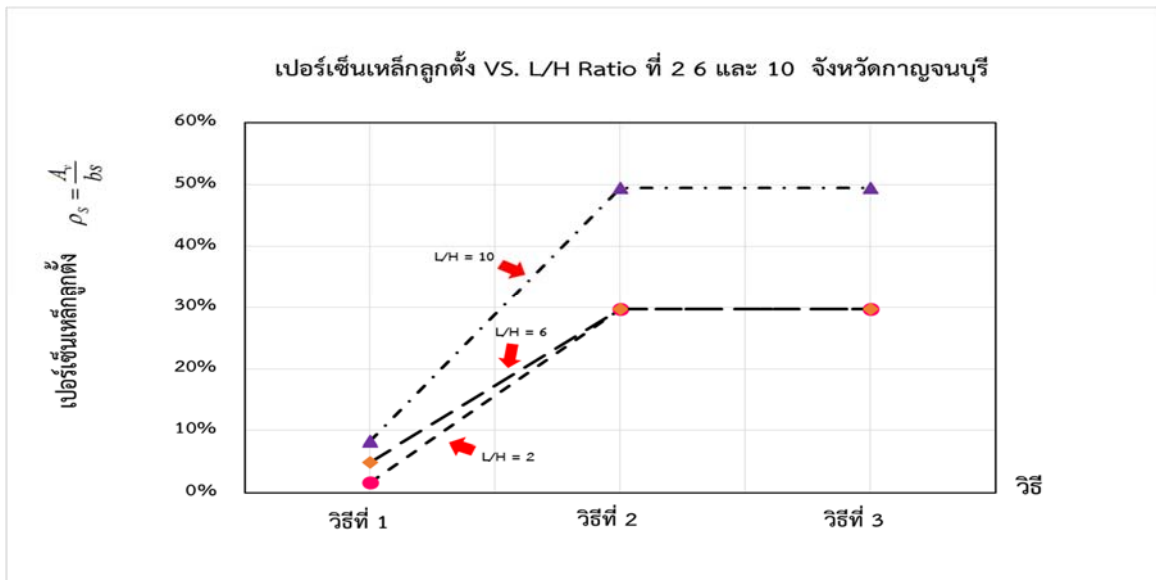
รูปที่ 4.14 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวหน้าตัดที่จังหวัดเชียงราย

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอม กับ L/H ratio พบว่า ในช่วงแรกที่ L/H ratio มีค่าน้อย เปอร์เซ็นต์เหล็กปลอมของวิธีที่ 1 น้อยกว่าวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ตามลำดับ โดยที่ค่า เปอร์เซ็นต์เหล็กปลอมของวิธีที่ 1 จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.14 เนื่องจากแรง แผ่นดินไหวแปรผันตรงกับความสูงของเสา เมื่อมีความสูงมาก แรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างก็จะมีมากขึ้น ทำให้กราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความสูงที่เปลี่ยนแปลงไป ส่วนวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 เปอร์เซ็นต์เหล็กปลอมช่วงแรกที่มีค่าประมาณ 10% – 15% เนื่องจากเสาดำทำให้ระยะจุดหมุนพลาสติกที่ใช้มีค่า 450 มิลลิเมตร ถัดมาเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอมเพิ่มขึ้นและคงที่เนื่องจากความสูงเสาที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะจุดหมุนพลาสติกที่ใช้กำหนดโดยความกว้างหน้าตัดด้านที่มากที่สุด หลังจากนั้นก็ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากความสูงเสาที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะจุดหมุนพลาสติกที่ใช้กำหนดโดยหนึ่งส่วนหกของความสูงเสา ทั้งนี้ข้อกำหนดระยะจุดหมุนพลาสติกที่นำมาใช้นี้ได้ศึกษามาจากคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกระทรวงคมนาคม

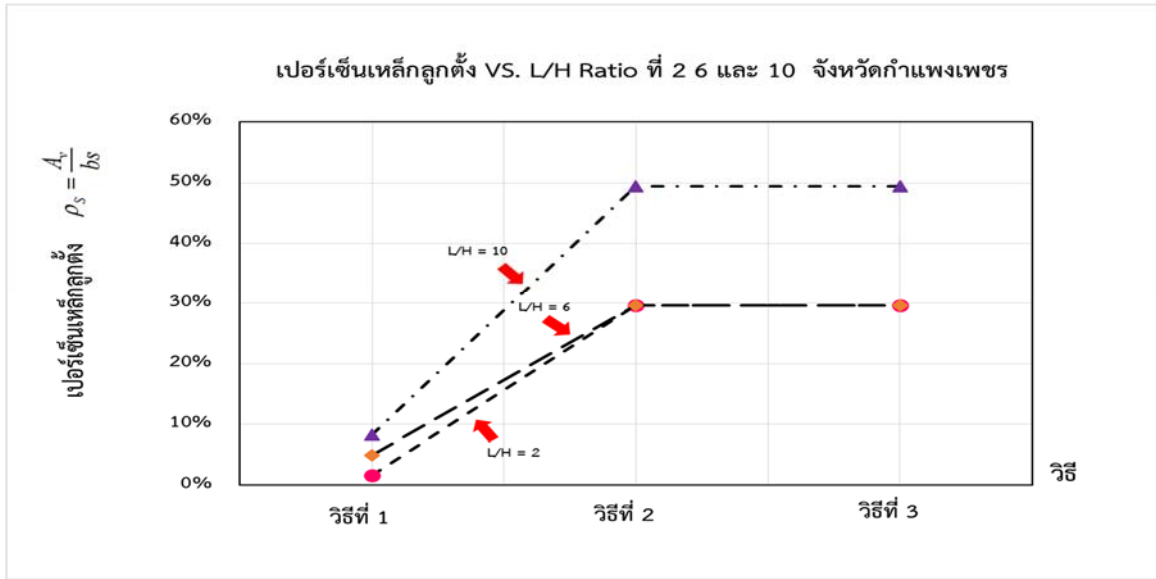
4.15 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัดที่มีค่าเท่ากับ 2 6 และ 10



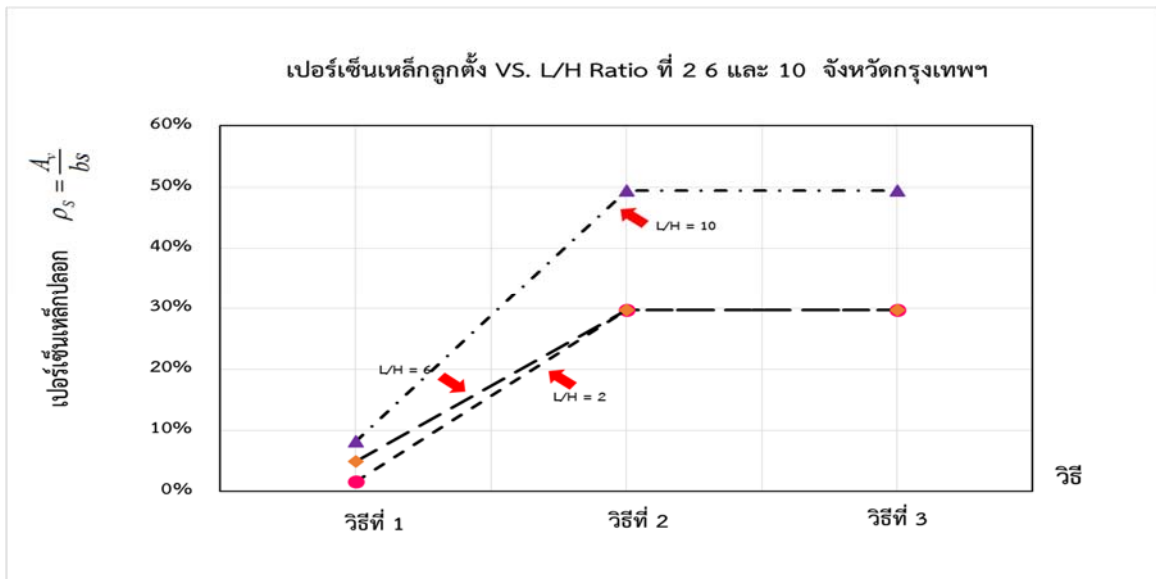
รูปที่ 4.15 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัดที่มีค่าเท่ากับ 2 6 และ 10 ที่จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 4.15 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาต่อความยาวของหน้าตัดที่มีค่าเท่ากับ 2 6 และ 10 ที่จังหวัดกาญจนบุรี



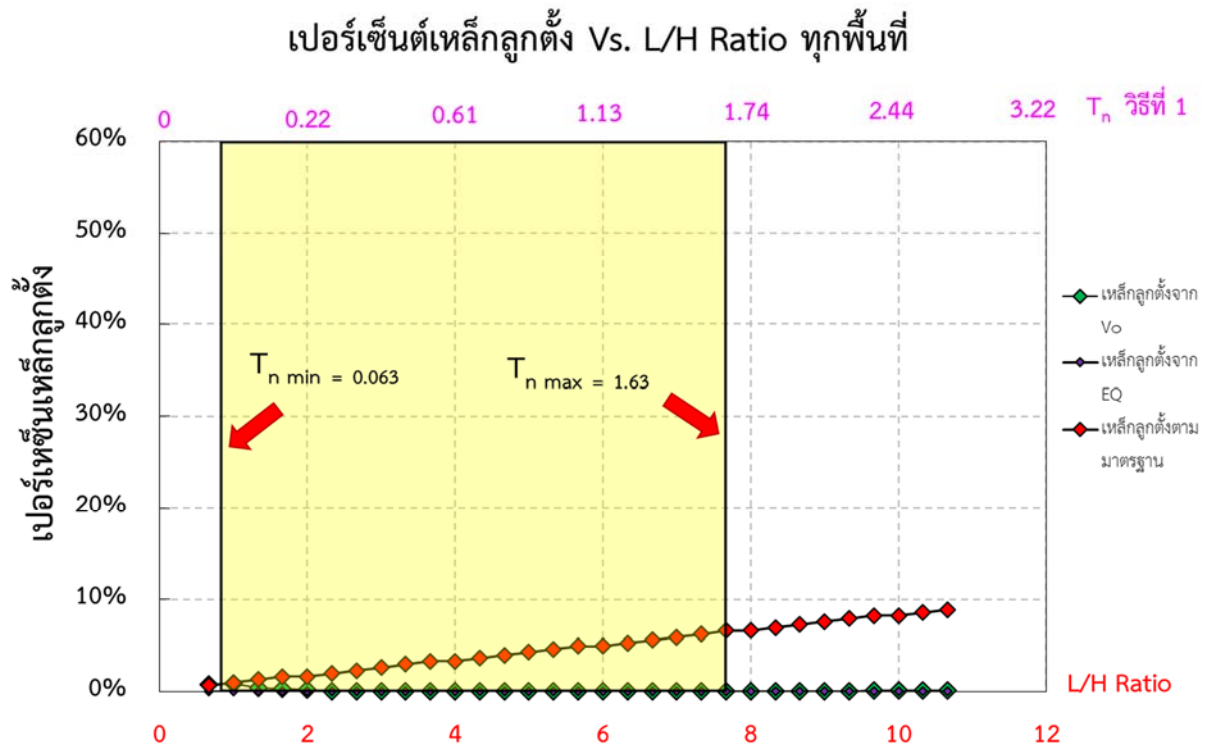
รูปที่ 4.15 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัดที่ค่าเท่ากับ 2 6 และ 10 ที่จังหวัดกำแพงเพชร



รูปที่ 4.15 (ง) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวของหน้าตัดที่ค่าเท่ากับ 2 6 และ 10 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอม กับ L/H ratio พบว่าเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอมของวิธีที่ 1 ที่ L/H ratio เท่ากับ 2 6 และ 10 จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนวิธีที่ 2 เปอร์เซ็นต์เหล็กปลอมที่ L/H ratio เท่ากับ 2 6 จะมีค่าที่เท่ากัน เนื่องจากระยะการเรียงเหล็กปลอมมีระยะเรียงที่เท่ากัน ทำให้เปอร์เซ็นต์เหล็กปลอมมีค่าที่เท่ากัน ส่วนเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอมที่ L/H ratio เท่ากับ 10 มีค่ามากกว่าที่ L/H ratio เท่ากับ 2 6 เนื่องจากระยะของการเรียงเหล็กปลอมมีระยะเรียงที่น้อยกว่า ทำให้เปอร์เซ็นต์เหล็กปลอมมีค่ามากขึ้นเพราะมีจำนวนเหล็กที่แตกต่างกัน

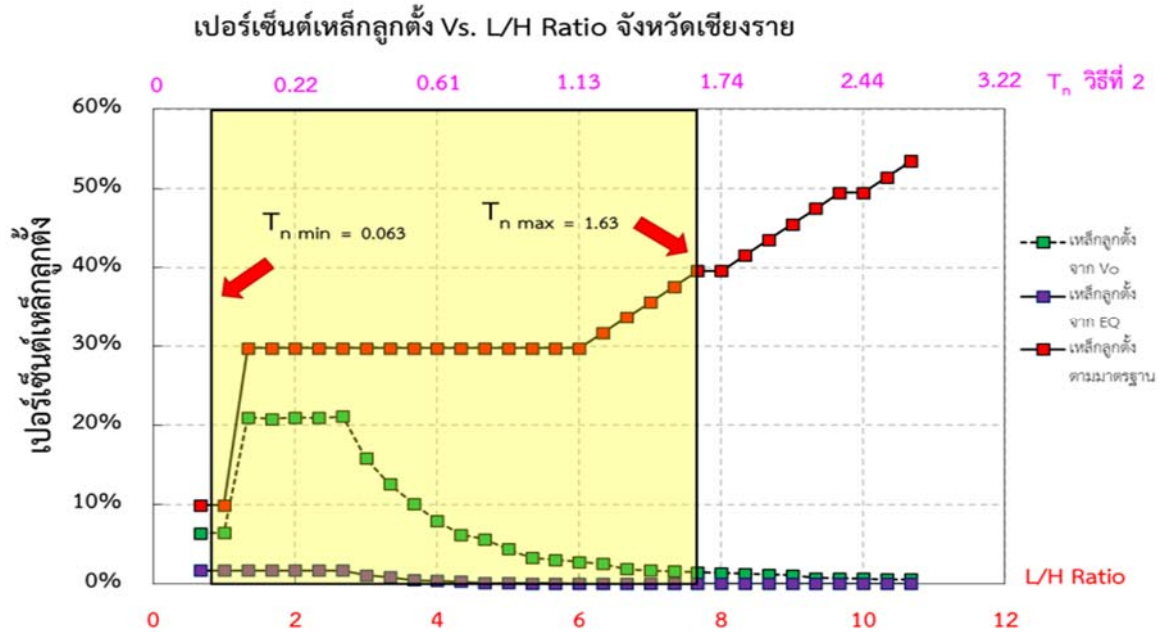
4.16 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความยาวของหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 1



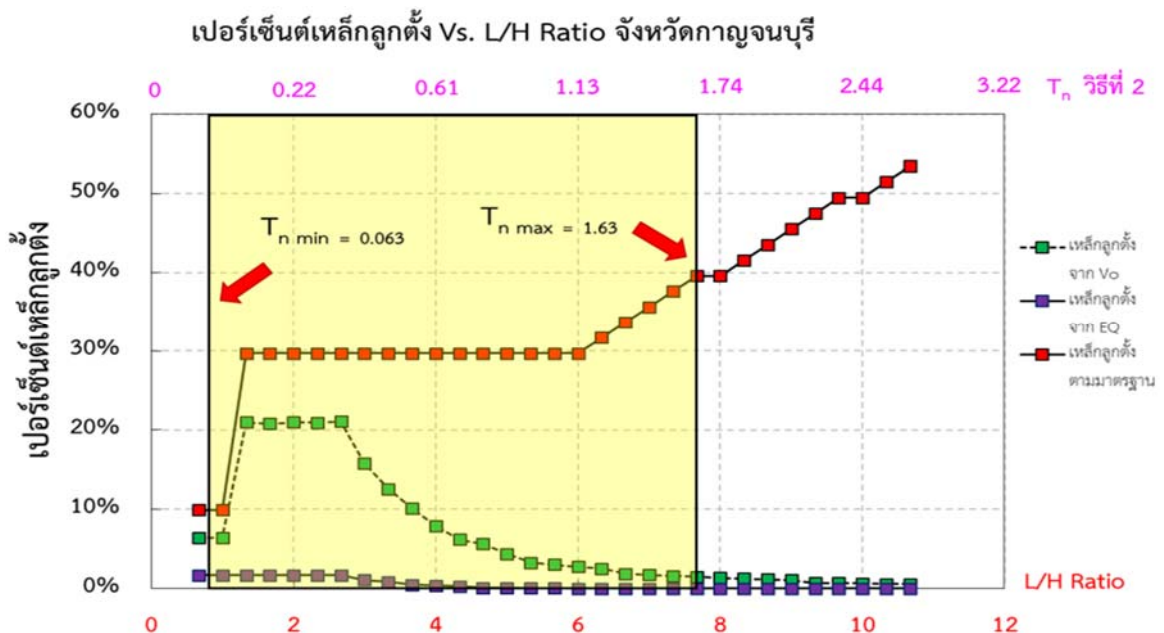
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาคู่ต่อความยาวของหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 1

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาคู่ต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 1 ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณเหล็กปลอกที่คำนวณได้จาก (1) แรงเฉือนจากโมเมนต์ระบู่ (2) แรงเฉือนจากแผ่นดินไหว และ (3) การเสริมเหล็กปลอกตามมาตรฐาน AASHTO Standard 1973 พบว่าการเสริมเหล็กปลอกจากแรงเฉือนจากโมเมนต์ระบู่และแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวมีค่าน้อยมากจนเท่ากับ 0 แสดงให้เห็นว่าไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงแรงเฉือนที่มากกระทำต่อเสา เนื่องจากมีค่าน้อยกว่าการเสริมแรงขั้นต่ำตามที่มาตรฐานกำหนด ในขณะที่การเสริมแรงตามมาตรฐานกำหนดนั้น ปริมาณเหล็กปลอกแปรผันตรงกับความสูงเสาคู่ ยิ่งเสาคู่มีความสูงมาก เหล็กปลอกจึงมีมากตามไปด้วย ซึ่งถูกควบคุมโดยระยะเรียงที่คงที่คือ 600 มิลลิเมตร

4.17 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวของหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2

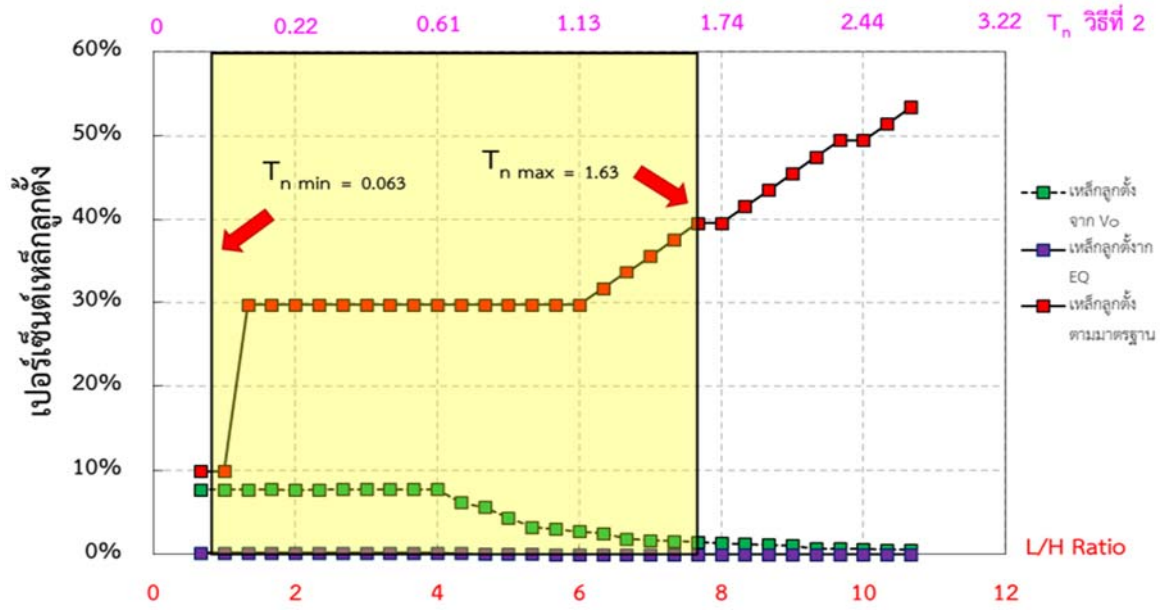


รูปที่ 4.17 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2 ที่จังหวัดเชียงราย



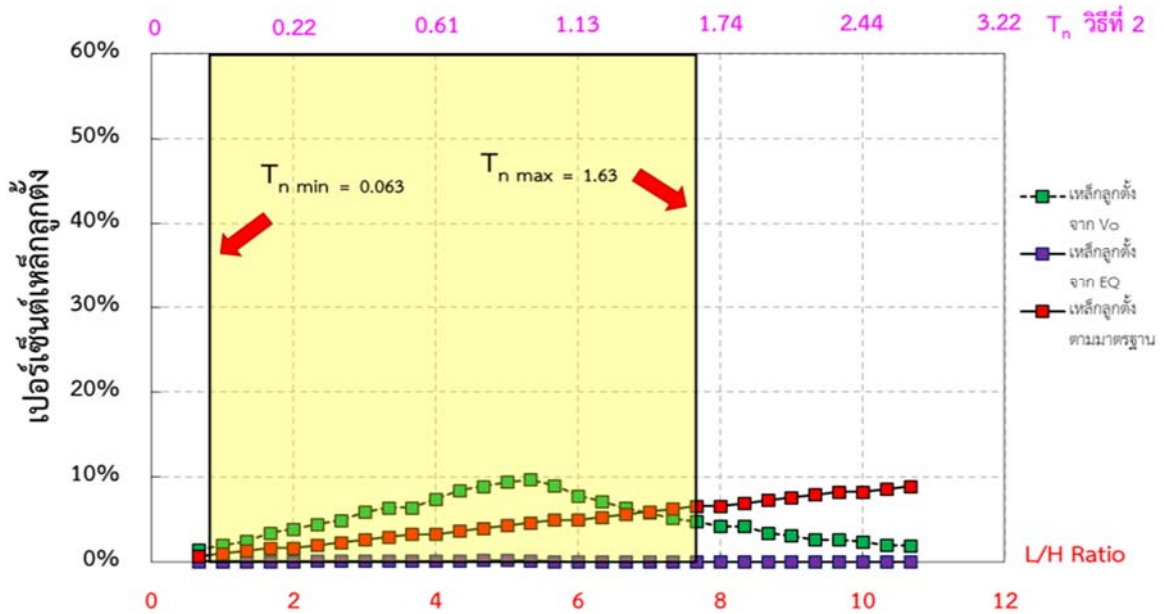
รูปที่ 4.17 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2 ที่จังหวัดกาญจนบุรี

เปอร์เซ็นต์เหล็กกล้า Vs. L/H Ratio จังหวัดกำแพงเพชร



รูปที่ 4.17 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคู่ความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2 ที่จังหวัดกำแพงเพชร

เปอร์เซ็นต์เหล็กกล้า Vs. L/H Ratio จังหวัดกรุงเทพฯ

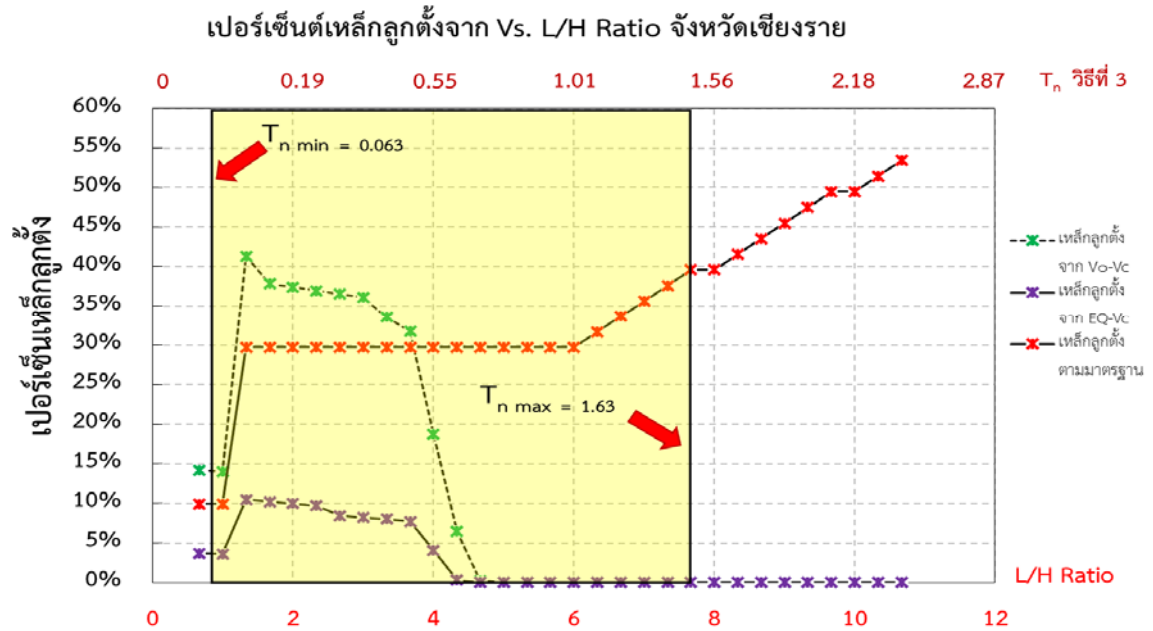


รูปที่ 4.17 (ง) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคู่ความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

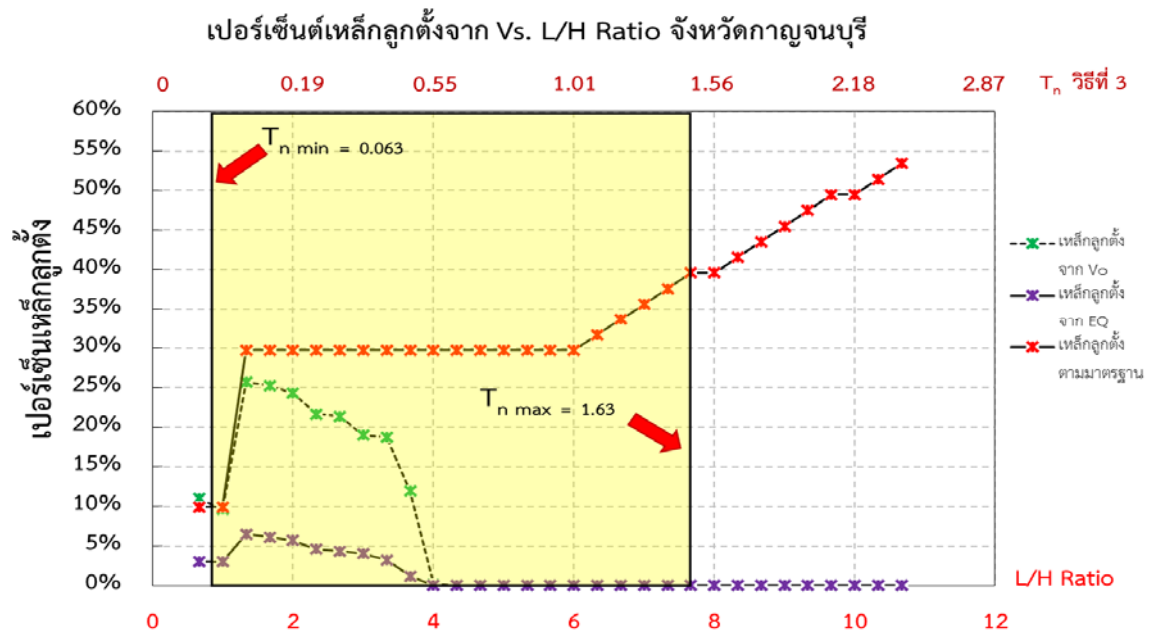
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2 ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณเหล็กปลอกที่คำนวณได้จาก (1) แรงเฉือนจากโมเมนต์ระบุ (2) แรงเฉือนจากแผ่นดินไหว และ (3) การเสริมเหล็กปลอกตามมาตรฐาน AASHTO Standard 2002 พบว่าที่จังหวัดเชียงราย กาญจนบุรี และกำแพงเพชรมีการเสริมแรงจากแรงแผ่นดินไหวโดยตรงมีค่าน้อยมากจนเท่ากับ 0 ในขณะที่การเสริมแรงจากแรงเฉือนจากโมเมนต์ระบุในช่วงที่เป็นเสาสั้นนั้นมีค่ามากและลดลงเมื่อเสามีความสูงขึ้น เนื่องจากยังเป็นเสาสูง แรงที่กระทำจะยิ่งน้อยลง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้าง ดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.1 ส่วนการเสริมแรงตามมาตรฐาน AASHTO Standard 2002 พบว่าที่ช่วง L/H Ratio เท่ากับ 6 มีค่าปริมาณเหล็กปลอกคงที่ ก่อนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังรูป 4.17 (ก)-(ค) เนื่องจากปริมาณเหล็กถูกควบคุมด้วยระยะเรียงชั้นต่ำเท่ากับ 100 มิลลิเมตร และปริมาณเหล็กปลอกแปรผันตรงกับระยะ Plastic Hinge และความสูงเสา

สำหรับพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ จัดเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวน้อยมาก จึงได้ทำการเสริมแรงตามการเสริมแรงชั้นต่ำ พบว่าการเสริมแรงจากแรงเฉือนจากโมเมนต์ระบุมีลักษณะเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นจนถึงช่วง L/H Ratio เท่ากับ 5 แล้วลดลงเนื่องเป็นจุดที่มีแรงเฉือนมากกระทำมากที่สุดก่อนจะลดลงจากการควบคุมโดยค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้าง ลดลงจาก ดังรูปที่ 4.17 (ง)

4.18 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงต่อความยาวหน้าตัดสำหรับวิธีที่ 3

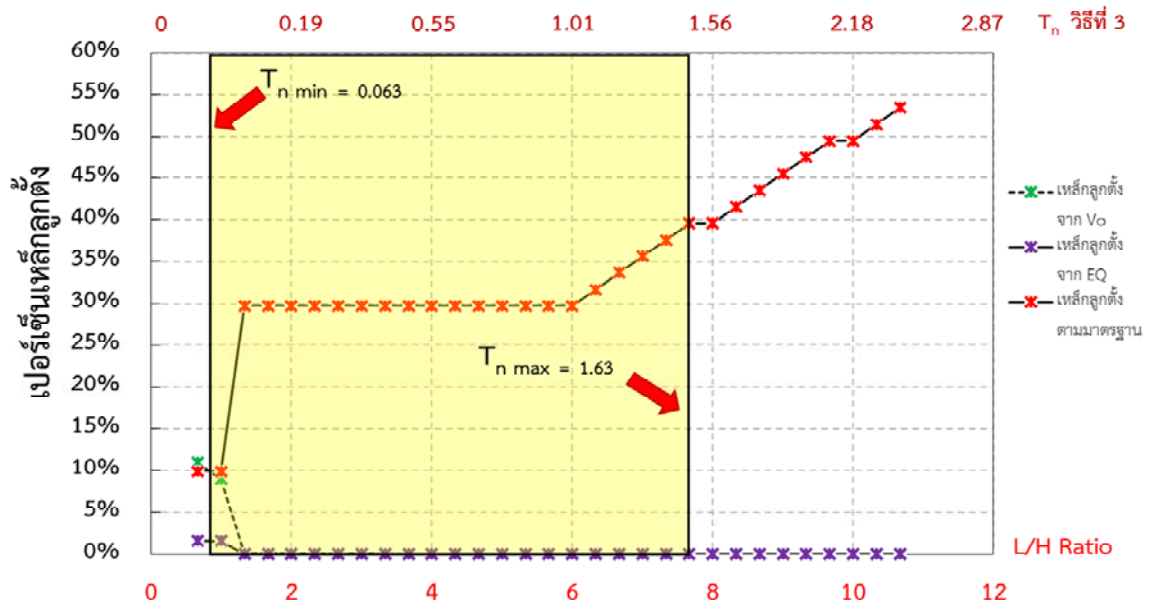


รูปที่ 4.18 (ก) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัดสำหรับวิธีที่ 3 ที่จังหวัดเชียงราย



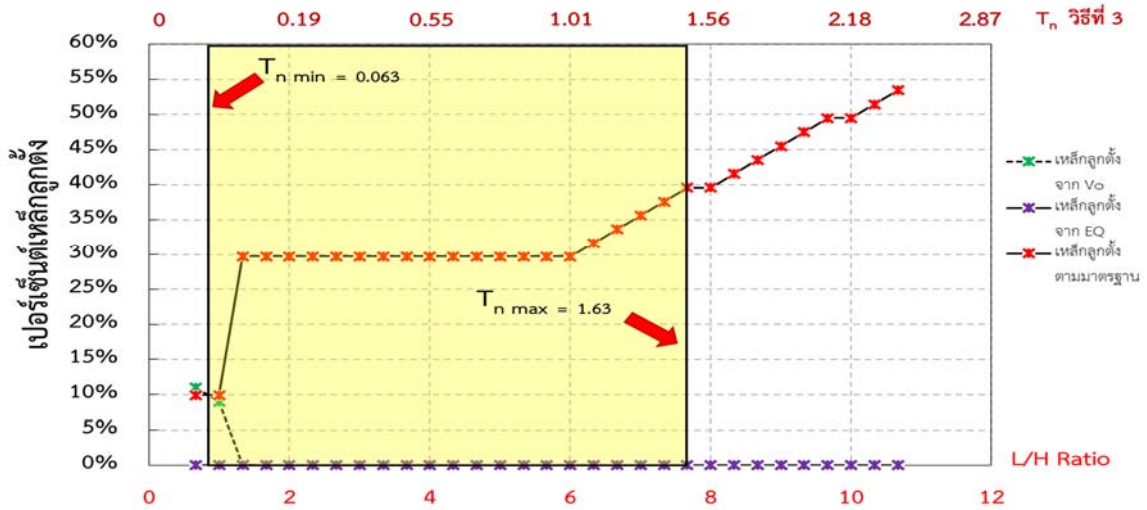
รูปที่ 4.18 (ข) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัดสำหรับวิธีที่ 3 ที่จังหวัดกาญจนบุรี

เปอร์เซ็นต์เหล็กกล้าตั้งจาก Vs. L/H Ratio จังหวัดกำแพงเพชร



รูปที่ 4.18 (ค) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 3 ที่จังหวัดกำแพงเพชร

เปอร์เซ็นต์เหล็กกล้าตั้งจาก Vs. L/H Ratio จังหวัดกรุงเทพฯ



รูปที่ 4.18 (ง) กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกกับอัตราส่วนความสูงเสาคต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 3 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอมกับอัตราส่วนระหว่างความสูงเสาต่อความยาวหน้าตัด สำหรับวิธีที่ 2 ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณเหล็กปลอมที่คำนวณได้จาก (1) แรงเฉือนจากโมเมนต์ระบุด (2) แรงเฉือนจากแผ่นดินไหว และ (3) การเสริมเหล็กปลอมตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวง พ.ศ. 2559 ฉบับเผยแพร่ครั้งที่ 1 พบว่าการเสริมแรงตามมาตรฐานมีลักษณะเป็นคองที่ก่อนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากถูกควบคุมด้วยระยะเรียงที่ 100 มิลลิเมตร ระยะของจุดหมุนพลาสติก และความสูงของเสา ส่วนการเสริมแรงตามแรงเฉือนจากโมเมนต์ระบุดนั้น มีลักษณะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกที่เป็นเสาสั้นเนื่องจากเสาสั้นรับแรงแผ่นดินไหวมากจำเป็นต้องมีการเสริมแรงมาก จนกระทั่งกราฟถึงช่วงที่เป็นเสายาวซึ่งรับแรงแผ่นดินไหวน้อย จึงมีปริมาณเหล็กปลอมที่น้อยลง สำหรับการเสริมแรงด้วยแรงแผ่นดินไหว พบว่าที่จังหวัดเชียงรายและกาญจนบุรี ช่วงแรกกราฟมีค่ามากก่อนจะลดลงเนื่องจากเสาพื้นที่สองจังหวัดอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยของแผ่นดินไหวในระดับรุนแรง ทำให้แรงแผ่นดินไหวมีผลต่อการเสริมเหล็กในช่วงที่เป็นเสาสั้น

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ผลการศึกษาเปรียบเทียบแรงเฉือนพื้นฐานจากแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบสะพานในประเทศไทย ทั้ง 3 วิธีอันได้แก่ 1. วิธีการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD 1973 2. วิธีการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD 2002 3. วิธีการออกแบบตามคู่มือการออกแบบสะพานรับแรงแผ่นดินไหว กระทรวงคมนาคม พ.ศ. 2559 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(1) การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างวิธีที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างมากที่สุดคือวิธีที่ 2 วิธีที่ 3 และวิธีที่ 1 ตามลำดับ แต่เมื่อถึงจุดที่คาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างวิธีที่ 1 จะมามีค่ามากกว่าวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3

(2) แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวในจังหวัดเชียงราย จังหวัดกำแพงเพชร วิธีที่คำนวณได้ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวมากที่สุดคือวิธีที่ 3 วิธีที่ 2 และวิธีที่ 1 ตามลำดับ ในจังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ วิธีที่คำนวณได้ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวมากที่สุดคือ วิธีที่ 2 วิธีที่ 3 และวิธีที่ 1 ตามลำดับ และในทุกพื้นที่เมื่อคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างมากขึ้นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวในวิธีที่ 1 จะมีค่ามากกว่า วิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 และหากมีการพิจารณาการเพิ่มขึ้นค่าของคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างอย่างต่อเนื่องแรงเฉือนที่เกิดจากแรงลมตามกฎของกระทรวงอาจจะมีค่ามากกว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวในทุกวิธีการคำนวณ

(3) อัตราส่วนแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวต่อแรงเฉือนที่เกิดจากแรงลมตามกฎกระทรวงมีอัตราส่วนที่ลดลงเมื่อคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างมากขึ้น สามารถระบุได้ว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหวมีค่าลดลงเมื่อคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างมากขึ้นตรงข้ามกับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแรงลมที่เมื่อคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างมากขึ้นแรงเฉือนก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

(4) การคำนวณแรงเฉือนที่ทำการออกแบบ แรงเฉือนจากการออกแบบที่มีค่ามากที่สุดคือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากโมเมนต์ที่หน้าตัดรับได้ซึ่งวิธีที่ให้ค่ามากที่สุดคือ วิธีที่ 2 วิธีที่ 3 และวิธีที่ 1 ตามลำดับ

(5) การคำนวณเหล็กยื่นที่ทำให้ได้เหล็กยื่นมากที่สุดคือวิธีที่ 2 วิธีที่ 3 และวิธีที่ 1 ตามลำดับ แต่เมื่อถึงจุดที่แรงเฉือนจากแผ่นดินไหวลดลงจะทำให้ได้เหล็กยื่นลดลง แต่ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จุดที่มีค่าสูงที่สุดจากวิธีที่ 3 จะมีค่าน้อยกว่าวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 ตามลำดับ

(6) การคำนวณเหล็กดัดที่ทำให้ได้เหล็กดัดมากที่สุดคือวิธีที่ 2 วิธีที่ 3 และวิธีที่ 1 ตามลำดับ แต่ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพฯ เมื่อมีการออกแบบที่เปลี่ยนไปตามพื้นที่เหล็กดัดที่หาได้จากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 จะมีค่าเท่ากัน และน้อยกว่าวิธีที่ 3

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) การออกแบบเสาสะพานเมื่อเสามีคาบการสั่นตามธรรมชาติที่มากนั้นควรใช้แรงเฉือนจากแรงลมตามกฎกระทรวงออกแบบเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดจากแรงลมนั้นมีค่ามากกว่าแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นดินไหว

(2) การออกแบบโดยใช้วิธีที่ 1 นั้นสามารถใช้ได้ในช่วงคาบการสั่นตามธรรมชาติในวิธีที่ 1 และ 2 มีค่ามากกว่า 2.44 และคาบการสั่นตามธรรมชาติวิธีที่ 3 มีค่ามากกว่า 2.18

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง,กระทรวงคมนาคม : คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว ฉบับเผยแพร่ครั้งที่1

กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย : มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1302),พิมพ์ครั้งที่ 1, พ.ศ.2552

รศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว; และ มนต์เกียรติ์ ชนินทรลีลา : การออกแบบสะพาน, Bridge design. กรุงเทพฯ สำนักเทคโนโลยีธรณี กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2557) กระทรวงมหาดไทย กรมโยธาธิการและผังเมือง สำนักควบคุมการก่อสร้าง กลุ่มงานวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา

เป็นหนึ่งในงานวิจัยและอาเดลิซานโตโน. 2537. “การวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวสำหรับ ประเทศไทย” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่5 ฉบับที่1 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

AASHTO (1973). Standard Specification for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

AASHTO (2002). Standard Specification for Highway Bridges, 17th ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

AASHTO (2010).LRFD Bridge Design Specification, 5th ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

ACI Committee 318, Building Code Requirements for ReinforcedConcrete (ACI 318M-08) and Commentary, American ConcreteInstitute (June 2008)

ภาคผนวก ก
(ขั้นตอนการออกแบบ)

การออกแบบวิธีที่ 1

การออกแบบวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ในการออกแบบเสาสะพานประเภทเสาเดี่ยวที่ทำมาก่อนตั้งแต่สมัยก่อน โดยยึดหลักการในการออกแบบเป็นการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กแต่การคำนวณแรงแผ่นดินไหวนั้นอ้างอิง การหาจาก AASSTHO 1973

ข้อมูลของโครงสร้าง

ความสูงเสา	11	เมตร
ความสูงเสาถึงจุดศูนย์กลางโครงสร้าง	12.35	เมตร
น้ำหนักโครงสร้างส่วนบน	11,301.12	กิโลนิวตัน
น้ำหนักของเสา	1,165.428	กิโลนิวตัน
หน้าตัดเสากว้าง	0.8	เมตร
หน้าตัดเสายาว	1.5	เมตร
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	24	เมกะปาสคาล
กำลังครากของเหล็ก	400	เมกะปาสคาล
โมเมนต์สของคอนกรีต	23,025,203.58	กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
มวลรวมของโครงสร้าง	1,270.8	ตัน
พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างส่วนบน	5.46	ตารางเมตร
พื้นที่หน้าตัดที่กั้นทาง	0.32	ตารางเมตร
ความหนาของพื้นถนน	0.1	เมตร
ความกว้างของช่องทางจราจร	9.2	เมตร
น้ำหนักของคอนกรีต	2,400	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ความยาวช่วงระหว่างเสา	40	เมตร

วิธีทำ

ก-1.1 หาน้ำหนักบรรทุกทุกโครงสร้าง

น้ำหนักบรรทุกทุกโครงสร้างส่วนบน

$$= (5.46 \times 2400 \times 40) + (0.32 \times 2400 \times 40 \times 2) + (0.1 \times 40 \times 9.2 \times 2400)$$

$$= 673,920 \quad \text{กิโลกรัม}$$

$$= \frac{673,920 \times 9.81}{1,000}$$

$$= 6,611.16 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

น้ำหนักของเสา

$$= \frac{(11 \times 1.5 \times 0.8 \times 2,400 \times 9.81) / 1000}{2} = 155.39 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

น้ำหนักบรรทุกทุกโครงสร้างทั้งหมด

$$W = W_{Superstructure} + W_{Column} = 6,611.16 + 155.39 = 6,766.55 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

ก-1.2 คุณสมบัติของหน้าตัด

โมเมนต์ความเฉื่อยของเสา

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = \frac{bd^3}{12} = 1.5 \quad \text{เมตร}^4$$

$$\text{พิจารณารอบแกน } y = \frac{bd^3}{12} = 1.9 \quad \text{เมตร}^4$$

ค่าความแข็งเกร็งของเสา

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = \frac{12I_x E_c}{h^3} = 311,385.16 \quad \text{กิโลนิวตันต่อเมตร}$$

$$\text{พิจารณารอบแกน } y = \frac{3I_y E_c}{h^3} = 98,605.30 \quad \text{กิโลนิวตันต่อเมตร}$$

คาบการสั่นของโครงสร้าง

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_x}} = 0.4 \quad \text{วินาที}$$

$$\text{พิจารณารอบแกน } y = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_y}} = 0.71 \quad \text{วินาที}$$

ก-1.3 หาแรงอัดตามแนวแกนที่กระทำกับโครงสร้างเสาสะพาน

$$\begin{aligned} P_u &= 1.3 \times W \\ &= 1.3 \times 6766.55 \\ &= 8796.51 \quad \text{กิโลนิวตัน} \end{aligned}$$

ก-1.4 หาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหว

$$\begin{aligned} EQ &= C_s \times W \\ &= 0.06 \times 6766.55 \\ &= 405.99 \quad \text{กิโลนิวตัน} \end{aligned}$$

ก-1.5 หาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวในการออกแบบ

$$\begin{aligned} V_{EQ} &= 1.3 \times (EQ + 0.3EQ) \\ &= 1.3 \times (405.99 + (0.3 \times 405.99)) \\ &= 686.13 \quad \text{กิโลนิวตัน} \end{aligned}$$

ก-1.6 หากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตจากหน้าตัดจาก

$$V_c = 0.17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \sqrt{f'_c} (b_w d)$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.17 \times \left(1 + \frac{8796.51 \times 1000}{14 \times (1500 \times 800)} \right) \times \sqrt{24} \times (800 \times 1400) \\
 &= 1421.16 \qquad \text{กิโลนิวตัน}
 \end{aligned}$$

ก-1.7 ทำการตรวจค่า V_c

ตรวจสอบค่า V_c เมื่อค่า $0.5\phi V_c > V_u$ ไม่ต้องทำการเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือน แต่เมื่อค่า $\phi V_c > V_u$ จะทำการเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือนที่ต้องการอย่างน้อยที่สุด คือ $A_{v_{min}}$

$$0.5\phi V_c = 0.5 \times 0.85 \times 1421.16 = 603.99 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

$$\phi V_c = 0.85 \times 1421.16 = 1207.98 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

สรุปได้ว่า $0.5\phi V_c < V_u < \phi V_c$ เพราะฉะนั้นต้องทำการเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือนขั้นต่ำตามข้อกำหนด

ก-1.8 หาแรงเฉือนที่รับโดยเหล็กปลอกรับแรงเฉือน

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad V_s &= \frac{V_u}{\phi} - V_c \\
 V_s &= \frac{686.13}{0.85} - 1421.16 \\
 &= -613.95 \qquad \text{กิโลนิวตัน}
 \end{aligned}$$

ถึงแม้ว่าค่า V_s จะติดลบแต่จากการตรวจสอบค่าจากขั้นตอนที่ 7 แล้วนั้นจะต้องทำการเสริมเหล็กปลอกขั้นต่ำตามข้อกำหนดการออกแบบ

ก-1.9 หาเหล็กปลอกรับแรงเฉือน

ข-1.9.1 ตรวจสอบแรงตามข้อกำหนด

$$0.33\sqrt{f_c} b_w d = (0.33 \times \sqrt{24} \times 800 \times 1400) / 1000 = 1810.66 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

$$0.66\sqrt{f_c} b_w d = (0.66 \times \sqrt{24} \times 800 \times 1400) / 1000 = 3621.32 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

จะได้ว่า $V_s \leq 0.33\sqrt{f_c} b_w d$ ทำการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนขั้นต่ำตามข้อกำหนดการออกแบบ

ข-1.9.2 สมมติหน้าตัดการเสริมเหล็กปลอก

สมมติเหล็กปลอกเป็นเหล็ก DB 12 ใช้เหล็กจำนวน 7 เส้น พื้นที่หน้าตัดเหล็ก

$$((\pi \times 12^2) / 4) \times (7 \times 2) = 1583.36 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

ก-1.9.3 ระยะเรียง s

$$s_{\max} = \min \left\{ 600, \frac{d}{2}, \frac{A_v f_y}{0.35 b_w} \right\}$$

$$s_{\max} = \min \left\{ 600, \frac{1400}{2}, \frac{1583.36 \times 400}{0.35 \times 800} \right\}$$

$$s_{\max} = \min \{ 600, 700, 2262 \} \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$s_{\max} = 600 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ก-1.9.4 จำนวนเส้นของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน

$$\text{จำนวนเส้น} = \frac{\left(\frac{1100}{600} \right) \times 1583.36}{2 \times 113.09}$$

$$= 133 \quad \text{เส้น}$$

สรุปได้ว่าทุกระยะเรียงที่ 600 มิลลิเมตรมีการเสริมเหล็กปลอก 1 ชุด ใน 1 ชุดจะมีการเสริมเหล็กปลอก 7 เส้นจากการหาชุดเหล็กปลอก จะได้ 19 ชุด ซึ่งจะใช้เหล็กปลอกทั้งหมด 133 เส้นในความสูง 11 เมตร

การออกแบบวิธีที่ 2

ก-2.1 ประเภทสะพาน

เลือกออกแบบเป็นสะพานประเภทสะพานทั่วไป คือ สะพานที่ไม่ได้อยู่ในเส้นทางยุทธศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงของประเทศ สะพานที่ไม่ใช่เส้นทางหลักที่ใช้ในการช่วยเหลือ หรืออพยพเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินหรือภัยพิบัติรุนแรง สะพานที่ไม่ได้อยู่ในเส้นทางสายหลักระหว่างสถานที่สำคัญ

ก-2.2 ความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแต่ละเขตเทียบระหว่างแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของ รศ.ดร.เป็นหนึ่ง วานิชชัย กับ มาตรฐาน AASHTO 2002

จังหวัดเชียงราย จัดอยู่ในเขตความรุนแรงตามแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของ รศ.ดร.เป็นหนึ่ง วานิชชัย ระดับ 3 มีค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดินเท่ากับ 0.3 และจัดอยู่ใน SPC : C ตามมาตรฐาน AASHTO Standard 2002

ตารางที่ ก-1 แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณในพื้นที่ต่าง ๆ

จังหวัด	พื้นที่	ค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดิน (A)	SPC
เชียงราย	3	0.3	C
กาญจนบุรี	3	0.3	C
กำแพงเพชร	2B	0.2	C
กรุงเทพมหานคร	2A	0.15	B

ตารางที่ ก-2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคุณภาพของดินของแต่ละจังหวัด

จังหวัด	ประเภทดินของแต่ละจังหวัด	สัมประสิทธิ์สำหรับคุณภาพของดิน (S)
เชียงราย	หิน	1
กาญจนบุรี	หิน	1
กำแพงเพชร	ดินเหนียวอ่อนตัวปานกลาง	1.5
กรุงเทพมหานคร	ชั้นดินเหนียวอ่อนมาก	2

ก-2.3 สภาพดินของแต่ละจังหวัด

สภาพดินที่จังหวัดเชียงใหม่ส่วนใหญ่เป็นชั้นหิน ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพของดินเท่ากับ 1

ก-2.4 ข้อมูลของโครงสร้าง

ความสูงของเสา	11	เมตร
ความสูงของเสาถึงศูนย์กลางของโครงสร้าง	12.35	เมตร
น้ำหนักโครงสร้างส่วนบน	11,301.12	กิโลนิวตัน
น้ำหนักของเสา	1,165.428	กิโลนิวตัน
หน้าตัดเสากว้าง	0.8	เมตร
หน้าตัดลึก	1.5	เมตร
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	24	เมกะปาสคาล
กำลังครากของเหล็ก	400	เมกะปาสคาล
โมดูลัสของคอนกรีต	$= 4700\sqrt{f'_c} =$	23,025,203.58 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
มวลรวมของโครงสร้าง	1,270.8	ตัน

ก-2.5 คุณสมบัติของหน้าตัด

- โมเมนต์ความเฉื่อยของเสา

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = \frac{bd^3}{12} = 0.23 \text{ m}^4$$

$$\text{พิจารณารอบแกน } y = \frac{bd^3}{12} = 0.06 \text{ m}^4$$

- ค่าความแข็งเกร็งของเสา

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = \frac{3I_x E_c}{h^3} = 11,676.94 \text{ kN/m}$$

$$\text{พิจารณารอบแกน } y = \frac{12I_x E_c}{h^3} = 13,285.77 \text{ kN/m}$$

- คาบการสั่นของโครงสร้าง

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_x}} = 1.53 \text{ วินาที}$$

$$\text{พิจารณารอบแกน } y = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_y}} = 1.43 \text{ วินาที}$$

ก-2.6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างในโหมดอีลาสติก ($C_s \leq 2.5A$)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างในโหมดอีลาสติกต้องมีค่าไม่เกิน 2.5 A สำหรับจังหวัดเชียงใหม่

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = \frac{1.2AS}{T_x^{\frac{2}{3}}} = 0.27$$

$$\text{พิจารณารอบแกน } y = \frac{1.2AS}{T_y^{\frac{2}{3}}} = 0.28$$

ก-2.7 แรงเฉือนภายใน

ค่าแรงเฉือนที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวที่จังหวัดเชียงใหม่

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = C_{sx} W = 608.99 \text{ กิโลนิวตัน}$$

$$\text{พิจารณารอบแกน } y = C_{sy} W = 631.54 \text{ กิโลนิวตัน}$$

ก-2.8 การรวมแรง

การรวมแรงเป็นการนำเอาแรงแผ่นดินไหว 30% ของแกนตรงข้ามมารวมกัน เนื่องจากขณะเกิดแรงแผ่นดินไหว แรงเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งสองแกน

จังหวัดเชียงใหม่

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = P_x + 0.3P_y = 798.45 \text{ กิโลนิวตัน}$$

$$\text{พิจารณารอบแกน } y = P_y + 0.3P_x = 814.24 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

ก-2.9 แรงแผ่นดินไหวที่สภาวะประลัย

เนื่องจากตามมาตรฐานของ AASHTO Standard 2002 การคำนวณหน่วยแรงแผ่นดินไหวนั้นต้องมีการคูณเพิ่ม เพื่อให้อยู่ในสภาวะประลัย ซึ่งสำหรับวิธีที่ 2 นี้ ตัวคูณเพิ่มมีค่าเท่ากับ 1.3

จังหวัดเชียงราย

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = 1.3V_x = 1,037.51 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

$$\text{พิจารณารอบแกน } y = 1.3V_y = 1,058.99 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

ก-2.10 โมเมนต์ดัดที่สภาวะประลัย

โมเมนต์ดัดที่กระทำต่อโครงสร้างเกิดจากการนำแรงที่กระทำด้านข้างซึ่งนั่นก็คือหน่วยแรงแผ่นดินไหวมาคูณกับระยะความสูงของเสา

จังหวัดเชียงราย

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = V_{ux}L = 12,756.87 \quad \text{กิโลนิวตัน-เมตร}$$

$$\text{พิจารณารอบแกน } y = V_{uy}L = 13,009.13 \quad \text{กิโลนิวตัน-เมตร}$$

ก-2.11 โมเมนต์ดัดด้านของหน้าตัด

$$\text{ได้จากการออกแบบหน้าตัดนำมาเปรียบเทียบกับโมเมนต์ดัดที่สภาวะประลัยโดยสัดส่วน } \frac{\phi M_n}{M_u} \leq 1$$

โดยโมเมนต์ที่นำมาพิจารณาเป็นโมเมนต์ตามขวาง คือรอบแกน x ซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้างเนื่องจากหน่วยแรงของแผ่นดินไหวมากที่สุด

จังหวัดเชียงราย

$$\text{พิจารณารอบแกน } x = M_n = 12,895.5 \quad \text{กิโลนิวตัน-เมตร}$$

เช็คค่า $\phi M_n \geq M_u$ โดยที่ $\phi = 1.3$

$$\text{จะได้ } 33528.3 \geq 12756.87 = O.K.$$

ก-2.12 ตรวจสอบแรงเฉือน

พิจารณาโดยใช้แรงเฉือนประลัยที่หาได้จากโมเมนต์ต้านของหน้าตัด

จังหวัดเชียงราย

$$\text{แรงเฉือนที่หน้าตัดสามารถรับได้ } V_u = \frac{\phi M_n}{L} = 3,209.52 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

ก-2.13 พิจารณาแรงเฉือนในคอนกรีตและแรงเฉือนในเหล็ก

เนื่องจากแรงเฉือนที่หน้าตัดรับได้เกิดจากการนำแรงเฉือนในคอนกรีตรวมกับแรงเฉือนในเหล็ก ซึ่งเราต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

จังหวัดเชียงราย

$$\text{แรงเฉือนในคอนกรีต} = 0.17\left(1 + \frac{P_u}{14A_g}\right)\sqrt{f'_c}b_w d = 1,421.16 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

$$\text{แรงเฉือนในเหล็ก} = \frac{V_u - V_c}{\phi} = 1,788.36 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

เช็คค่า $V_n = V_c + V_s$

$$\text{จะได้ } 3209.52 = 1421.16 + 1788.36 = O.K.$$

ก-2.14 ตรวจสอบแรงเฉือนในคอนกรีตเพิ่มเสริมเหล็กจาก

โดยการนำเอาค่าแรงเฉือนในคอนกรีตมาเปรียบเทียบกับแรงเฉือนที่ยอมให้ของการเสริมเหล็กขั้นต่ำ และแรงเฉือนที่ยอมให้ของการเสริมเหล็กสูงที่สุด

$$\text{แรงเฉือนต่ำสุด} = 0.33\sqrt{f'_c}b_w d = 1,810.66 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

$$\text{แรงเฉือนสูงสุด} = 0.66\sqrt{f'_c}b_w d = 3,621.33 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

$$\text{แรงเฉือนที่ได้} = 0.17\left(1 + \frac{P_u}{14A_g}\right)\sqrt{f'_c}b_w d = 1,421.16 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

ซึ่งแรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้มีค่าน้อยกว่าแรงเฉือนขั้นต่ำตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้นการเสริมเหล็ก
 ลูกตั้งจึงต้องเสริมเหล็กขั้นต่ำ

ก-2.15 ช่วงความสูงเสาช่วงปลายของโครงสร้าง

ระยะความสูงเสาที่พิจารณาต่อไปนี้เป็นช่วงที่ได้รับผลกระทบจากหน่วยแรงแผ่นดินไหวมากกว่าส่วน
 อื่น จำเป็นต้องมีการเสริมเหล็กที่มากกว่าช่วงอื่นๆของเสา

$$\text{ความสูง} = \max\left\{\frac{h_c}{6}, H\right\} = 1.83 \text{ เมตร}$$

ก-2.16 ระยะเรียงของเหล็กลูกตั้ง

เนื่องจากในจังหวัดเชียงรายอยู่ในโซนพื้นที่ SPC : C ตามมาตรฐาน AASHTO Standard 2002 ที่
 นำมาเปรียบเทียบกับแผนที่ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของ รศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วานิชชัยซึ่งจัดเป็นสะพานประเภท
 สะพานทั่วไปที่อยู่ในพื้นที่ความรุนแรงของแผ่นดินไหวมาก จึงมีข้อดังนี้

$$\text{ระยะเรียง} = \min\left\{\frac{A_{sh}}{0.3h_c \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right)}, \frac{A_{sh}}{0.12h_c \frac{f'_c}{f_{yh}}}, 100\right\} = 100 \text{ มิลลิเมตร}$$

การออกแบบวิธีที่ 3

การออกแบบวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ในการออกแบบเสาสะพานประเภทเสาเดี่ยว โดยยึดหลักการในการคำนวณแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1302-52) และการออกแบบสะพานตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหวของกรมคมนาคมโดยอ้างอิงมาจากมาตรฐาน AASHTO LRFD 2010

ประเภทสะพาน

เลือกออกแบบเป็นสะพานประเภทสะพานทั่วไป คือ สะพานที่ไม่ได้อยู่ในเส้นทางยุทธศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงของประเทศ สะพานที่ไม่ใช่เส้นทางหลักที่ใช้ในการช่วยเหลือ หรืออพยพเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินหรือภัยพิบัติรุนแรง สะพานที่ไม่ได้อยู่ในเส้นทางสายหลักระหว่างสถานที่สำคัญ

ข้อมูลของโครงสร้าง

ความสูงของเสา	11	เมตร
ความสูงของเสาถึงศูนย์กลางของโครงสร้าง	12.35	เมตร
หน้าตัดเสากว้าง	0.8	เมตร
หน้าตัดเสายาว	1.5	เมตร
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	$= 1.5' f_c'$ $= 1.5 * 24$ $= 36$	เมกะปาสคาล
กำลังครากของเหล็ก	$= 1.25 f_y$ $= 1.25 * 400$ $= 500$	เมกะปาสคาล

โมดูลัสของคอนกรีต	$= 4700\sqrt{f'_c}$	
	$= 4700\sqrt{36}$	
	$= 28,200,000$	กิโลนิวตันต่อตารางเซนติเมตร
ค่า Elastic modulus ของเหล็ก	2,000,000	กิโลนิวตันต่อตารางเซนติเมตร
พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างส่วนบน	5.46	ตารางเมตร
พื้นที่หน้าตัดที่กันทาง	0.32	ตารางเมตร
ความหนาของพื้นถนน	0.1	เมตร
ความกว้างของช่องทางจราจร	9.2	เมตร
น้ำหนักของคอนกรีต	2,400	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ความยาวช่วงระหว่างเสา	40	เมตร

วิธีทำ

ก-3.1 หาน้ำหนักบรรทุกทุกโครงสร้าง

น้ำหนักบรรทุกทุกโครงสร้างส่วนบน	$= 5.46 \times 2,400 \times 40$	
	$= 524,160$	กิโลกรัม
	$= (524,160 \times 9.81) / 1,000$	
	$= 5,142.01$	กิโลนิวตัน
น้ำหนักพื้นถนน	$= 0.1 \times 40 \times 9.2 \times 2,400$	
	$= 88,320$	กิโลกรัม
	$= (88,320 \times 9.81) / 1000$	
	$= 866.42$	กิโลนิวตัน

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักที่กินทาง} &= 0.32 \times 2,400 \times 40 \times 2 \\
 &= 61,440 \quad \text{กิโลกรัม} \\
 &= (61,440 \times 9.81) / 1,000 \\
 &= 602.73 \quad \text{กิโลนิวตัน} \\
 \text{น้ำหนักของเสา} &= 11 \times 1.5 \times 0.8 \times 2,400 \\
 &= 31,680 \quad \text{กิโลกรัม} \\
 &= (31,680 \times 9.81) / 1,000 \\
 &= 310.78 \quad \text{กิโลนิวตัน}
 \end{aligned}$$

*ในการคำนวณคติน้ำหนักเสา 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเสาทั้งหมด

$$\begin{aligned}
 &= 310.78 / 2 \\
 &= 155.39 \quad \text{กิโลนิวตัน}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักจร} &= 30 \text{ เปอร์เซ็นต์ของโครงสร้างส่วนบน} \\
 &= 0.3 \times 5,142.01 \\
 &= 1,542.60 \quad \text{กิโลนิวตัน} \\
 \text{น้ำหนักกระแทก(ไม่คิด)} &= 0 \times 1,542.60 \\
 &= 0 \quad \text{กิโลนิวตัน}
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้นน้ำหนักรวมทั้งหมด} \quad W_{Total} = DC + DW + \gamma(LL + IM) \quad ; \gamma = 0.5$$

$$= \frac{5,142.01 + 602.73 + 866.42 + 0.5(155.39 + 1,542.60)}{9.81}$$

$$= 768.38 \quad \text{ตัน}$$

ก-3.2 คุณสมบัติของหน้าตัด

- โมเมนต์ความเฉื่อยของเสา

$$\begin{aligned} \text{พิจารณารอบแกน } x &= \frac{bd^3}{12} = \frac{0.8 \times 1.5^3}{12} \\ &= 0.23 \quad \text{เมตร}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พิจารณารอบแกน } y &= \frac{bd^3}{12} = \frac{1.5 \times 0.8^3}{12} \\ &= 0.06 \quad \text{เมตร}^4 \end{aligned}$$

- ค่าความแข็งเกร็งของเสา

$$\begin{aligned} \text{พิจารณารอบแกน } x &= \frac{12I_x E_c}{h^3} = \frac{12 \times 0.23 \times 28,200,000}{11^3} \\ &= 14,301 \quad \text{กิโลนิวตันต่อเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พิจารณารอบแกน } y &= \frac{3I_x E_c}{h^3} = \frac{3 \times 0.06 \times 28,200,000}{11^3} \\ &= 16,272 \quad \text{กิโลนิวตันต่อเมตร} \end{aligned}$$

- คาบการสั่นของโครงสร้าง

$$\begin{aligned} \text{พิจารณารอบแกน } x &= 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_x}} = 2\pi \sqrt{\frac{768.38}{14,301}} \\ &= 1.46 \quad \text{วินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พิจารณารอบแกน } y &= 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_y}} = 2\pi \sqrt{\frac{768.38}{16,272}} \\
 &= 1.37 \quad \text{วินาที}
 \end{aligned}$$

ก-3.3 หาแรงเฉือนเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว

กำหนดจังหวัดเพื่อหาความเร่งตอบสนอง

จังหวัด : เชียงราย

เขต/อำเภอ: แม่จัน

$$\text{ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น } S_s = 0.940 \quad \text{g}$$

$$\text{ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบ 1 วินาที } S_1 = 0.278 \quad \text{g}$$

ประเภทชั้นดิน : D

หาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที F_a

$$F_a = 1.12 \quad \text{g}$$

หาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที F_v

$$F_v = 1.84 \quad \text{g}$$

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร, S_{MS}

$$S_{MS} = 1.06 \quad \text{g}$$

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร, S_{M1}

$$S_{M1} = 0.51 \quad \text{g}$$

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที S_{DS}

$$S_{DS} = 0.704 \quad \text{g}$$

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 1.0 วินาที S_{D1}

$$S_{D1} = 0.342 \quad \text{g}$$

พื้นที่สมรรถนะของแผ่นดินไหวระดับที่ $= 3$

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่นพื้นฐาน

$$\text{แกนตามยาว } C_{sx,e} = 0.235 \quad \text{g}$$

$$\text{แกนตามขวาง } C_{sy,e} = 0.250 \quad \text{g}$$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงแผ่นดินไหวของโครงสร้าง

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนแรงสำหรับเสาเดี่ยว } R = 3 \quad (\text{ประเภทสะพานทั่วไป})$$

$$\begin{aligned} \text{แกนตามยาว } C_{sx,d} &= \frac{C_{sx,e}}{R} = \frac{0.235}{3} \\ &= 0.078 \quad \text{g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แกนตามขวาง } C_{sy,d} &= \frac{C_{sy,e}}{R} = \frac{0.250}{3} \\ &= 0.083 \quad \text{g} \end{aligned}$$

แรงสถิตเทียบเท่าที่กระทำ

$$\begin{aligned} \text{แกนตามยาว } EQ_x &= C_{sx,d} W = 0.078 \times 7537.85 \\ &= 589.602 \quad \text{กิโลนิวตัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แกนตามขวาง } EQ_y &= C_{sy,d} W = 0.083 \times 7537.85 \\ &= 628.909 \quad \text{กิโลนิวตัน} \end{aligned}$$

รวมแรง, EQ	$V_{EQ_x} = EQ_x + 0.3EQ_y$	=	$589.602 + (0.3 \times 628.909)$
		=	778.257 กิโลนิวตัน
	$V_{EQ_y} = 0.3EQ_x + EQ_y$	=	$(0.3 \times 589.602) + 628.909$
		=	805.789 กิโลนิวตัน
	เลือกใช้ค่าแรงเฉือนตามขวาง V_{EQ}	=	805.789 กิโลนิวตัน
ก-3.4 หาโมเมนต์เนื่องจากแรงแผ่นดินไหว M_u		=	$F_y J_c$
		=	805.789×12.3479
		=	$9,610.06$ กิโลนิวตัน

ก-3.5 น้ำหนักกดเนื่องจากน้ำหนักโครงสร้าง P_u ;

$$P_u = 1.25(DC) + 1.5(DW) + \gamma(LL + IM)$$

$$P_u = 1.25(5,142.01 + 602.73 + 155.39) + 1.5(866.42 + 1,542.60) + 0.5(1,542.60 + 0)$$

$$P_u = 9,446.09 \text{ กิโลนิวตัน}$$

ก-3.6 หาโมเมนต์เนื่องจากแรงต้านของหน้าตัด M_n		=	$10,761$ กิโลนิวตัน
(จากโปรแกรม Response-2000)			
ผลคูณลดค่าของโมเมนต์ที่ต้านทานในหน้าตัด ϕM_n		=	$0.9 \times 10,761$
		=	$9,682.55$ กิโลนิวตัน

เลือกแรงเฉือนที่มีค่ามากกว่า

-แรงเฉือนเนื่องจากแผ่นดินไหวในแนวตามขวาง	$EQ_y = 628.909$	=	628.909 กิโลนิวตัน
--	------------------	---	----------------------

- แรงเฉือนที่เกิดจาก, $V_0 =$	$\frac{\phi M_n}{L_c}$	=	$\frac{1.3 \times 10,761}{12.3479}$
-------------------------------	------------------------	---	-------------------------------------

		=	$1,132.93$ กิโลนิวตัน
--	--	---	-----------------------

$$\text{เลือกแรงเฉือนที่มีค่ามากที่สุด } V = 1,132.93 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

ก-3.7 หาค่ากำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด

$$\begin{aligned} \text{กำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด } V_n &= 0.25 f'_c b d_v \\ &= \frac{0.25 \times 36 \times 800 \times 630}{1,000} \\ &= 4,536 \quad \text{กิโลนิวตัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ลดทอนค่ากำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด} &= 0.9 \times 4,536 \\ &= 4,082,240 \quad \text{กิโลนิวตัน} \end{aligned}$$

ก-3.8 หาค่า Strain ของเหล็ก

$$\begin{aligned} \text{ชนิดเหล็กยี่สิบ} &= DB16 \\ \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กยี่สิบ} &= 16 \quad \text{มิลลิเมตร} \\ \text{จำนวนเหล็กยี่สิบ, } n &= 76 \quad \text{เส้น} \\ \text{พื้นที่หน้าตัดของเหล็กยี่สิบทั้งหมด } A_s &= 76 \times \frac{\pi \times 16^2}{4} \\ &= 15,280.71 \quad \text{ตารางมิลลิเมตร} \\ \text{แรงประลัยตามแกน } N_u &= -9,446.09 \quad \text{กิโลนิวตัน} \\ \text{โมเมนต์, } M_u = V \times d_v &= 0.63 \times 1,132.93 \\ &= 713.75 \quad \text{กิโลนิวตัน} \\ \text{Strain, } \epsilon &= \frac{\frac{|M_u|}{d_v} + N_u + V}{E_s A_s} \\ &= \frac{\frac{713.75}{1,132.93} + 0.5(-9,446.09) + 1,132.93}{2,000,000 \times 9.81 \times 7,640.36 \times 10^{-6}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0 && \text{กิโลนิวตัน} \\
 \text{มุม, } \theta &= 29 + (3,500\varepsilon_s) \\
 &= 29 && \text{องศา} \\
 \beta &= \frac{48}{1 + (750\varepsilon_s)} \\
 &= 4.8
 \end{aligned}$$

ก-3.9 หากำลังแรงเฉือนของคอนกรีต V_c

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังแรงเฉือนของคอนกรีต } V_c &= 0.083\beta\sqrt{f'_c}bd_v \\
 &= \frac{0.083 \times 4.8 \times \sqrt{36} \times 1,500 \times 630}{1,000} \\
 &= 2,258.93 && \text{กิโลนิวตัน}
 \end{aligned}$$

ก-3.10 หาแรงเฉือนจากเหล็ก

$$\begin{aligned}
 \text{แรงเฉือนจากเหล็ก} &= \left(\frac{V_c}{\phi}\right) - V \\
 &= \left(\frac{2,258.93}{0.9}\right) - 1,132.93 \\
 &= -1,000.12 && \text{กิโลนิวตัน}
 \end{aligned}$$

ก-3.11 คำนวณระยะเรียงเหล็กปลอกในช่วงปลายของโครงสร้าง

$$\begin{aligned}
 \text{ระยะเรียงเหล็กปลอก (จากตาราง)} &= 100 && \text{มิลลิเมตร} \\
 \text{คำนวณปริมาณเหล็กปลอก } \frac{b}{4} = \frac{800}{4} &= 20 && \text{มิลลิเมตร} \\
 \frac{d}{4} = \frac{1,500}{4} &= 375 && \text{มิลลิเมตร} \\
 \text{เลือกระยะเรียงเหล็กปลอกที่น้อยที่สุด} &= 100 && \text{มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ชนิดเหล็กปลอก} &= DB12 \\
 \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก} &= 12 \quad \text{มิลลิเมตร} \\
 \text{จำนวนเหล็กปลอก} &= 14 \quad \text{เส้น} \\
 \text{พื้นที่หน้าตัดของเหล็กยึดทั้งหมด} &= 14 \times \frac{\pi \times 12^2}{4} \\
 &= 1,583.36 \quad \text{ตารางมิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

ระยะเรียง

$$\begin{aligned}
 \frac{A_v f_y}{0.083 f'_c b} &= \frac{1,538.36 \times 500}{0.083 \times 36 \times 800} \\
 &= 331.91 \quad \text{มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{A_v f_y}{0.3 h_c f'_c \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right)} &= \frac{1,538.36 \times 500}{0.3 \times 36 \times (1.7 - 1)} \\
 &= 83.03 \quad \text{มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{A_v f_y}{0.12 h_c f'_c} &= \frac{1,538.36 \times 500}{0.12 \times 1260 \times 36} \\
 &= 145.44 \quad \text{มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{A_v f_y d_v \cot \theta}{V_s} &= \frac{1,538.36 \times 500 \times 630 \times \cot(45^\circ)}{-1,000.12 \times 1,000} \\
 &= -310.658 \quad \text{มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \min\left(\frac{b}{4}, \frac{d}{4}\right) &= \min(200, 375) \\
 &= 200 \quad \text{มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ระยะเรียงเหล็กปลอกจากข้อกำหนด} &= 100 \quad \text{มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\text{เลือกใช้ระยะเรียง} = 100 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ก-3.12 คำนวณระยะเรียงเหล็กปลอกมากที่สุด

$$V_u = \frac{V}{bd_v} = \frac{1,132.93}{1.5 \times 0.63} = 1,207.38 \quad \text{กิโลนิวตันต่อเมตร}^2$$

$$0.125f'_c = 4,500 \quad \text{กิโลนิวตันต่อเมตร}^2$$

$$\text{กรณี} = V_u \leq 0.125 f'_c$$

$$\text{ระยะเรียงมากที่สุด, } S_{\max} = 0.8 \times 630 = 540 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$\text{ต้องไม่น้อยกว่า} = 600 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$\text{ใช้} = 600 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ก-3.13 คำนวณระยะ Plastic hinge

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของหน้าตัด} \quad \max(b, d) &= \max(800, 1,500) \\ &= 1,500 \quad \text{มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ ส่วน } 6 \text{ ของความสูงเสา} &= \frac{l}{6} = \frac{11}{6} \\ &= 1,833.33 \quad \text{มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

$$\text{ข้อกำหนดตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2010} = 450 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$\text{เลือกค่าที่มากที่สุด} = 1,833.33 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ก-3.14 คำนวณจำนวนเหล็กปลอก

$$\text{ระยะเรียงที่เลือกใช้} = 100 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก} = 12 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก} = \frac{\pi \times 12^2}{4} = 113.10 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

พื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นทั้งหมดที่สมมุติไว้	=	1,583.36	มิลลิเมตร ²
จำนวนชุด	$= \frac{1,833}{100}$	= 19	ชุด
พื้นที่หน้าตัดเหล็กทั้งหมด	$= 19 \times 1583.36$	= 30,083.89	มิลลิเมตร ²
จำนวนเหล็กปลอก	$= \frac{30083.89}{113.10 \times 2}$	= 133	เส้น

ก-3.15 สรุปการเสริมเหล็กช่วง Plastic Hinge

เสริมเหล็กยื่น	DB16	=	76	เส้น
เสริมเหล็กปลอก	DB12	=	133	เส้น
ระยะเรียงของเหล็ก		=	100	มิลลิเมตร
ระยะ Plastic Hinge จากโคนเสา		=	1,833.33	มิลลิเมตร

ภาคผนวก ข

(การวิเคราะห์กำลังตัดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์)

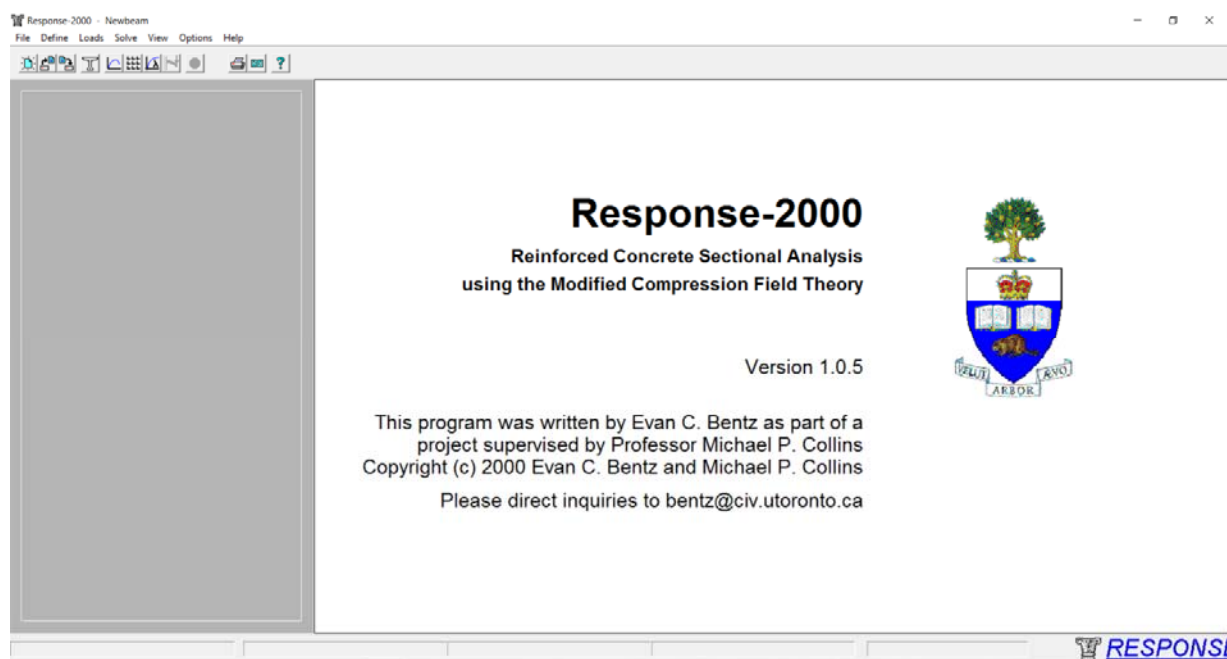
โปรแกรม Response-2000 สำหรับการคำนวณกำลังดัดของคาน

โปรแกรม Response-2000 สำหรับการคำนวณกำลังดัดของคาน เป็นโปรแกรมที่ง่ายสำหรับการวิเคราะห์กำลังและความเหนียว ของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงอัด แรงดัด และแรงเฉือน แบบจำลองที่ใช้โปรแกรมได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเขียนโดย Evan C. Bentz and Michel P. Collins แห่ง University of Toronto, Canada โดยมีรูปแบบโปรแกรมการทำงานดังนี้

สามารถทำนายกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดที่คำนวณได้ยาก เช่น หน้าตัดกลม หรือหน้าตัดรูปตัวที

สามารถแสดงผลเป็นแบบกราฟฟิก และแสดงพฤติกรรมของรอยร้าวได้อีกด้วย

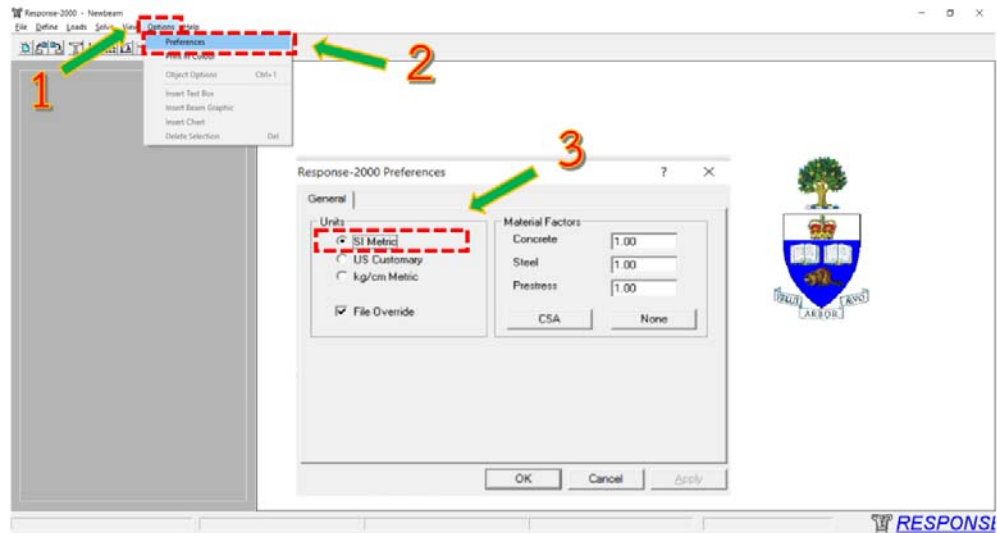
ในการทำโครงการนี้ได้ใช้โปรแกรม Response-2000 คำนวณโมเมนต์ระบุดของหน้าตัดที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวในการหาปริมาณของเหล็กยื่นเพื่อนำไปหาปริมาณของเหล็กถูกตั้งต่อไป



รูปที่ ข-1 หน้าจอของโปรแกรมโปรแกรม Response-2000

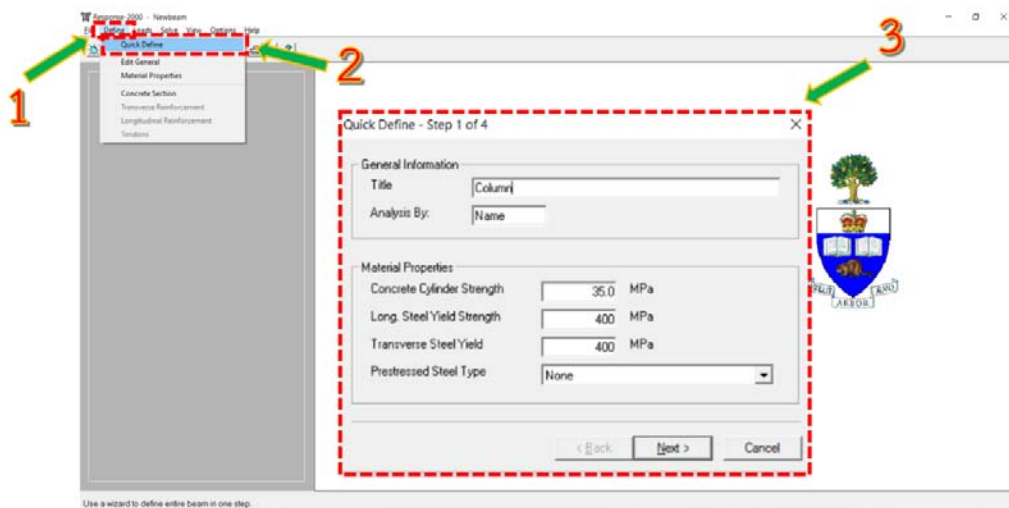
ขั้นตอนในการคำนวณหาโมเมนต์ระบุ

ขั้นตอนที่ 1 ให้เข้าไปที่ Options ตรวจสอบและเลือก Preference ให้หน่วยเป็น SI Metric



รูปที่ ข-2 ตรวจสอบและเลือก Preference

ขั้นตอนที่ 2 เข้าไปยัง Define เลือกคำสั่ง Quick Define เพื่อกำหนดคุณสมบัติของเสาหรือคาน



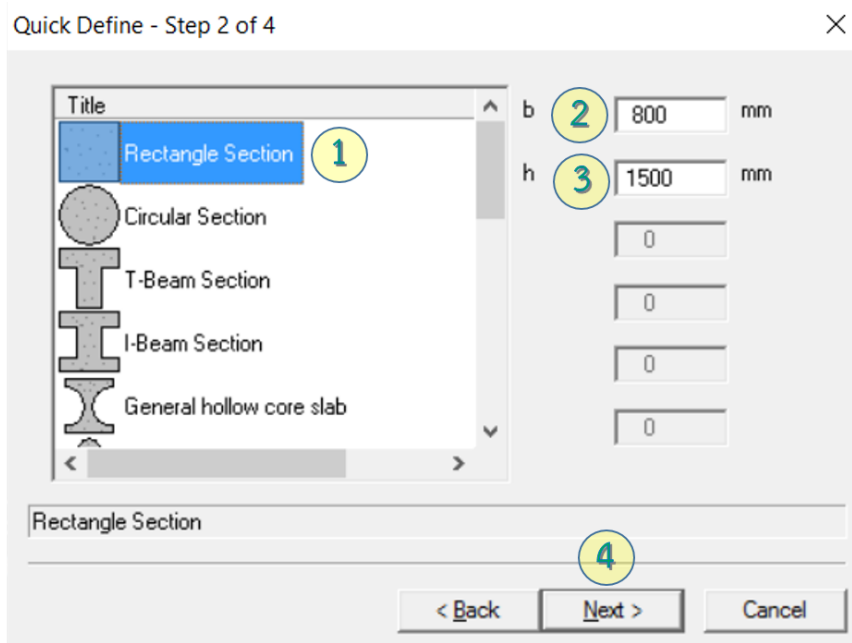
รูปที่ ข-3 เลือกคำสั่ง Quick Define

รูปที่ ข-4 กำหนดคุณสมบัติของเสาหรือคาน

จากรูปที่ ข-4 กำหนดคุณสมบัติของคาน

หมายเลข	1	หมายถึง	ชื่อเสาหรือคาน
หมายเลข	2	หมายถึง	ชื่อผู้ออกแบบ
หมายเลข	3	หมายถึง	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในรูปแบบทรงกระบอก
หมายเลข	4	หมายถึง	กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมยืน
หมายเลข	5	หมายถึง	กำลังรับแรงดึงของเหล็กปลอก
หมายเลข	6	หมายถึง	กด Next หรือ กด N ตรงแป้นพิมพ์

ขั้นตอนที่ 3 เลือกประเภทของหน้าตัดและขนาดของหน้าตัด

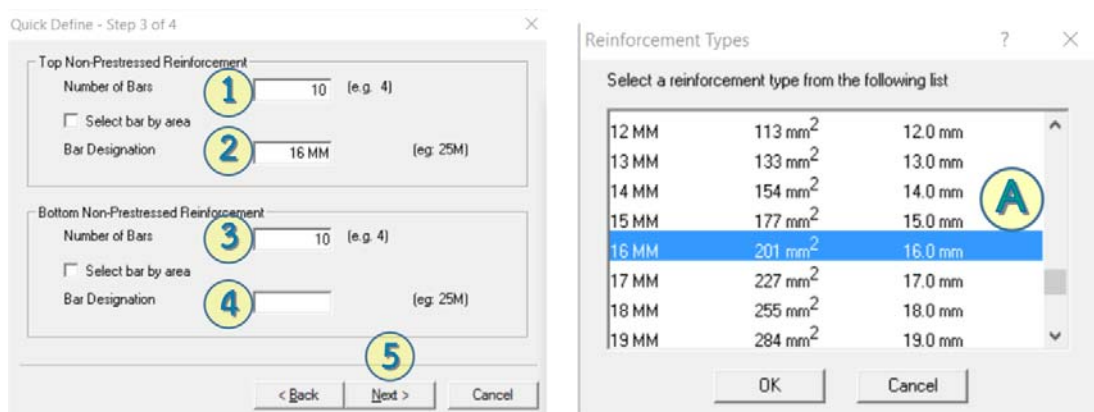


รูปที่ ข-5 กำหนดประเภทหน้าตัด

จากรูปที่ ข-5 การกำหนดประเภทหน้าตัด

หมายเลข	1	หมายถึง	เลือกประเภทหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม
หมายเลข	2	หมายถึง	ใส่ความกว้างของหน้าตัดเสา
หมายเลข	3	หมายถึง	ใส่ความลึกของหน้าตัดเสา
หมายเลข	4	หมายถึง	กด Next หรือ กด N ตรงแป้นพิมพ์

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดข้อมูลเหล็กยื่น



รูปที่ ข-6 การใส่ข้อมูลเหล็กยื่น

จากรูปที่ ข-6 การใส่ข้อมูลเหล็กยื่น

- | | | | |
|---------|---|---------|---|
| หมายเลข | 1 | หมายถึง | เลือกจำนวนเหล็กยื่นบนของหน้าตัด |
| หมายเลข | 2 | หมายถึง | ใส่ขนาดเหล็กยื่นบนโดยการ คลิกซ้าย Mouse ที่ช่อง แล้วกด Enter ที่เป็นพิมพ์จะเกิดหน้าต่าง A ตารางแสดงขนาดเหล็กออกมาให้เลือกใช้ขนาดเหล็กตามต้องการ |
| หมายเลข | 3 | หมายถึง | เลือกจำนวนเหล็กยื่นล่างของหน้าตัด |
| หมายเลข | 4 | หมายถึง | ใส่ขนาดเหล็กยื่นบนโดยการ คลิกซ้าย Mouse ที่ช่อง แล้วกด Enter ที่เป็นพิมพ์จะเกิดหน้าต่าง A ตารางแสดงขนาดเหล็กออกมาให้เลือกใช้ขนาดเหล็กตามต้องการ |
| หมายเลข | 5 | หมายถึง | กด Next หรือ กด N ตรงเป็นพิมพ์ |

ขั้นตอนที่ 5 การกำหนดข้อมูลเหล็กปลอก

Quick Define - Step 4 of 4

Transverse Steel

Stirrup Type **1** None

Select bar by area

Bar Designation 10M (eg. 10M)

Spacing 250 mm

Clear Cover 40 mm

Bottom Tendons

Number of 13 mm strands 0

Delta-Epsilon P 6.500 mm/m

2

< Back Finish Cancel

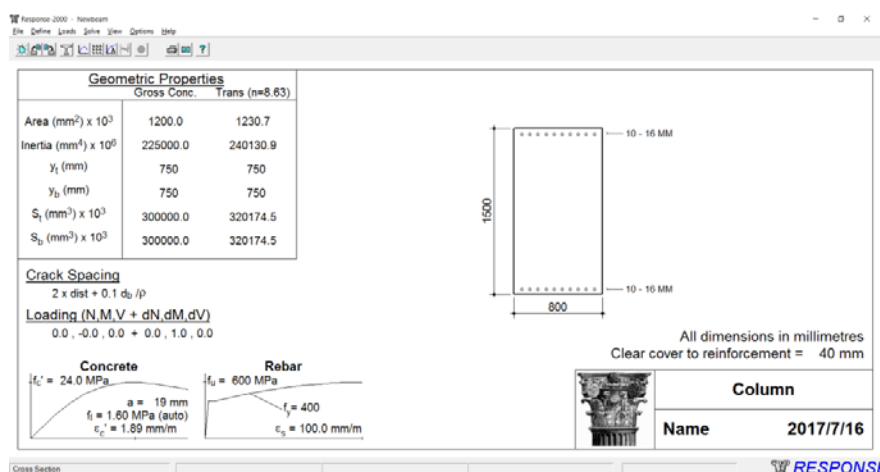
รูปที่ ข-7 การใส่ข้อมูลเหล็กปลอก

จากรูปที่ ข-7 การใส่ข้อมูลเหล็กปลอก

หมายเลข 1 หมายถึง เลือกเป็น None

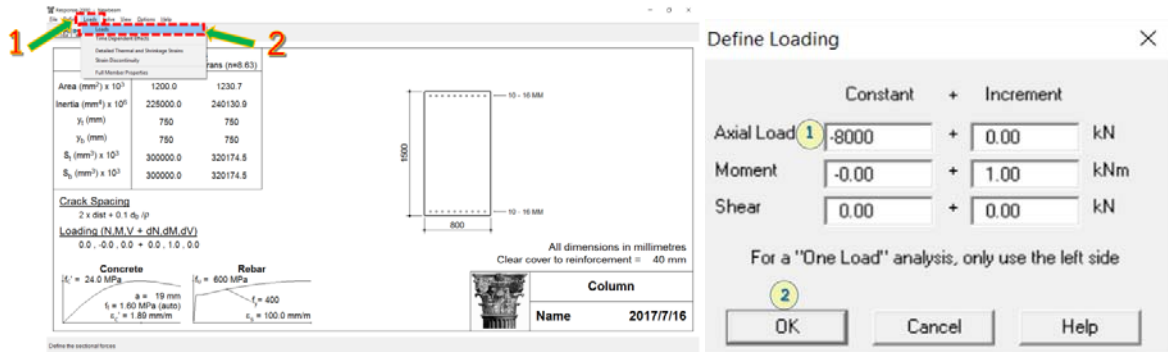
หมายเลข 2 หมายถึง กด Finish

เมื่อกด Finish จากขั้นตอนที่ 5 หน้าต่างของโปรแกรมจะแสดงดังรูปที่ ข-8



รูปที่ ข-8 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมเมื่อกำหนดหน้าตัดของเสาหรือคานเสริมจลัน

ขั้นตอนที่ 6 ทำการกำหนดแรงกดที่กระทำต่อหน้าตัด



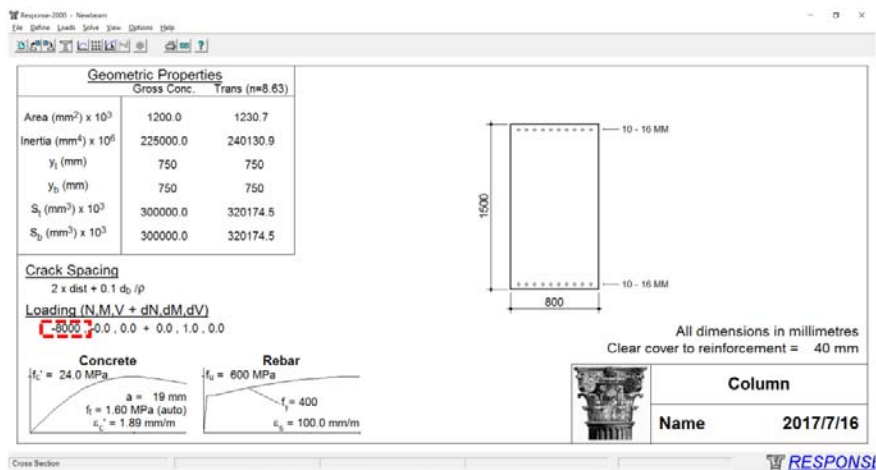
รูปที่ ข-9 การใส่ค่าแรงตามแนวแกน

จากรูปที่ ข-9 แสดงการใส่ค่าแรงตามแนวแกน

หมายเลข 1 หมายถึง กำหนดแรงกดที่กระทำต่อหน้าตัดในช่อง Axial Load หากเป็นแรงอัดที่กระทำต่อหน้าตัดให้ใส่เครื่องหมายลบที่แรง แต่ถ้าเป็นแรงดึงที่กระทำต่อหน้าตัดไม่ต้องใส่

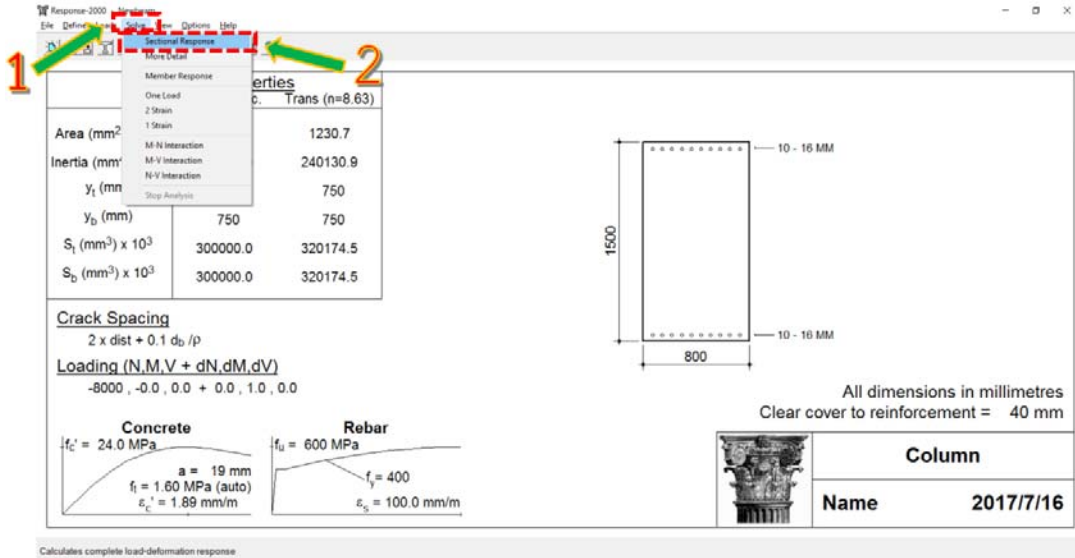
หมายเลข 2 หมายถึง กด OK

จะปรากฏแรงตามแนวแกนที่หน้าต่างของโปรแกรม



รูปที่ ข-10 แสดงการใส่ค่าแรงตามแนวแกนเสร็จสิ้น

ขั้นตอนที่ 7 ประมวลผลหน้าตัดของเสาหรือคาน

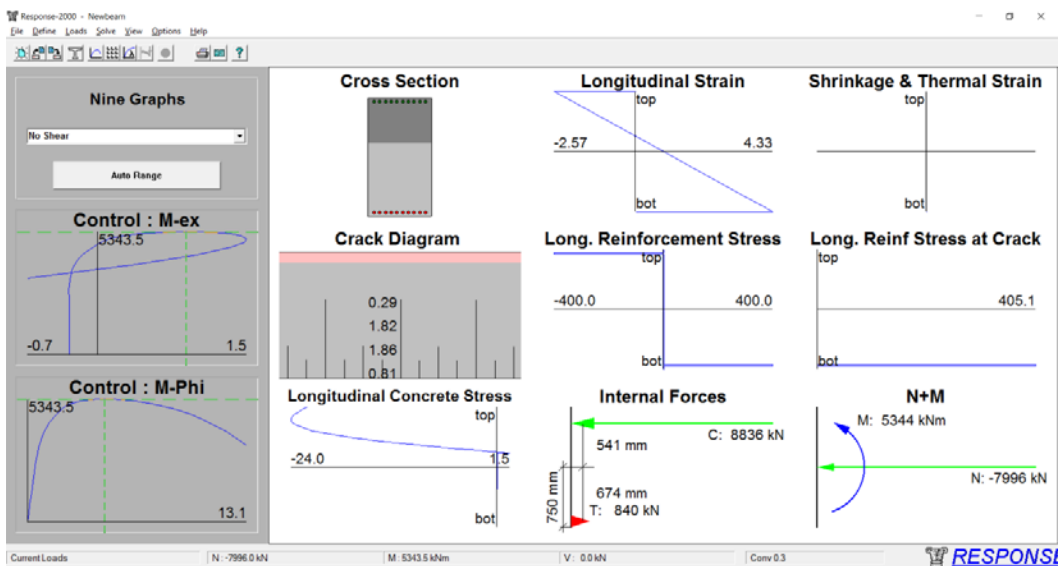


รูปที่ ข-11 แสดงขั้นตอนการประมวลผลของหน้าตัด

จากรูป ข-11 แสดงขั้นตอนการประมวลผลของหน้าตัด

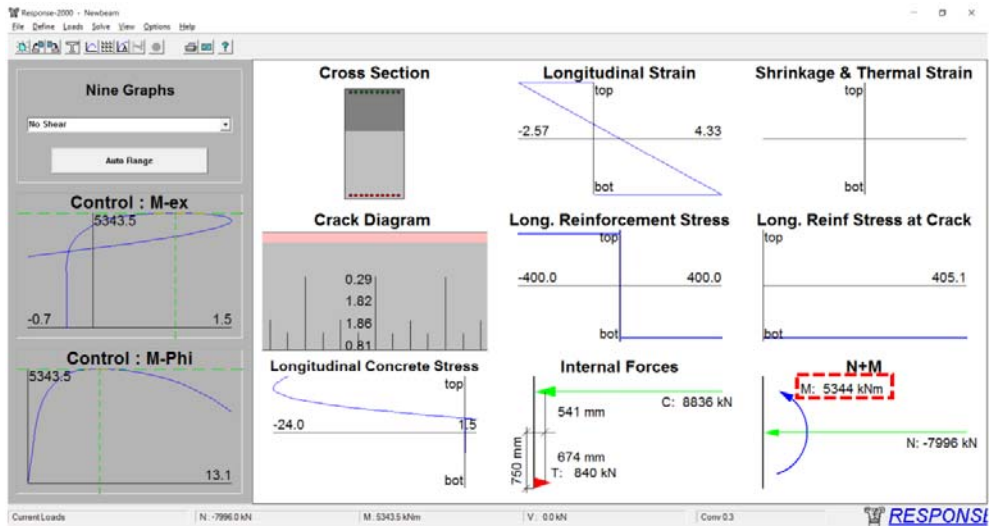
หมายเลข 1 หมายถึง เลือกรหัส Solve ใช้คำสั่ง Section Response

จะปรากฏหน้าต่างการประมวลผลหน้าตัดของเสาหรือคาน



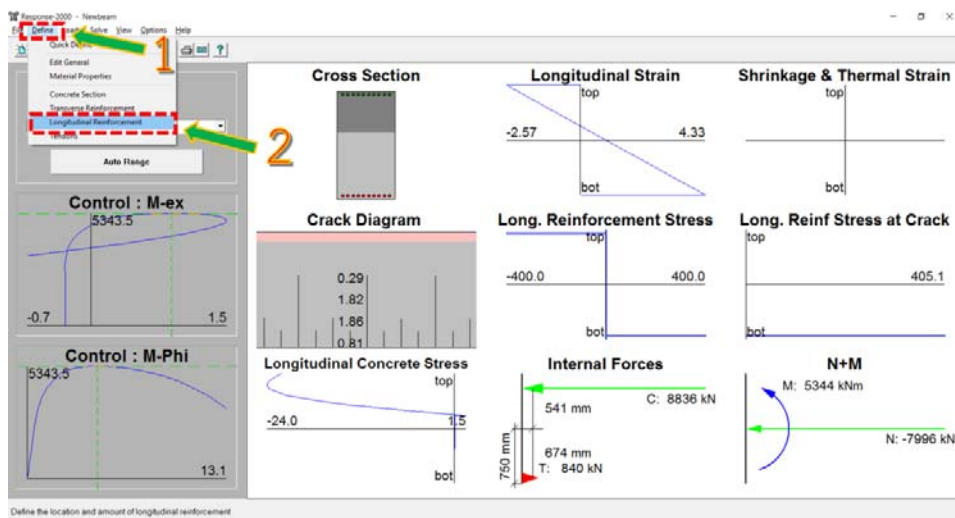
รูปที่ ข-12 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมที่มีการประมวลผลของหน้าตัด

จะเห็นได้ว่าการประมวลผลหน้าตัดของเสาหรือคานจะได้ค่าโมเมนต์ที่ระบุได้ของหน้าตัดที่ทำการครอบกรอบไว้

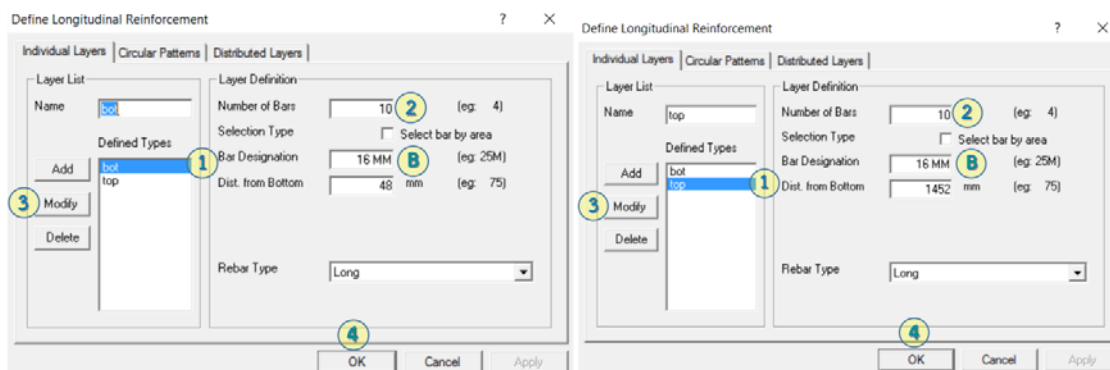


รูปที่ ข-13 ระบุข้อมูลแรงโมเมนต์ที่เกิดจากหน้าตัดที่นำไปคำนวณเป็นค่า M_n

ขั้นตอนที่ 8 ในขั้นตอนนี้จะบอกถึงการแก้ไขเหล็กยื่นที่ได้เสริมตั้งแต่แรกเริ่มต้นของการใส่ค่าในขั้นตอนที่ 4



รูปที่ ข-14 แสดงขั้นตอนการเข้าสู่วิธีการเปลี่ยนข้อมูลเหล็กยื่น

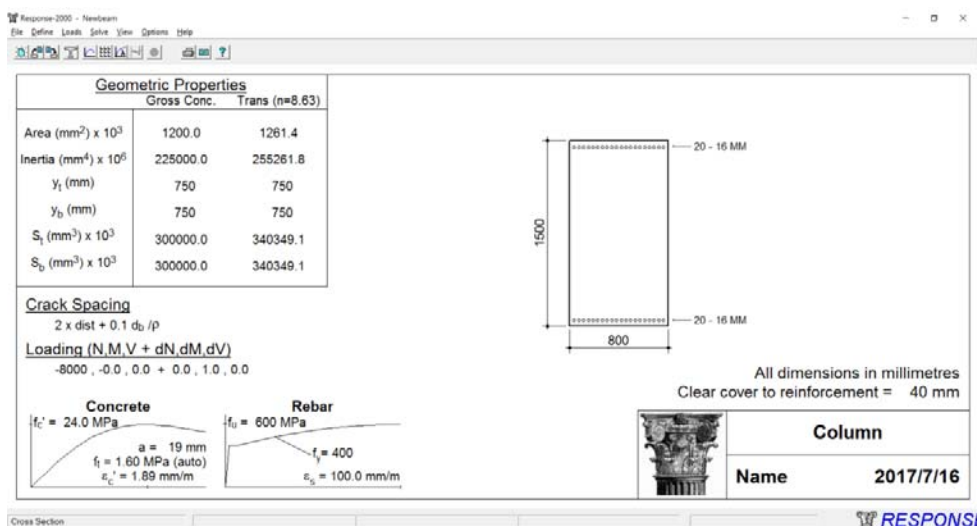


รูปที่ ข-15 แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนข้อมูลเหล็กยื่น

จากรูปที่ ข-15 แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนข้อมูลเหล็กยื่น

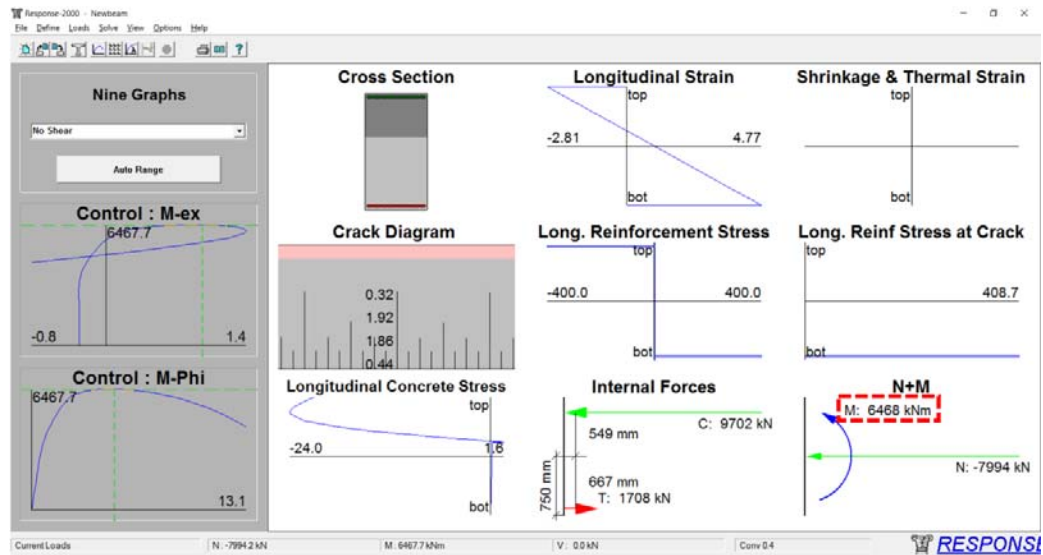
- หมายเลข 1 หมายถึง กดเลือกที่ bot หรือ top
- หมายเลข 2 หมายถึง ทำการเพิ่มลดจำนวนเหล็กยื่นตามต้องการ
- หมายเลข 3 หมายถึง กด Modify
- หมายเลข 4 หมายถึง กด O.K.

หมายเหตุ : B เป็นการเปลี่ยนหน้าตัดของเหล็กยื่นเมื่อต้องการที่จะลดหรือเพิ่มขนาดของเหล็กสามารถย้อนกลับไปดูวิธีการเปลี่ยนที่ขั้นตอนที่ 4



รูปที่ ข-16 แสดงหน้าตัดของโปรแกรมแสดงหน้าตัดเมื่อทำการเปลี่ยนเหล็กยื่น

ขั้นตอนที่ 9 เมื่อทำในขั้นตอนที่ 8 เสร็จแล้ว สามารถประมวลผลของหน้าตัดได้ตามขั้นตอนที่ 7



รูปที่ ข-17 ค่าที่เปลี่ยนไปของการประมวลผลหน้าตัดเมื่อทำการเปลี่ยนเหล็กยื่นเสร็จสิ้น

ประวัติย่อผู้ทำโครงการงาน

ประวัติย่อผู้จัดทำโครงการ

ชื่อชื่อสกุล

นางสาวใหม่ แก้วอุดร

วันเดือนปีเกิด

1 มกราคม 2538

สถานที่เกิด

อ.รัฐประเทศ สระแก้ว

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

367/1 ถนน กม.5 ฝั่งขวาคลองลึก

อ.รัฐประเทศ ต.รัฐประเทศ

จ.สระแก้ว 27120

หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ

0890982299

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2555

มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนอรัญประเทศ

พ.ศ.2556

กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



ประวัติย่อผู้จัดทำโครงการ

ชื่อชื่อสกุล

นายพงศภัค เทพไชย

วันเดือนปีเกิด

23 มีนาคม 2538

สถานที่เกิด

หาดใหญ่ สงขลา

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

93/67 ซอย 5 ณ.กลาง

ถนนปานชูรำลึก ตำบลพิมาน

อำเภอเมือง สตูล 91000

หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ

0887840467

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2555

มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนพิมานพิทยาสรรค์ สตูล

พ.ศ.2556

กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



ประวัติย่อผู้จัดทำโครงการ

ชื่อชื่อสกุล

นายศุภกิตต์ ฤทธิศาสตร์

วันเดือนปีเกิด

10 พฤษภาคม 2538

สถานที่เกิด

เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

45/129 ซอยประชาร่วมใจ 19

ถนนประชาร่วมใจ แขวงทรายกองดินใต้

เขตคลองสามวา กรุงเทพฯ 10510

หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ

0886616611

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2555

มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา สุวินทวงศ์

พ.ศ.2556

กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

