



ผลกระทบของมาตรการออกแบบสะพานเพื่อต้านการไหวสะเทือนของไทย
ที่มีต่ออัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถของเสาเดี่ยวคอนกรีตเสริมเหล็ก

EFFECT OF THAI'S SEISMIC BRIDGE DESIGN MEASURING
ON DEMAND-CAPACITY-RATIO OF REINFORCED CONCRETE SINGLE COLUMNS

ปกรณ์ภัทร บุคชา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2562

ผลกระทบของมาตรการออกแบบสะพานเพื่อด้านการไหลสะท้อนของไทย
ที่มีต่ออัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของเสาเดี่ยวคอนกรีตเสริมเหล็ก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

EFFECT OF THAI'S SEISMIC BRIDGE DESIGN MEASURING
ON DEMAND-CAPACITY-RATIO OF REINFORCED CONCRETE SINGLE COLUMNS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING
(Civil Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2019

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

ผลกระทบของมาตรการออกแบบสะพานเพื่อด้านการไหลสะเทือนของไทย
ที่มีต่ออัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของเสาเดี่ยวกอนกรีตเสริมเหล็ก

ของ

ปกรณ์ภัทร บุคชา

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวិทยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลด) (ดร.สุกิจ ยินดีสุข)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิธิ สุภาพ)

ชื่อเรื่อง	ผลกระทบของมาตรการออกแบบสะพานเพื่อต้านการไหวสะเทือนของไทยที่มีต่ออัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของเสาเดี่ยวคอนกรีตเสริมเหล็ก
ผู้วิจัย	ปกรณภัทร บุคชา
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลด

เนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศไทยเริ่มมีความถี่ และขนาดของความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความเสียหายของบ้าน สถานที่ราชการ วัด ถนน และสิ่งก่อสร้างอื่นๆ กรมทางหลวงจึงได้มีการจัดทำคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวขึ้นในปี พ.ศ.2559 เพื่อเป็นมาตรฐานการออกแบบสะพานและถนนในการป้องกันความเสียหายที่อาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว แต่สำหรับสะพานที่ได้มีการออกแบบและก่อสร้างก่อนที่จะมีคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไวนั้นมีสมรรถนะในการต้านการไหวสะเทือนมากน้อยเพียงใดนั้นจึงเป็นสิ่งที่ควรตรวจสอบเพื่อเป็นแนวทางตั้งรับและป้องกันความเสียหายของชีวิตและทรัพย์สินที่อาจจะเกิดขึ้น โดยงานวิจัยนี้แบ่งพื้นที่การศึกษาเป็น 2 บริเวณที่อาจได้รับผลกระทบจากการไหวสะเทือน (1) บริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล (2) บริเวณภาคเหนือและตะวันตก และแบ่งกรณีศึกษาย่อยออกอีก 2 ช่วงเวลา คือ (ก) สะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 (ข) สะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 โดยใช้ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการต้านทานการไหวสะเทือนในรูปแบบของอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถทั้งด้านการต้านทานแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด จากผลงานวิจัยพบว่าอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถของโมเมนต์เป็นตัวแปรที่ควบคุมการวิบัติ โดยสะพานในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑลจะมีสมรรถนะในการต้านการไหวสะเทือนที่ดีกว่าในพื้นที่ภาคเหนือและตะวันตก และยังทำให้ทราบถึงสมรรถนะของสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 จะมีสมรรถนะในการต้านทานการไหวสะเทือนที่ดีกว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 แสดงถึงแนวโน้มสมรรถนะของสะพานในประเทศไทยมีสมรรถนะที่ดีขึ้นตามลำดับ แต่จะมีบางสะพานที่มีค่าอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถสูงกว่ากำหนดซึ่งควรเฝ้าระวังและเสริมกำลังเพื่อให้สะพานมีสมรรถนะในการต้านทานการไหวสะเทือนได้ตามคู่มือกำหนด

คำสำคัญ : เสาเดี่ยวสะพาน, แผ่นดินไหว, อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถ, กำลังเฉือน, กำลังดัด

Title	EFFECT OF THAI'S SEISMIC BRIDGE DESIGN MEASURING ON DEMAND-CAPACITY-RATIO OF REINFORCED CONCRETE SINGLE COLUMNS
Author	PAGORNPAT BUDCHA
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2019
Thesis Advisor	Assistant Professor Panuwat Joyklad , Ph.D.

Due to the fact the frequency and the hazardous nature of seismic activities in Thailand affect important structures, such as residential areas, government offices, historical sites, roads, and others. Therefore, the Department of Highways released a Manual of bridge and road designs for seismic resistance in 2016 to use as a standard in bridge designed in Thailand and to reduce the aforementioned issues. The bridges in Thailand designed prior to the releases of the manual has to be examined to prepare for upcoming problems and to prevent losses that may occur in the future. This study examines two areas of the bridges that may be affected by the seismic activities which are (1) Bangkok and its boundary provinces (2) north - west region of Thailand, divided into two time periods, which are as follows: (a) bridges designed before 1998; and (b) bridges designed between 1999 and 2016. This examination used the structural index of seismic resistance in terms of demand-capacity-ratio (DCR) by examining shear resistance and bending moment. The results found that DCR_M is the variable that controls the damage caused by seismic activities. The study shows that bridges in Bangkok and boundary provinces had better seismic resistance than the bridges in the north - west region. Moreover, the bridges designed between 1999 and 2016 have better seismic resistance than bridges designed before 1998. The trends for the performance of bridge safety design are gradually higher. However, there are some bridges with a DCR that is higher than the acceptable value which need attention on renovation to increase seismic resistance accepted by the Manual of bridge and road designs for seismic resistance.

Keyword : Bridge single column, seismic, demand-capacity-ratio, Shear Strength, Flexure Strength

กิตติกรรมประกาศ

การทำปริญญานิพนธ์นี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลด์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่คอยให้คำปรึกษา อบรม สั่งสอน ทั้งด้านวิชาการ การปฏิบัติงาน ความขยันหมั่นเพียร และด้านอื่นๆมากมาย และยังช่วยในการตรวจสอบแก้ไขให้ปริญญานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์และถูกต้องจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณผู้อำนวยการสำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง ดร.สุกิจ ยินดีสุข นายสุรเชษฐ์ เลขาจารย์กุล และนายอินศวร มณีธร เจ้าหน้าที่กรมทางหลวงที่ได้ให้การสนับสนุนในการค้นหาลักษณะก่อสร้างของสะพานประเภทเสาเดี่ยวคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบและก่อสร้างตั้งแต่อดีตจนถึงปี พ.ศ.2559 ซึ่งอยู่ในความดูแลของกรมทางหลวงบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ภาคเหนือ และภาคตะวันตก

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา หัวหน้างาน และเจ้าหน้าที่ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือ ติดตามประสานงานต่างๆให้เป็นไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บิดา มารดา ลุง ป้า ที่คอยช่วยอบรมสั่งสอน และให้กำลังใจเสมอมา ในการเรียนและเขียนวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ปกรณภัทร บุคชา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
ปัญหาการวิจัย	4
ขอบเขตการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
กลไกการเกิดแผ่นดินไหว	6
แผ่นดินไหวกับประเทศไทย.....	8
ผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหวต่อโครงสร้าง	11
ชนิดและประเภทของสะพาน	12
การจำแนกประเภทของสะพานตามระบบโครงสร้างในการถ่ายแรง.....	12
การออกแบบสะพาน	15
การออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Design, ASD)	17
วิธีออกแบบตัวค้ำน้ำหนักบรรทุก (Load Factor Design, LFD).....	17

วิธีออกแบบตัวคุณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design, LRFD)	18
การออกแบบสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย	19
การออกแบบโดยวิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความแรงของโครงสร้างคงที่ ร้อยละ 6	19
การออกแบบโดยวิธีแผนที่เสี่ยงภัย ศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วินิชชัย และคณะ ร่วมกับ AASHTO 2002	20
ค่าความแข็งแรงแรง (Stiffness, K)	22
ค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดิน	23
การออกแบบโดยคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านถนนแผ่นดินไหว	25
ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Acceleration Response Spectrum)	26
ประเภทของสะพานและความสำคัญของสะพานและประเภทของสมรรถนะด้านถนน	
แผ่นดินไหว	31
การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวจากทิศทางต่างๆ	32
การคำนวณแรงต่างๆ	34
น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load, DL)	34
น้ำหนักจร (Live Load, LL)	34
น้ำหนักของยานพาหนะ (Highway Load)	35
แรงกระแทก (impact force, IM)	36
การลดค่าน้ำหนักบรรทุกจร (reduction in load intensity)	37
แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal forces, CE)	38
แรงเบรก (breaking force)	39
การรวมแรง (load combination)	39
การคำนวณกำลังดัดของหน้าตัด	43
การคำนวณหาโมเมนต์ในหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก	43

การคำนวณหากำลังรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดของหน้าตัดเสาแบบแกนเดียว	44
การตรวจสอบกำลังของหน้าตัดในการรับแรงสองแกน.....	53
รูปแบบการประเมินกำลังของหน้าตัด	56
การตรวจสอบค่าโมเมนต์ดัดในเสา	60
กลไกการต้านทานแรงเฉือน	60
กำลังต้านแรงเฉือนจากส่วนของคอนกรีต	61
กำลังต้านแรงเฉือนจากส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน	62
การประเมินผลกระทบของมาตรการออกแบบเพื่อด้านทานแผ่นดินไหวกับเสาสะพานที่มีอยู่เดิม	64
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	66
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	70
วัสดุอุปกรณ์	70
วิธีการดำเนินการ	70
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	76
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	76
การวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของหน้าตัด	79
การวิเคราะห์อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถของหน้าตัดเสาต่อม่อ	87
การวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย	97
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	106
สรุปผลการวิจัย.....	106
ข้อเสนอแนะ	107
บรรณานุกรม	109
ประวัติผู้เขียน.....	113



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ตารางตัวคูณปรับแก้ผลตอบสนอง (response modification factor, R)	21
ตาราง 2 สัมประสิทธิ์สำหรับคุณสมบัติของดิน (soil structure resonance coefficients)	22
ตาราง 3 ตารางแสดงค่าความแข็งแกร่ง (stiffness, K)	23
ตาราง 4 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับพื้นที่โซนต่างๆ (อัตราส่วนความหน่วง 5.0%) ของพื้นที่แอ่งกรุงเทพ	29
ตาราง 5 ประเภทสมรรถนะด้านแรงแผ่นดินไหวที่สัมพันธ์กับผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม	32
ตาราง 6 แสดงค่าของ R-Factor สำหรับโครงสร้างส่วนล่าง	33
ตาราง 7 ตารางแสดงหน่วยน้ำหนักของวัสดุต่างๆ	34
ตาราง 8 แรงกระแทก (impact force, IM)	37
ตาราง 9 ตัวคูณจำนวนช่องจราจร	38
ตาราง 10 ค่า Load Factor สำหรับคูณปรับค่าแรงต่างๆที่ใช้ในการรวมผลแบบเชิงเส้น	40
ตาราง 11 ค่าของแรงกระทำ (γ_p)	42
ตาราง 12 การจำแนกสะพานที่ทำการวิเคราะห์ตามช่วงเวลาในการออกแบบสะพานของประเทศ ไทย	71
ตาราง 13 รายชื่อสะพานและลักษณะของสะพานในบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล	71
ตาราง 14 รายชื่อสะพานและลักษณะของสะพานในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก	72
ตาราง 15 แผนการจัดทำปริญญานิพนธ์	75
ตาราง 16 ข้อมูลทั่วไปในการวิเคราะห์เสาบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล	76
ตาราง 17 ข้อมูลทั่วไปในการวิเคราะห์เสาบริเวณภาคเหนือและตะวันตก	77
ตาราง 18 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อหน้าตัดเสาสะพาน (ρ_l)	81
ตาราง 19 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงอัดตามแนวแกนประลัษณ์ต่อความแข็งแรงของหน้าตัด σ_0 ..	85

ตาราง 20 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถของโมเมนต์ดัดสองแกน (DCR_M)	89
ตาราง 21 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถของแรงเฉือน (DCR_V)	93
ตาราง 22 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความปลอดภัยต่อโมเมนต์ดัด $F.S._M$	99
ตาราง 23 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความปลอดภัยต่อแรงเฉือน $F.S._V$	103



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 การวิบัติของสะพาน ณ เมือง โกเบ ประเทศญี่ปุ่น ในปี 1995.....	2
ภาพประกอบ 2 รูปการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก.....	6
ภาพประกอบ 3 เขื่อนฮูเวอร์ (Hoover Dam)	7
ภาพประกอบ 4 วงแหวนแห่งไฟ (Ring of fire)	8
ภาพประกอบ 5 แผนที่รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย	9
ภาพประกอบ 6 บริเวณศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวกับเมื่อแมกนิจิโก และความเสียหายของ สะพานที่ได้รับจากเหตุการณ์ดังกล่าว	11
ภาพประกอบ 7 ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว	12
ภาพประกอบ 8 สะพานทางรถไฟแบบคาน	13
ภาพประกอบ 9 สะพานแบบโครงถัก	13
ภาพประกอบ 10 สะพานพระราม 7.....	14
ภาพประกอบ 11 สะพานทาชมกู.....	14
ภาพประกอบ 12 สะพานโกลเดนเกต (Golden Gate Bridge)	15
ภาพประกอบ 13 สะพานพระราม 9.....	15
ภาพประกอบ 14 แผนที่แสดง contour line ของ PGA_0 / G และเขตแผ่นดินไหวของประเทศไทย ที่กำหนดตามเกณฑ์ของ $UBC1991$ (เป็นหนึ่ง, 2537)	25
ภาพประกอบ 15 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับ พื้นที่ทั่วประเทศไทย(ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$	27
ภาพประกอบ 16 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับ พื้นที่ทั่วประเทศไทย(ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} > S_{DS}$	27
ภาพประกอบ 17 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับ โซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ สำหรับโซน 1-6	28

ภาพประกอบ 18 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับ โซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ สำหรับโซน 7-10	29
ภาพประกอบ 19 แสดงแนวแรงในการคิดผลแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางต่างๆ	32
ภาพประกอบ 20 การออกแบบโดยนำนักยุทธโปกรณ์ (design tandem).....	35
ภาพประกอบ 21 การออกแบบโดยนำหนักบรรทุก (design truck)	36
ภาพประกอบ 22 การออกแบบโดยนำหนักแผ่กระจาย (design lane)	36
ภาพประกอบ 23 การกระจายตัวของความเครียด หน่วยแรง และแรงในหน้าตัดที่สภาวะประลัย 44	
ภาพประกอบ 24 ความสัมพันธ์ของค่า ϕ จากความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง ตามมาตรฐาน AASHTO 2010	46
ภาพประกอบ 25 รูปแบบที่เกิดให้เกิดโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงอัดตามแนวแกน	47
ภาพประกอบ 26 ความสัมพันธ์ของแรงอัด และโมเมนต์ดัด	48
ภาพประกอบ 27 การกระจายของแรงเพื่อการคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วงพลาสติก	48
ภาพประกอบ 28 การกระจายของความเครียด หน่วยแรงภายใน และแรงภายในหน้าตัด	49
ภาพประกอบ 29 จุดสำคัญสำหรับกราฟปฏิสัมพันธ์	51
ภาพประกอบ 30 แนวคิดในการปรับลดค่ากราฟปฏิสัมพันธ์ซึ่งคำนวณได้ตามทฤษฎี หรือแบบ กำลังระบุ ให้เป็นกราฟปฏิสัมพันธ์เพื่อการออกแบบ.....	52
ภาพประกอบ 31 จุดที่เริ่มปรับลดเพิ่มค่า ϕ	52
ภาพประกอบ 32 จุดสำคัญทั้ง 7 สำหรับการสร้างกราฟปฏิสัมพันธ์อย่างง่าย	53
ภาพประกอบ 33 แรงกระทำที่เกิดจากการเอียงศูนย์ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ดัด 2 แกน	54
ภาพประกอบ 34 พื้นที่ผิวบิดของเสาที่ต้องรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดสองแกน	54
ภาพประกอบ 35 แนวแกนสะเทิน มุมของแกนที่หมุนไปและความเครียดบนหน้าตัดที่เกิดโมเมนต์ ดัด 2 แกน.....	55
ภาพประกอบ 36 พื้นที่ผิวพื้นฐาน S_1	56
ภาพประกอบ 37 พื้นที่ผิวส่วนกลับ S_2	56

ภาพประกอบ 38 พื้นผิววิบัติ S_3	56
ภาพประกอบ 39 แบบจำลองวิธีแรงกระทำส่วนกลับ.....	57
ภาพประกอบ 40 เส้นชั้นความสูงของพื้นผิววิบัติ S_3 ตามแนวราบของแรง P_n	58
ภาพประกอบ 41 เส้นชั้นความสูงของ P_n แบบไร้มิติ.....	58
ภาพประกอบ 42 พื้นผิววิบัติ S_4	58
ภาพประกอบ 43 ความสัมพันธ์ของกำลังดัดสองแกน	59
ภาพประกอบ 44 โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหว.....	60
ภาพประกอบ 45 แนวคิด the 45° truss model ของ Ritter W. ในปี ค.ศ.1899.....	62
ภาพประกอบ 46 การวางเหล็กเสริมรับแรงเฉือน และแนวรอยร้าวจากการเฉือน สำหรับพิจารณา V_s	63
ภาพประกอบ 47 ความสัมพันธ์ความแข็งแรงของเสาที่มีโมเมนต์ดัดสองแกน	65
ภาพประกอบ 48 แรงกระทำจากหน่วยแรงภายนอกที่ส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาตอม่อ	73
ภาพประกอบ 49 อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด (ρ_l) เสาเดี่ยว บริเวณที่ 1 ต้นเตี้ย และต้นสูง	79
ภาพประกอบ 50 อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด (ρ_l) เสาตอม่อเดี่ยว บริเวณที่ 2 ต้นเตี้ย และต้นสูง.....	80
ภาพประกอบ 51 อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด (ρ_l) เสาตอม่อเดี่ยว บริเวณที่ 1 และ 2 ต้นเตี้ย และต้นสูง	81
ภาพประกอบ 52 อัตราส่วนแรงกระทำต่อความแข็งแรงของหน้าตัด (σ_0) เสาตอม่อเดี่ยว บริเวณที่ 1 ต้นสั้น และต้นยาว.....	83
ภาพประกอบ 53 อัตราส่วนแรงกระทำต่อความแข็งแรงของหน้าตัด (σ_0) เสาตอม่อเดี่ยว บริเวณที่ 2 ต้นเตี้ย และต้นสูง.....	84
ภาพประกอบ 54 อัตราส่วนแรงกระทำต่อความแข็งแรงของหน้าตัด (σ_0) เสาตอม่อเดี่ยว บริเวณที่ 1 และ 2 ต้นเตี้ย และต้นสูง	85

ภาพประกอบ 55 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถโมเมนต์ดัดสองแกน (DCR_M) เสาคอมม่อเดียว บริเวณที่ 1 ต้นเตี้ย และต้นสูง.....	87
ภาพประกอบ 56 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถโมเมนต์ดัดสองแกน (DCR_M) เสาคอมม่อเดียว บริเวณที่ 2 ต้นเตี้ย และต้นสูง.....	88
ภาพประกอบ 57 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถโมเมนต์ดัดสองแกน (DCR_M) เสาคอมม่อเดียว บริเวณที่ 1 และ 2 ต้นเตี้ย และต้นสูง.....	89
ภาพประกอบ 58 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถแรงเฉือน (DCR_V) เสาคอมม่อเดียว บริเวณที่ 1 ต้นเตี้ย และต้นสูง.....	91
ภาพประกอบ 59 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถแรงเฉือน (DCR_V) เสาคอมม่อเดียว บริเวณที่ 2 ต้นเตี้ย และต้นสูง.....	92
ภาพประกอบ 60 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถแรงเฉือน (DCR_V) เสาคอมม่อเดียว บริเวณที่ 1 และ 2 ต้นเตี้ย และต้นสูง.....	93
ภาพประกอบ 61 ที่ตั้งและอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถ (DCR) ของแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด เสาคะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล.....	95
ภาพประกอบ 62 ที่ตั้งและอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถ (DCR) ของแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด เสาคะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก.....	95
ภาพประกอบ 63 อัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัด ($F.S._M$) เสาคะพานบริเวณที่ 1 ต้นเตี้ยและต้นสูง.....	97
ภาพประกอบ 64 อัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัด ($F.S._M$) เสาคะพานบริเวณที่ 2 ต้นเตี้ยและต้นสูง.....	98
ภาพประกอบ 65 อัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัด ($F.S._M$) เสาคะพานบริเวณที่ 1 และ 2 ต้นเตี้ยและต้นสูง.....	99
ภาพประกอบ 66 อัตราส่วนความปลอดภัยของแรงเฉือน ($F.S._V$) เสาคะพานบริเวณที่ 1 ต้นเตี้ยและต้นสูง.....	101
ภาพประกอบ 67 อัตราส่วนความปลอดภัยของแรงเฉือน ($F.S._V$) เสาคะพานบริเวณที่ 2 ต้นเตี้ยและต้นสูง.....	102

ภาพประกอบ 68 อัตราส่วนความปลอดภัยของแรงเฉือน ($F.S._v$) เสาสะพานบริเวณที่ 1 และ 2 ต้นตี้ยและต้นสูง.....	103
--	-----



บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

แผ่นดินไหวเกิดจากการที่แผ่นเปลือกโลกซึ่งวางตัวประกอประกกันคล้ายจิกซอเกิดการเคลื่อนตัว โดยแผ่นดินไหวเกิดได้ 2 สาเหตุคือ (1) จากกระบวนการทางธรรมชาติ หรือ (2) จากกิจกรรมที่มนุษย์กระทำ ทั้งนี้หากศึกษาตามภูมิศาสตร์ของประเทศไทยจะพบว่า ประเทศไทยไม่ได้ตั้งอยู่ในบริเวณที่มีการเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรง หรืออยู่ใกล้กับบริเวณของแผ่นเปลือกโลกที่ยังคงมีการเคลื่อนตัว แต่นั่นก็ไม่ใช่เหตุผลที่แสดงว่าประเทศไทยจะปลอดภัยจากแผ่นดินไหว เนื่องจากประเทศไทยก็ยังอยู่ใกล้แนวรอยเลื่อนบางรอย และจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ผ่านมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเมื่อปี พ.ศ. 2554 ซึ่งเกิดแผ่นดินไหวทางภาคเหนือของประเทศไทย และประเทศเพื่อนบ้าน ส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้นมากมายอย่างที่ไม่ได้คาดคิดเอาไว้ โดยสิ่งที่มีความสำคัญไม่ควรให้เกิดความเสียหายสำหรับโครงสร้างที่ผู้คนใช้สัญจรซึ่งหนีไม่พ้นคือสะพาน เนื่องจากสะพานคือโครงสร้างที่ช่วยให้มนุษย์ข้ามสิ่งกีดขวาง อำนวยความสะดวกในการสัญจร ติดต่อค้าขาย อพยพ หรือไม่ว่าจะเป็นทางด้านการทหาร โดยมีกรณีศึกษาเกี่ยวกับการวิบัติของสะพานที่เกิดจากแผ่นดินไหว ณ เมืองโกเบ ประเทศญี่ปุ่น ในวันที่ 17 ม.ค. 2538 ขนาด 7.2 มาตรการริกเตอร์ ทำให้เกิดความเสียหายของอาคารบ้านเรือน รวมถึงโครงสร้างอื่นๆ เป็นจำนวนมาก และโครงสร้างในส่วนของเขาที่รองรับตัวสะพานได้เกิดความเสียหายที่บริเวณโคนเสา ส่งผลให้สะพานโคนล้มลงมาทั้งสะพาน ก่อให้เกิดความเสียหายเป็นอย่างมากและทำให้การสัญจรบริเวณดังกล่าวเกิดความไม่สะดวกเป็นไปด้วยความยากลำบาก ไม่ว่าจะเป็นการขนส่งต่างๆ หรือการลำเลียงผู้ได้รับบาดเจ็บไปยังสถานที่ต่างๆ โดยสำหรับการวิบัติของเสาสะพานมีรูปแบบในการวิบัติที่หลากหลาย โดยการวิบัติที่มีความสำคัญและไม่ควรให้เกิดขึ้นคือการวิบัติโดยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด หากโครงสร้างเสาดังกล่าวมีสมรรถนะที่ไม่เพียงพอในการต้านทานแรงเฉือน หรือโมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงของแผ่นดินไหวอาจส่งผลให้เสาเกิดการวิบัติดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 การวิบัติของสะพาน ณ เมือง โกเบ ประเทศญี่ปุ่น ในปี 1995

ที่มา : (Danielle Venton, 2016)

สำหรับเหตุการณ์ภัยพิบัติเนื่องจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยซึ่งเกิดขึ้นบ่อยครั้ง และต่อเนื่อง จึงทำให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้ตระหนักถึงความจำเป็นในการออกแบบโครงสร้างต่างๆ ที่อาจได้รับผลกระทบต่อแผ่นดินไหวจึงได้ออกกฎกระทรวงฉบับ 49 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร (สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา, พ.ศ.2540) ซึ่งกำหนดในกฎหมายฉบับนี้ใช้สำหรับการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวซึ่งถือว่าเป็นฉบับแรกของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2547 ได้มีเหตุการณ์การเกิดแผ่นดินไหวขึ้นในมหาสมุทรอินเดียเหนือเกาะสุมาตรา ส่งผลให้เกิดสึนามิเข้าโจมตีที่แทบชายฝั่งของจังหวัด ภูเก็ต พังงา กระบี่ ตรัง ระนอง และสตูล ซึ่งเป็นเหตุการณ์ร้ายแรงทำให้มีผู้เสียชีวิต และทรัพย์สินเสียหาย ส่งผลให้ในปี พ.ศ. 2550 จึงได้มีการปรับปรุงแก้ไขกฎกระทรวงที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหวขึ้นและเพิ่มพื้นที่เฝ้าระวังในพื้นที่ที่อาจเกิดสึนามิเข้าไปในข้อกำหนดด้วย โดยในข้อกำหนดของกฎกระทรวงแบ่งเป็น 3 พื้นที่ (1) บริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล (2) บริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกบางจังหวัด (3) พื้นที่เฝ้าระวังคือ แถบชายฝั่งที่อาจได้รับผลกระทบจากสึนามิที่เป็นแรงกระทำด้านข้าง เรียกว่ากำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา, พ.ศ.2550) จากนั้นในปี พ.ศ. 2552 กรมโยธาธิการและผังเมืองได้จัดทำมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว เรียกว่า มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

(มยผ.1302-52) (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552) ในปี พ.ศ. 2554 ได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้นที่ อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นไม่ว่าจะเป็นทรัพย์สิน อาคาร บ้านเรือนเสียหาย ถนน สถานที่ราชการ ถูกทำลาย ทำให้กรมทางหลวงได้พิจารณาจัดทำมาตรฐาน คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินงานแผ่นดินไหวขึ้นในปี พ.ศ. 2559 เพื่อให้เป็นแนวทางในการจัดทำออกแบบโครงสร้างของสะพาน และถนนให้มีความสามารถในการต้านแผ่นดินไหวที่อาจจะเกิดขึ้นได้

แม้ว่าจะเกิดข้อกำหนดในการออกแบบอาคาร และสะพานในการต้านทานแผ่นดินไหวอย่างต่อเนื่องและเป็นปัจจุบัน แต่ถ้าหากกล่าวถึงความเสี่ยงของสะพานที่ได้ทำการก่อสร้างไว้ก่อนหน้านี้ที่จะมีการจัดทำคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินงานแผ่นดินไหวว่ามีความเสี่ยงในการวิบัติมากน้อยเพียงใดเมื่อเกิดเหตุการณ์อาจไม่สามารถตอบได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการมีคู่มือเข้ามานี้ทำให้สามารถออกแบบสะพานให้มีความสามารถที่เพียงพอต่อการต้านทานแผ่นดินไหวตามคู่มือกำหนด หรือประเมินกำลังของเสาสะพานที่ได้ทำการก่อสร้างไว้แล้วว่ามี ความสามารถและความปลอดภัยในการต้านทานแผ่นดินไหวมากน้อยเพียงใด โดยการตรวจสอบ โครงสร้างสะพานว่ามีความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวมากน้อยเพียงใดสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่จะทำให้ทราบถึงความสามารถสุดท้ายก่อนที่เสาสะพานจะเกิดการวิบัติ คือการสร้าง อัตราส่วนระหว่างความต้องการต่อวิสัยสมารถ ของเสาสะพาน Demand Capacity Ratio (DCR) โดยคิดจากโมเมนต์ที่สภาวะประลัยของหน้าตัดเสา (M_u) ต่อ โมเมนต์ออกแบบ (ϕM_n) นั่นคือ Q_{ult} ต่อค่าวิสัยสมารถหรือกำลังออกแบบ (ϕR_n)

ดังนั้น การศึกษาหาอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถของเสาสะพาน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่สามารถบอกถึงความสามารถในการต้านแผ่นดินไหวของสะพานนั้น จึงมีความจำเป็น โดยเฉพาะสะพานที่มีอยู่เดิมหรือสะพานที่ถูกออกแบบก่อนที่จะมีคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินงานแผ่นดินไหว ฉบับปี พ.ศ. 2559 โดยข้อมูลการศึกษาที่จะได้จากโครงการวิจัยนี้อาจใช้เป็นข้อมูลสำหรับใช้ตั้งรับและวางแผนการเสริมกำลังโครงสร้าง ในกรณีที่อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ หรือการแสดงให้เห็นถึงความไม่คุ้มทุนของการก่อสร้างที่มากเกินไปเพื่อนำไปปรับใช้ต่อไป โดยสำหรับงานวิจัยจะเลือกพิจารณาเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยว เนื่องจากเสาสะพานประเภทนี้หากได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวและมีสมรรถนะที่ไม่เพียงพอต่อการต้านทานแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดดังกล่าวจะทำให้เสาสะพานเกิดความเสียหาย และเมื่อเกิดการวิบัติจะเกิดแบบทันทีทันใดส่งผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียง ทำให้เกิดอันตรายอย่าง ไม่สามารถตั้งรับหรือป้องกันได้ทัน ต่างจากเสาสะพานในรูปแบบอื่นๆที่จะมีเสาหรือองค์อาคารที่

ยังมีความสามารถช่วยในการยึดรั้งได้ทำให้สามารถช่วยลดความสูญเสียลงได้เมื่อเกิดความเสียหาย และเสาสะพานประเภทเสาเดี่ยวนี้อย่างเป็นตัวแทนของเสาสะพานที่ถูกใช้อย่างมากในบริเวณพื้นที่ที่อยู่ใจกลางเมือง หรือบริเวณที่มีพื้นที่ก่อสร้างจำกัด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาแนวทางการออกแบบเสาสะพานด้านแผ่นดินไหว ตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหว ฉบับปี พ.ศ. 2559
2. ประเมินอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของเสาสะพานที่ถูกออกแบบในช่วงเวลาต่างๆ ของประเทศไทย ที่อาจจะเกิดการไหวสะเทือนและส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเสาสะพาน
3. เปรียบเทียบอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของเสาสะพานตามพื้นที่ความเสี่ยงในประเทศไทยทั้งบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล และภาคเหนือและตะวันตก ที่อาจจะเกิดการไหวสะเทือนและส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเสาสะพาน

ปัญหาการวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีความเสียหายของสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ที่เกิดจากผลกระทบของการเกิดแผ่นดินไหว และหน่วยงานกรมทางหลวงได้มีการจัดทำคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านทานแผ่นดินไหว ขึ้นในปี พ.ศ. 2559 ผู้วิจัยจึงมีความต้องการตรวจสอบสมรรถนะของสะพานที่ก่อสร้างไว้ก่อนหน้านี้ที่มีคู่มือดังกล่าวถึงสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของสะพานในพื้นที่เสี่ยงที่อาจได้รับผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหวว่ามีสมรรถนะมากน้อยเพียงใด และการออกแบบสะพานแต่ละช่วงเวลามีผลต่อสมรรถนะของสะพานอย่างไร เมื่อประเมินด้วยคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหว เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการตั้งรับและวางแผนการเสริมกำลังโครงสร้างเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยว ให้มีสมรรถนะที่เพียงพอและสามารถใช้งานได้อย่างไม่เกิดอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น

ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยจะมุ่งเน้นในด้านการตรวจสอบกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยวที่สัญจรโดยรถยนต์ที่อยู่ในความดูแลของกรมทางหลวง โดยวิธีออกแบบเต็มวิสัยความสามารถ (Capacity Design)

1. พิจารณาเฉพาะเสาสะพานแบบเสาเดี่ยวคอนกรีตเสริมเหล็ก หล่อในที่ก่อสร้างในประเทศไทย
2. แบ่งพื้นที่การวิจัยตามความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นได้บริเวณที่มีรอยเลื่อนอยู่ในพื้นที่หรือบริเวณที่เกิดจากคุณลักษณะของดินในพื้นที่ ซึ่งแบ่งเป็น แบบโครงสร้างจากพื้นที่บริเวณที่ 1 (กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล) และบริเวณที่ 2 (บริเวณภาคเหนือ และภาคตะวันตก)
3. สะพานที่นำมาวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ โดย (1) จะเป็นสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 (2) จะเป็นสะพานที่ออกแบบช่วง พ.ศ. 2542-2559

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

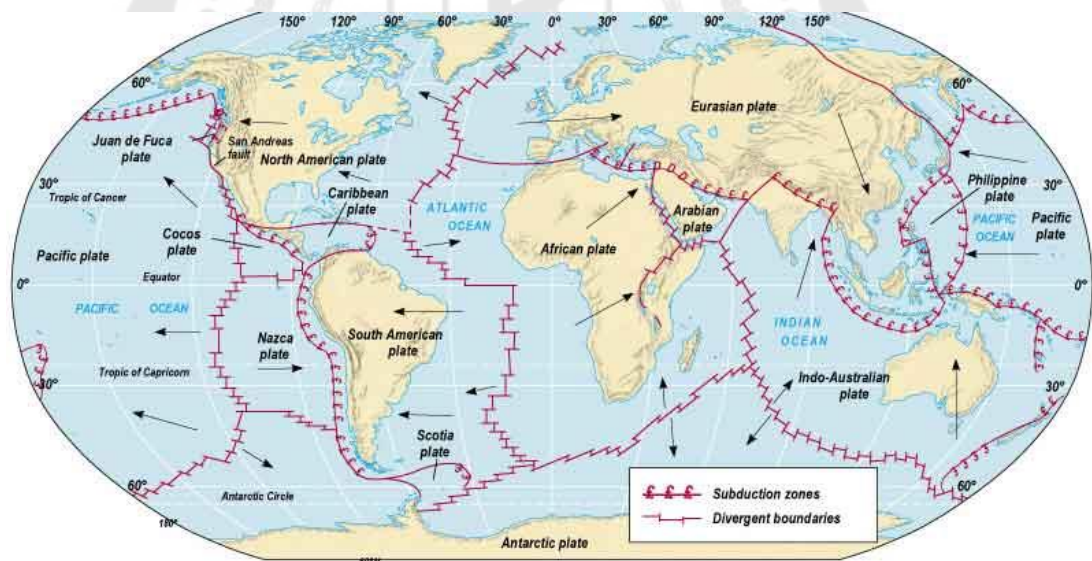
1. ทำให้ทราบถึงการออกแบบเสาสะพานด้านแผ่นดินไหว ตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหว ฉบับปี พ.ศ. 2559 (กรมทางหลวง, 2559) ว่ามีระเบียบวิธีอย่างไร
2. สามารถประเมินอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของเสาสะพานที่ถูกออกแบบในช่วงเวลาต่างๆของประเทศไทยเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น ว่าสมรรถนะเฉลี่ยของสะพานที่ถูกสร้างแต่ละช่วงเวลา มีสมรรถนะอยู่ในระดับใดควรได้รับการปรับปรุงแก้ไขหรือไม่เมื่อใช้คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหวเป็นมาตรฐานในการประเมิน
3. สามารถเปรียบเทียบอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของเสาสะพานที่ถูกออกแบบเพื่อก่อสร้างบริเวณพื้นที่ที่มีความเสี่ยงของแผ่นดินไหว มีสมรรถนะที่สามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้มากน้อยเพียงใด ไม่ว่าจะเป็นภาคเหนือและภาคตะวันตกที่ยังคงเกิดการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน เมื่อใช้คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหว ของกรมทางหลวงเป็นมาตรฐานในการประเมิน

บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กลไกการเกิดแผ่นดินไหว

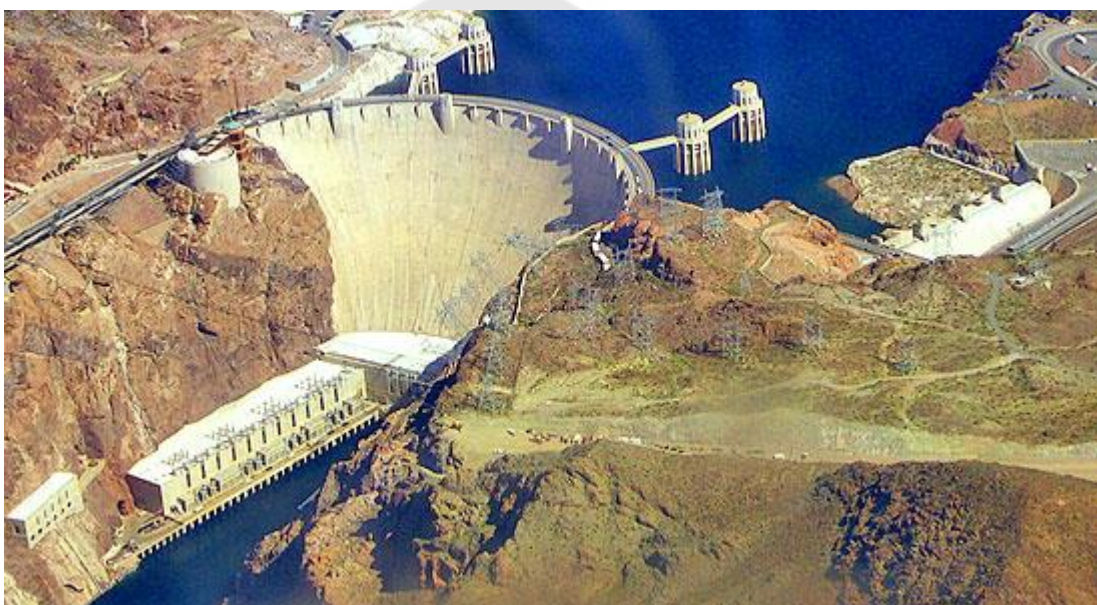
แผ่นดินไหวเกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดินอันเนื่องมาจากการปลดปล่อยพลังงานเพื่อระบายความเครียดที่สะสมไว้ให้เกิดความสมดุลโดยสามารถเกิดได้สองปัจจัย คือการเกิดแผ่นดินไหวจากธรรมชาติ โดยสาเหตุการเกิดแผ่นดินไหวจากธรรมชาตินั้นเกิดจากการที่แผ่นเปลือกโลก ที่มีลักษณะคล้ายชิ้นส่วนวางเรียงและต่อเข้าด้วยกัน ทั้งที่เป็นมหาสมุทร พื้นดิน และภายใต้แผ่นเปลือกโลกลงไปนั้นมีความร้อนที่สูงมากก่อให้เกิดกระแสการหมุนเวียนของแมทเทิน (mantle) ทำให้ส่งผลถึงแผ่นเปลือกโลกเกิดการเคลื่อนตัวในรูปแบบต่างๆ (ภาพประกอบ 2) ไม่ว่าจะเป็นการชนกัน การออกจากกัน หรือการเสียดสีกันของแผ่นเปลือกโลก และเกิดการปลดปล่อยพลังงานความเครียดออกมา



ภาพประกอบ 2 รูปการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก

ที่มา: (GEONOI2015, 2016)

อีกปัจจัยที่ทำให้เกิดแผ่นดินไหว คือการกระทำของมนุษย์ ที่อาจส่งผลให้เกิดแผ่นดินไหวได้เช่นเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นการสร้างอ่างเก็บน้ำ สร้างเขื่อน การทำเหมืองในระดับลึก หรือการทดสอบการใช้งานระเบิดปรมาณู โดยที่การสร้างเขื่อนที่มีขนาดใหญ่ (ภาพประกอบ 3) ก็อาจส่งผลให้เกิดแผ่นดินไหวได้เนื่องจากการที่แผ่นเปลือกโลกเดิมที่มีอยู่ต้องแบกรับน้ำหนัก และแรงดันของน้ำที่เพิ่มขึ้นมหาศาลจากการกักเก็บน้ำทำให้เกิดความเครียดที่แผ่นเปลือกโลกที่สะสมไว้มากและเกิดแผ่นดินไหวตามมาได้ เรียกแผ่นดินไหวประเภทนี้ว่าแผ่นดินไหวท้องถิ่นซึ่งอาจเกิดขึ้นมากหรือน้อยแล้วแต่สถานที่



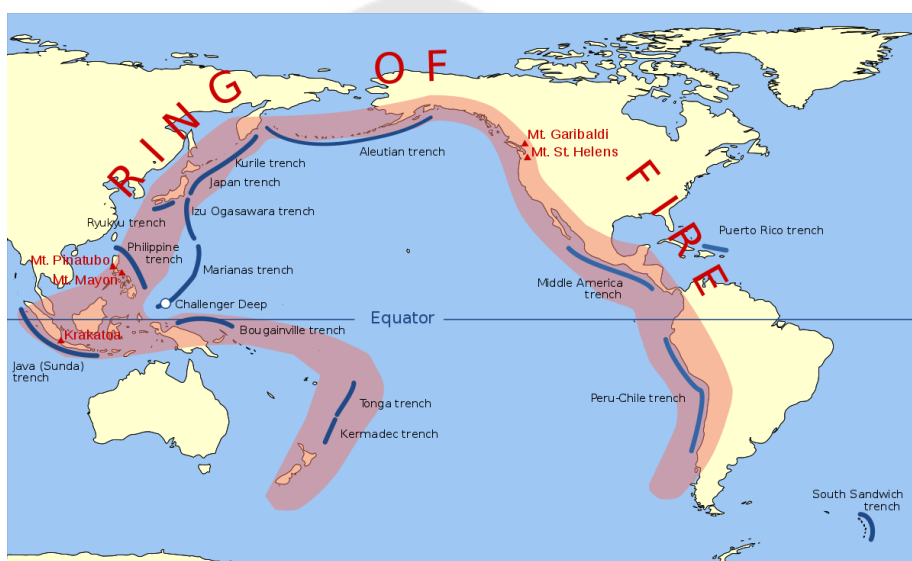
ภาพประกอบ 3 เขื่อนฮูเวอร์ (Hoover Dam)

ที่มา: (sss28651, 2015)

โดยในช่วงปัจจุบันเหตุการณ์การเกิดแผ่นดินไหวนี้ยังไม่สามารถคำนวณหรือคาดการณ์ได้ว่าจะเกิดขึ้นที่ใด ช่วงเวลาใด และมีความรุนแรงมากน้อยเพียงใด จึงทำให้ภัยพิบัติประเภทนี้เมื่อเกิดเหตุการณ์ขึ้นทำให้เกิดความเสียหายต่อทั้งชีวิตและทรัพย์สินอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากเหตุการณ์เกิดขึ้นในแถบประเทศที่ยังไม่ได้มีความรู้ในเรื่องนี้ และไม่มี การเตรียมการรับมือกับเหตุการณ์อย่างถูกต้อง

แผ่นดินไหวกับประเทศไทย

หากศึกษาจากแผนที่โลกที่แสดงถึงเส้นแบ่งของแผ่นเปลือกโลก (ภาพประกอบ 2) ที่มีอยู่ จะพบว่าในส่วนของประเทศไทยเองนั้นไม่ได้อยู่ใกล้แนวขอบของแผ่นเปลือกโลกที่จะทำให้เกิดอันตรายจากการเคลื่อนตัวในการชน ดัดตัวออก หรือเบียดสีกันของแผ่นเปลือกโลก และไม่ได้อยู่ในอาณาบริเวณของวงแหวนไฟ (ภาพประกอบ 4) ที่เป็นพื้นที่ที่เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวร้อยละ 80-90 ของการเกิดแผ่นดินไหวทั้งหมด หรือในการเกิดแผ่นดินไหวที่เกิดจากมนุษย์นั้นอาจจะไม่ได้มีผลกระทบมาต่อประเทศไทย

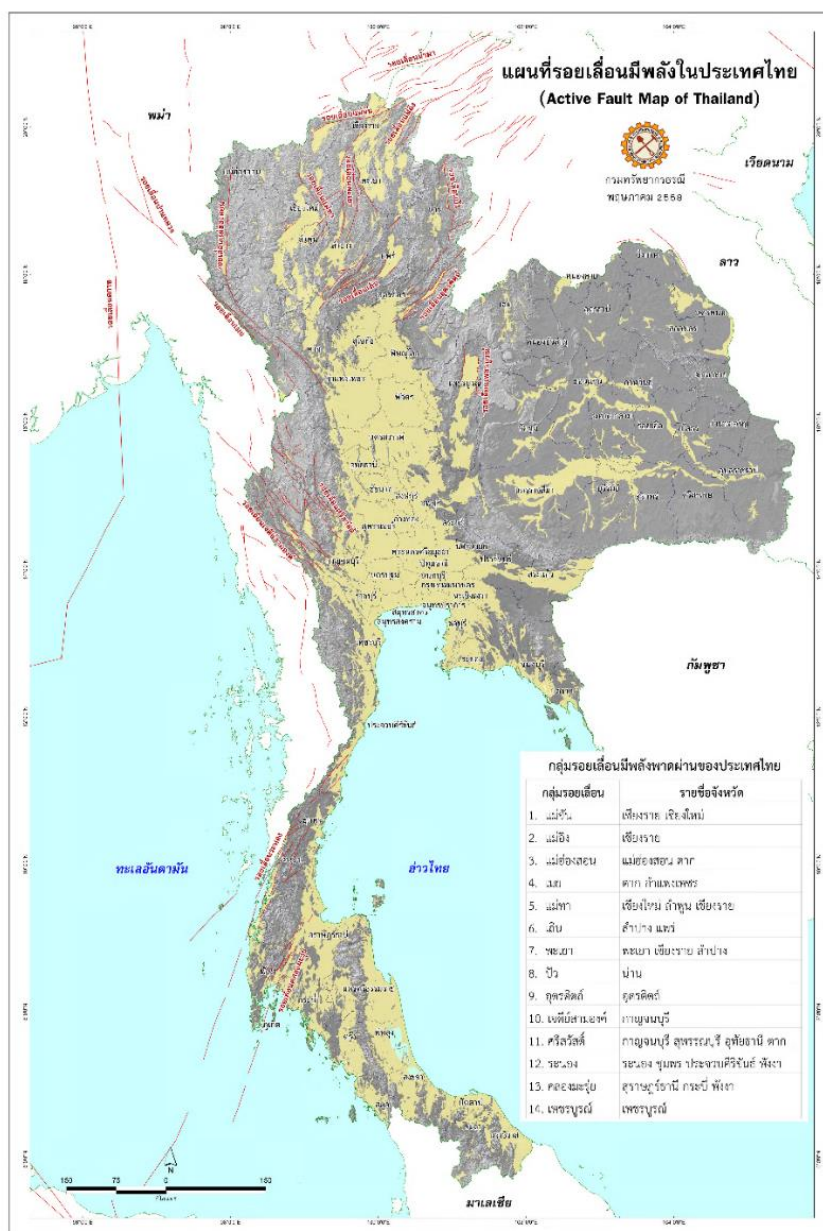


ภาพประกอบ 4 วงแหวนแห่งไฟ (Ring of fire)

ที่มา: (GEONOI2015, 2016)

แต่สิ่งที่จำเป็นต้องคำนึงถึงจากลักษณะของแผ่นเปลือกโลก บริเวณที่ตั้งของประเทศไทย ตั้งอยู่ในแผ่นเปลือกโลกที่มีชื่อว่ายูเรเชีย โดยที่แผ่นยูเรเซียนี้เป็นแผ่นเปลือกโลกที่มีรอยแตกแขนงมากในแผ่น ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 14 รอยเลื่อน อ้างอิงข้อมูลจากกรมทรัพยากรธรณี (ภาพประกอบ 5) แบ่งเป็นบริเวณภาคเหนือและตะวันตก 12 รอยเลื่อน และทางภาคใต้ 2 รอยเลื่อน เป็นรอยเลื่อนที่มีพลังงานอยู่พร้อมที่จะทำให้เกิดแผ่นดินไหวได้ทุกเมื่อ ทำให้ประเทศไทยในแทบทางภาคเหนือที่มีพื้นที่อยู่ใกล้เคียงกับประเทศพม่า ลาว อินโดนีเซียที่อาจเกิดแผ่นดินไหว และส่งผลกระทบดังกล่าวมายังประเทศไทยทำให้เกิดความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินได้ ดังที่เคยเกิดขึ้นใน

หลายๆเหตุการณ์ เมื่อศึกษาในช่วงประมาณปี พ.ศ.2554 ที่ผ่านมามีจะเริ่มเห็นว่าการเกิดภัยพิบัติประเภทแผ่นดินไหวนี้เริ่มมีจำนวนมากขึ้น และมีความรุนแรง



ภาพประกอบ 5 แผนที่รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย

ที่มา : (กรมทรัพยากรธรณี, 2558)

ส่วนในเขตพื้นที่ของภาคกลางในแถบกรุงเทพฯ และปริมณฑลเป็นที่ทราบกันดีว่าพื้นที่ดังกล่าวที่ตั้งอยู่บริเวณในเขตที่เกิดจากการทับถมของตะกอนน้ำ เกิดเป็นพื้นดินทำให้ดินในบริเวณดังกล่าวมีความอ่อนตัวเป็นอย่างมาก และถึงแม้ว่าในบริเวณนี้จะห่างจากจุดที่สามารถเกิดแผ่นดินไหวอย่างมาก แต่เนื่องจากความอ่อนตัวของดินบริเวณนี้เองที่ทำให้เกิดความเสียหายเพราะเนื่องจากเมื่อศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวเกิดขึ้นในพื้นที่ที่ห่างจากบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑลแล้ว ขนาดของแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหวควรจะลดลงแต่เมื่อคลื่นแรงสั่นสะเทือนนี้เข้าพบกับพื้นดินที่มีความอ่อนตัวบริเวณดังกล่าว ทำให้เกิดการขยายของขนาดคลื่นที่มีขนาดไม่มาก กลับมามีกำลังในการสั่นไหวได้อีกครั้งอย่างเช่นในการเกิดแผ่นดินไหวในปี พ.ศ. 2554 ที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้นที่ประเทศพม่าซึ่งห่างจากกรุงเทพฯ ถึง 770 กิโลเมตร แต่ในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ กลับรับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือนของการโยกตัวของตึกสูงได้ค่อนข้างชัดเจน ซึ่งสามารถยกตัวอย่างในกรณีศึกษาของพื้นดินที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพื้นดินในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลเหมือนกับพื้นดินของกรุงแม็กซิโกซิตีที่มีการตั้งเขตเมืองอยู่ในบริเวณดินที่มีความอ่อนตัวเช่นเดียวกัน เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวในพื้นที่ใกล้เคียงถึงแม้จะมีระยะห่างของศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวมากกว่า 300 กิโลเมตร ก็ยังส่งผลกระทบให้เกิดความเสียหายต่อในเขตเมืองของกรุงแม็กซิโกซิตี ดังเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2561 แผ่นดินไหวขนาด 7.2 ตามมาตราริกเตอร์ ห่างจากตัวเมืองแม็กซิโกซิตีถึง 350 กิโลเมตร ศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวอยู่ลึกลงไปใต้ดิน 24.6 กิโลเมตร (ภาพประกอบ 6) แต่ก็ส่งผลให้มีอาคารในกรุงแม็กซิโกเกิดการถล่มและเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง ส่งผลให้เกิดผู้เสียชีวิตขึ้นเป็นจำนวนมาก



ภาพประกอบ 6 บริเวณศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวกับเมื่อแม็กซิโก และความเสียหายของสะพานที่ได้รับจากเหตุการณ์ดังกล่าว

ที่มา: (เว็บภัยพิบัติ, 2018)

ผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหวต่อโครงสร้าง

เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวในพื้นที่ต่างๆ สิ่งตามมาคือความเสียหายที่เกิดขึ้นได้จากการสั่นสะเทือนของแผ่นเปลือกโลกโดยความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับขนาดของการเกิดแผ่นดินไหวและจุดศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหว หากศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวเกิดใกล้ผิวดินยิ่งทำให้ส่งผลกระทบรุนแรงต่อโครงสร้างต่างๆ ที่ก่อสร้างขึ้น ไม่ว่าจะเป็นที่อยู่อาศัย อาคาร หรือสะพานหากไม่ได้รับการออกแบบให้มีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวจะทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย และพังทลายลงอันเป็นผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน หากจุดศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวอยู่ในแถบของแผ่นเปลือกโลกที่เป็นมหาสมุทรอาจส่งผลให้เกิดคลื่นน้ำขนาดใหญ่พัดเข้าชายฝั่ง (สึนามิ) ที่ส่งผลร้ายแรงต่อสิ่งก่อสร้าง และผู้อยู่อาศัยในแถบชายทะเลได้ โดยเหตุการณ์การเกิดแผ่นดินไหวที่สร้างความเสียหายครั้งล่าสุดที่มีความรุนแรงและเกิดความเสียหายเป็นวงกว้างของประเทศไทยเกิดเมื่อ วันที่ 5 พฤษภาคม 2557 เกิดแผ่นดินไหวขึ้นที่อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย ขนาด 6.3 แมกนิจูด และอยู่ลึกลงไปใต้พื้นดินเพียง 7.4 กิโลเมตรเท่านั้น ถือว่ามีความรุนแรงมากที่สุดในรอบ 50-100 ปีของประเทศไทยโดยกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมระบุว่า แผ่นดินไหวครั้งนี้เกิดขึ้นจากรอยเลื่อนพะเยา โดยการเกิดแผ่นดินไหวในครั้งนี้สร้างความเสียหายให้หลายหน่วยงานไม่ว่าจะเป็นทั้งทางภาครัฐและภาคเอกชน อาคาร บ้าน

สะพาน ถนน สถานที่ราชการ โรงเรียน และไม่ว่าแต่พระพุทธรูปต่างๆ ที่ได้รับความเสียหาย (ภาพประกอบ 7) กว่าที่จะฟื้นคืนสภาพของบ้าน อาคาร ถนน และสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ได้ต้องใช้เวลานานเนื่องจากการออกแบบไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรับแรงของแผ่นดินไหวจึงทำให้เกิดความเสียหายมากและใช้เวลาในการซ่อมแซมนาน หรือในบางอาคารก็ไม่สามารถที่จะซ่อมแซมได้เลย จำเป็นต้องทุบทำลายเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้อาคาร จากเหตุการณ์นี้ทำให้ผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณที่ได้รับผลกระทบเกิดความตื่นตัว และตระหนักถึงความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างที่อยู่อาศัยที่ดีเพื่อต้านทานภัยพิบัติที่อาจเกิดขึ้นได้



ภาพประกอบ 7 ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว

ที่มา : (Pairach Piboonrungrroj, 2014)

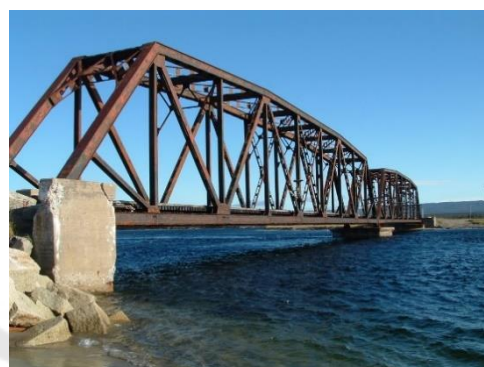
ชนิดและประเภทของสะพาน

การจำแนกชนิด และประเภทของสะพานนั้นไม่มีข้อกำหนดที่ชัดเจนแล้วแต่การจำแนกที่ใช้เกณฑ์ใดในการจำแนกประเภทของสะพานโดยสามารถจำแนกได้หลากหลายแบบแต่ที่นิยมจะจำแนกประเภทจากระบบโครงสร้างของสะพานว่ามีระบบในการถ่ายแรงอย่างไร หรืออาจจำแนกตามวัสดุ หรือการใช้งานของตัวสะพาน

การจำแนกประเภทของสะพานตามระบบโครงสร้างในการถ่ายแรง

สะพานแบบคาน (beam bridge) เป็นสะพานที่วางตัวโดยใช้คานหลักเป็นตัวรับแรงที่ถ่ายแรงลงมาจากพื้นถนนแล้วลงสู่คานถ่ายไปยังหัวเสา เป็นสะพานที่เหมาะสมสำหรับช่วงเสาที่มีระยะช่วงประมาณ 20-30 เมตร (ภาพประกอบ 8) โดยความลึกของคานจะแปรเปลี่ยนตามความยาวของช่วงเสาคัลล้ายกับการออกแบบคานของบ้านทั่วไป และสามารถออกแบบให้คานประเภทนี้

สามารถมีความยาวมากกว่า 30 เมตรได้โดยใช้เทคนิคในการสร้างคานยื่นออกจากตอม่อของสะพานก็จะทำให้ช่วงของเสาถึงเสามีความห่างในการวางเสามากขึ้นไปอีก



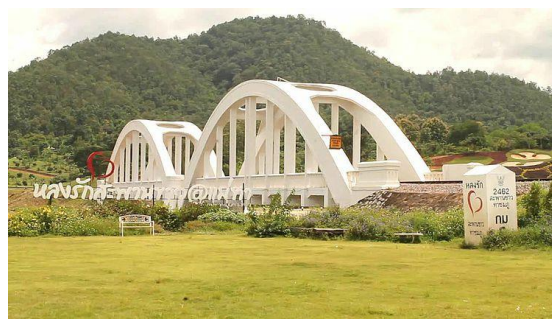
ภาพประกอบ 8 สะพานทางรถไฟแบบคาน

ภาพประกอบ 9 สะพานแบบโครงถัก

สะพานโครงถัก (truss bridge) เป็นสะพานที่เกิดจากการเรียงตัวของชิ้นส่วนเรียงกันเป็นโครงข้อหมุนถ่ายแรงจากพื้นของสะพานสู่โครงถักผ่านข้อต่อต่างๆ โดยในชิ้นส่วนจะเกิดเพียงแรงอัดและแรงดึง แล้วถ่ายแรงลงไปที่จุดรองรับ (ภาพประกอบ 9)

สะพานโครงเฟรม (frame bridge) เป็นสะพานที่ใช้หลักการของคานยื่นออกจากตอม่อโดยทั้งสองข้างที่ยื่นออกจากตอม่อต้องสมดุลกัน เพื่อลดโมเมนต์ในการพลิกคว่ำและเมื่อต่อยื่นออกไปเรื่อยๆจนถึงระยะที่ต้องการจึงทำการดึงลวดอัดแรงและหล่อปิดเพื่อทำให้โครงทั้งโครงเชื่อมต่อกันเป็นโครงเฟรม โดยมีความยาวของสะพานที่มีช่วงเสาดั้งแต่ 60-200 เมตร

สะพานโค้ง (arch bridge) เป็นสะพานที่โครงสร้างเป็นส่วนของโค้งวงกลมอาจจะอยู่ด้านบนหรือด้านล่างของสะพานก็ได้ โดยจะอาศัยการถ่ายแรงของพื้นสะพานผ่านโค้งรับเพื่อให้เกิดแรงอัดในโครงสร้างโค้งที่รองรับสะพาน (ภาพประกอบ 11)



ภาพประกอบ 10 สะพานพระราม 7

ที่มา: (ประชาชาติธุรกิจ, 2560)

ภาพประกอบ 11 สะพานท่าชมภู

ที่มา: (วิทยุล้านนา, 2560)

สะพานแขวน (suspension bridge) เป็นสะพานที่ใช้ลวดเคเบิลมาช่วยในการรับน้ำหนัก และถ่ายแรงโดยสายเคเบิลจะวางตัวเป็นรูปโค้งพาราโบลาโหว่งระหว่างเสาถึงเสาและที่ปลายจะยึดกับ สมอในบริเวณจุดรองรับ (ภาพประกอบ 12) โดยสะพานประเภทนี้จะนิยมใช้สำหรับวัสดุที่มี น้ำหนักเบาหรือเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูป สะพานประเภทนี้จะมีระยะเสาถึงเสาประมาณ 300-2,000 เมตร

สะพานซิง (cable-stayed bridge) เป็นสะพานที่รับน้ำหนักด้วยลวดเคเบิลซึ่งระหว่างตัว สะพานกับเสาสะพานเข้าด้วยกันโดยวิธีการก่อสร้างจะคล้ายกับสะพานโครงเฟรม แต่สะพานซิงจะมีลวดเคเบิลเป็นตัวช่วยในการรับน้ำหนักเพื่อถ่ายแรงไปยังเสา (ภาพประกอบ 13) โดยสะพานซิง จะมีระยะระหว่างเสาประมาณ 250-1,000 เมตร



ภาพประกอบ 12 สะพานโกลเด้นเกต (Golden Gate Bridge)

ที่มา : (Vacationist, 2016)



ภาพประกอบ 13 สะพานพระราม 9

ที่มา : (baanfinder, (2016)

การออกแบบสะพาน

การออกแบบสะพานหรือสิ่งปลูกสร้างลำดับขั้นตอนในส่วนต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องการเลือกวิธีการออกแบบ การเลือกใช้วัสดุ วิธีการก่อสร้างและลำดับขั้นตอนในการก่อสร้าง โดยหลักการในการออกแบบเบื้องต้นเกี่ยวข้องกับขนาดของชิ้นส่วน และวัสดุที่ใช้งาน ของโครงสร้างที่ออกแบบ เพื่อให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่จะเกิดขึ้นได้ในอนาคต ชิ้นส่วนจะต้องต้านทาน การเสียรูป โก่ง งอ ภายในชิ้นส่วนของโครงสร้าง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีต่างๆ และในการก่อสร้างก็ต้องควบคุมการก่อสร้างให้เป็นไปตามแบบแผนที่ได้คำนวณและออกแบบไว้ ดังนั้น การจัดการงานก่อสร้าง การเขียนแบบวิศวกรรม ก็จะเป็นส่วนที่ส่งผลต่อโครงสร้างให้เป็นไปตามที่ได้วิเคราะห์ และออกแบบไว้อีกด้วย

หลักในการออกแบบโครงสร้างที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึง ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ความปลอดภัย และความเหมาะสมของผู้ใช้งานโครงสร้าง ซึ่งเสริมด้วยเทคนิคความชำนาญ และความรู้ในการก่อสร้าง ที่สะสมมาจากประสบการณ์ในงานก่อสร้าง แม้ว่าหลักในการออกแบบต่างๆจะไม่ได้สอน หรือแนะนำในหลายๆสิ่งให้อย่างเบ็ดเสร็จ ซึ่งจะมีเพียงทฤษฎีทั่วไปในการออกแบบ แต่ผู้ออกแบบก็ต้องใช้ประสบการณ์ดังกล่าวช่วยในการวิเคราะห์พิจารณาเพื่อออกแบบ การออกแบบสะพานจะเกี่ยวข้อง หรือถูกควบคุมด้วยพื้นของสะพาน และการใช้งานจะมีขนาด ความยาวลักษณะแตกต่างกันออกไปแล้วแต่การใช้งาน ซึ่งจะต้องมีความสอดคล้องทั้งในเรื่อง ความสวยงาม การใช้งาน สถานที่ตั้ง ราคาในการก่อสร้าง โดยมี 3 สิ่งที่สำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบของตอม่อที่ดี ได้แก่ (1) แรงโน้มถ่วงของโลก และวิธีการควบคุมงานก่อสร้างเพื่อควบคุมให้ตรงตามการออกแบบ (2) ช่วงความยาวของสะพานและการก่อสร้างตามกฎหมายประเทศ

(3) จำนวนและพื้นที่ของเสาที่ต้องรองรับพื้นด้านบน เนื่องจากในพื้นที่ที่มีการเกิดแผ่นดินไหวเสาเหล่านี้จะต้องทำหน้าที่เชื่อมต่อกับพื้นของสะพาน และถูกแรงแผ่นดินไหวกระทำจากทางด้านข้าง ซึ่งต้องพิจารณาความต่อเนื่องของช่วงสะพาน และระหว่างรอยต่อของตอม่อต่อบริเวณกับเสาเพื่อให้เกิดความปลอดภัย แต่ก่อนที่จะออกแบบสะพานเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวเพียงอย่างเดียว จะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการออกแบบสะพานที่ไม่ถูกแรงแผ่นดินไหวกระทำ ซึ่งจะมีเพียงน้ำหนักของโครงสร้างด้วย อย่างแรกในการเลือกวัสดุและรูปร่างหน้าตัดของพื้นสะพาน หากมีการเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงมากก็จะส่งผลในเรื่องการช่วยลดขนาดของชิ้นโครงสร้างได้ เช่นในการเลือกใช้การอัดแรง แม้ว่าหลักการออกแบบและรายละเอียดการออกแบบสะพานจะมีการให้ความสำคัญหลักต่อเสา และรอยต่อของพื้นสะพาน การช่วยลดน้ำหนักของพื้นสะพานเองก็ยังเป็นอีกส่วนที่สำคัญในการออกแบบสะพานเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว เพราะทั้งแรงแผ่นดินไหวและการเสียรูปต่างๆ จะคิดจากน้ำหนักของตัวพื้นสะพานและสิ่งต่างๆ ที่อยู่ด้านบนสะพาน (superstructure) ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ดีหากทางผู้ออกแบบจะทำการลดน้ำหนักของตัวสะพานลงเพื่อช่วยในการต้านทานแรงที่จะเกิดขึ้น

สำหรับหลักการออกแบบที่สำคัญในการออกแบบสะพานเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวที่เกิดแรงขยับตามแนวราบตามพื้นดินจะมีอยู่ 4 หัวข้อที่สำคัญ ได้แก่

1. จุตรองรับของพื้นสะพานบริเวณตอม่อ เสา (หรือบริเวณที่คล้ายคลึง) จะต้องออกแบบให้มีความสามารถที่รองรับการเคลื่อนตัวในแนวราบได้
2. พื้นสะพานที่มีการยึดแน่นไปจนถึงด้านบนอย่างน้อยจะต้องมีเสาหนึ่งต้นที่สามารถรองรับการเคลื่อนตัวในแนวราบของการเสียรูปจากแผ่นดินไหวได้ถึงแม้จะไม่มีมียึดหยุ่นในบางช่วง
3. เสา ในบริเวณช่วงล่างของเสาอาจจะต้องการยอมให้เกิดการเคลื่อนตัวตามดิน หรือให้มีการเคลื่อนตัวแบบไม่ยึดหยุ่นที่สามารถส่งผ่านแรงไปยังเสาเข็มได้
4. การยึดสะพานไว้กับดินโดยที่พื้นสะพานเชื่อมต่อกับตอม่อสะพาน สิ่งที่สำคัญจะต้องยอมให้มีการเคลื่อนตัวตามดินได้เล็กน้อย โดยในข้อนี้ถือเป็นกรณีค่อนข้างพิเศษเหมาะสำหรับช่วงสะพานสั้นๆ มีช่วงสะพานได้ 3 ช่วงสะพาน แต่ส่วนมากสะพานประเภทนี้จะมีเพียงช่วงเดียว

โดยหากกล่าวถึงการออกแบบสะพานที่ได้มีการจัดทำข้อกำหนดต่างๆ ขึ้นมาแล้วถือว่ามียหลายหลักการตั้งแต่ที่เริ่มมีการคำนวณสะพาน จะมี 3 วิธีการหลักคือ

การออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Design, ASD)

วิธีนี้จะเป็นการพิจารณาพฤติกรรมของโครงสร้างจากแรงกระทำที่ปรากฏบนโครงสร้าง ซึ่งรวมถึงรอยแตก ร้าว การโก่งตัว หน่วยแรงของคอนกรีต และเหล็กเสริม โดยวิธีนี้มีพื้นฐานจากความเสียหายที่พบในชิ้นส่วน จากนั้นจึงทำการประเมินด้วยกฎเกณฑ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบโดยการลดกำลังรับแรงของวัสดุ ลดค่าหน่วยแรงต่างๆ วิธีการออกแบบด้วยหน่วยแรงใช้งานเป็นวิธีการออกแบบแรกๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้กับโครงสร้างเหล็ก เนื่องจากมีจุดครากของวัสดุที่แน่นอน (yield point) โดยส่วนปลอดภัยที่ใช้งานในการควบคุมการออกแบบจะกำหนดให้เป็นครึ่งหนึ่งของจุดคราก

$$F.S. = \text{Resistance / effect of load} \quad (1)$$

โดยที่ $F.S.$ คือ อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor Safety)

โดยวิธีหน่วยแรงใช้งานถูกใช้ใน ปี พ.ศ. 2403 โดยสะพานที่ออกแบบจะเป็นสะพานโครงถัก (truss) คำนวณแรงต่างๆ โดยวิธีสถิต (static method) โดยสามารถหาขนาดของชิ้นส่วนจากสมการ (2) และสมการ (3) ในส่วนของชิ้นส่วนที่รับแรงอัด และรับแรงดึง ตามลำดับ

$$\text{Required } A_{net} \geq \text{effect of load / allowable stress} = T / f_t \quad (2)$$

$$\text{Required } A_{gross} \geq \text{effect of load / allowable stress} = C / f_t \quad (3)$$

วิธีหน่วยแรงใช้งานเป็นวิธีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นเวลานาน แต่วิธีนี้จะเป็นการพิจารณาที่สภาวะใช้งานเท่านั้น ความปลอดภัยของวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความปลอดภัยที่เหมาะสม

วิธีออกแบบตัวค้ำน้ำหนักบรรทุก (Load Factor Design, LFD)

วิธีตัวค้ำน้ำหนักเพิ่มกำลังเป็นการออกแบบที่คำนึงถึงชิ้นส่วนต่างๆ เมื่อถูกใช้งานให้เกิดการวิบัติหรือประลัย โดยเป็นการกำหนดค่าตัวแปรใช้ตัวแปรค้ำน้ำหนักที่มีอยู่จริงของโครงสร้างและออกแบบให้ชิ้นส่วนสามารถรองรับแรงดังกล่าวได้ โดยเริ่มใช้งานตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2513 โดยจะ

แตกต่างจากวิธี ASD เนื่องจากวิธีตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมีการให้ความสำคัญกับประเภทของแรงระหว่าง น้ำหนักบรรทุกจร และ น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่แตกต่างกัน เพราะเนื่องจากเหตุผลที่ว่า น้ำหนักบรรทุกคงที่สามารถคำนวณหาได้อย่างแม่นยำจึงทำให้ได้สมการ (4) และสมการ (5) โดยวิธีนี้เป็นการกำหนดตัวแปรที่มีความเหมาะสมกับน้ำหนักทำให้การออกแบบมีชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีขนาดเล็กลง อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบแรงที่สภาวะประลัยได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ไม่ปกติ

$$S_s = \frac{M_D + M_L}{0.5 f_y} \quad (4)$$

$$S_u = \frac{1.3(M_D + 1.67M_L)}{\phi f_y} \quad (5)$$

วิธีออกแบบตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design, LRFD)

วิธีตัวคูณเพิ่มและความต้านทานน้ำหนักเป็นวิธีที่ถูกใช้งานในประมาณปี พ.ศ. 2537 โดยเพิ่มเติมจากวิธีตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกใช้งาน โดยใช้ความน่าจะเป็น และความเชื่อมั่นของตัวคูณเพิ่มน้ำหนักแต่ละตัว (load factor) แต่ยังคงพิจารณาพฤติกรรมที่สภาวะภายใต้แรงประลัย โดยมีหลักการอยู่ว่า กำลังต้านทานของโครงสร้างที่ลดค่าแล้วจะต้องมากกว่ากำลังที่เพิ่มค่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

$$\phi R_n > \alpha_i \sum \gamma_i Q_i \quad (6)$$

โดยที่ Q_i คือ แรงภายนอก (load effect) เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร แรงแผ่นดินไหว เป็นต้น

α_i คือ แฟกเตอร์ตัวคูณปรับแรงภายนอก (load modification factor) ขึ้นอยู่กับความเหนียวของโครงสร้างความซับซ้อน และความสำคัญของโครงสร้าง ,

γ_i คือ ส่วนปลอดภัยหรือตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก (load factor) อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักสุดขีดที่สภาวะใกล้ถึงจุดวิบัติ หารด้วยน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เกิดขึ้นจริงกับโครงสร้าง

- ϕ คือ ตัวคูณความต้านทาน (resistance factor) เป็นตัวแปรที่เอาไว้ใช้ลดกำลังของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต หรือลดอัดแรงที่อาจเกิดความไม่แน่นอนเนื่องจากส่วนผสมของคอนกรีต และกระบวนการผลิต
- R_n ความต้านทานระบุ (nominal resistance)

การออกแบบสะพานมีองค์ความรู้ของหลายประเทศที่ได้ทำการสร้างข้อกำหนดต่างๆเพื่อใช้ในการออกแบบสะพานใช้งานในประเทศของตนเอง แต่สำหรับประเทศไทยที่เป็นที่นิยมใช้งานในการออกแบบสะพานกันอยู่อย่างแพร่หลายจะเป็นมาตรฐานการออกแบบสะพานของอเมริกา (AASHTO) ไม่ว่าจะเป็น AASHTO standard 1973 (AASHTO, 1973) AASHTO standard 2002 (AASHTO, 2002) AASHTO LRFD 2010 (AASHTO, 2010) และมาตรฐานอื่นๆ

การออกแบบสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย

การออกแบบเสาสะพานจะเป็นการออกแบบโดยใช้แรงที่เกิดจากแรงใน 2 แนวแกนหลักคือแรงในแนวตั้ง และแรงในแนวนอน โดยแรงในแนวตั้งจะสามารถคำนวณได้จากตัวน้ำหนักของโครงสร้างด้านบน และแรงในแนวนอนหาได้จากข้อกำหนดต่างๆแล้วแต่มาตรฐาน สำหรับการคำนวณแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทยจะแบ่งการออกแบบเป็น 3 รูปแบบ

1. การออกแบบโดยวิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างคงที่ร้อยละ 6
2. การออกแบบโดยวิธีแผนที่เสี่ยงภัยของ ศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วิรัชชัย และคณะ (เป็นหนึ่งใน, 2537) ร่วมกับ AASHTO standard 2002 (AASHTO, 2002)
3. การออกแบบโดยคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวของกรมทางหลวง (กรมทางหลวง, 2559)

การออกแบบโดยวิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างคงที่ ร้อยละ 6

การออกแบบวิธีนี้เป็นการอ้างอิงมาตรฐานการออกแบบสะพานของ AASHTO standard 1973 (AASHTO, 1973) ซึ่งถูกนำมาใช้ในประเทศไทยเนื่องจากเมื่อก่อนประเทศไทยยังขาดความรู้ในการออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว และการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งเป็นค่าคงตัวเนื่องจากเพราะไม่ค่อยมีภัยพิบัติประเภทนี้เกิดขึ้นบ่อย ทำให้การออกแบบจึงจำเป็นต้องกำหนดค่าดังกล่าวโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน จะได้สมการที่ใช้สำหรับการออกแบบแรง

เงื่อนไขเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวสมการ (7) โดยรูปแบบการออกแบบนี้ถูกใช้งานในประเทศไทย ตั้งแต่อดีตจนถึงปี พ.ศ. 2541

$$V = C_s W \quad (7)$$

โดยที่ V คือ แรงเฉือนพื้นฐาน
 C_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างร้อยละ 6
 W คือ น้ำหนักของโครงสร้างส่วนบน ไม่รวมน้ำหนักบรรทุกจร

การออกแบบโดยวิธีแผนที่เสี่ยงภัย ศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วิทยชัย และคณะ ร่วมกับ AASHTO 2002

การออกแบบโดยวิธีแผนที่เสี่ยงภัย (เป็นหนึ่งใน, 2537) ร่วมกับการออกแบบสะพาน ตามมาตรฐาน AASHTO standard 2002 (AASHTO, 2002) เนื่องจากเป็นการปรับปรุงการใช้งาน จากการใช้งานของมาตรฐานดังกล่าวที่มีการใช้แผนที่ความเร่งของประเทศสหรัฐอเมริกา มาเป็น การใช้งานแผนที่ความเร่งของประเทศไทยเองทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่ภายในประเทศ มีความไม่เท่ากันแล้วแต่พื้นที่ความเสี่ยงที่ได้ศึกษา โดยได้มาจากการตรวจสอบของ ศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วิทยชัย และคณะ วิธีนี้จะใช้หลักการของแรงสถิติเทียบเท่าทำให้แรงแผ่นดินไหวกระจายสม่ำเสมอ ตามการวางตัวของสะพานและขวางสะพาน ซึ่งเป็นไปตามสมการ (8) โดยรูปแบบการออกแบบนี้ ถูกใช้งานในประเทศไทยตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2542 ถึง ปี พ.ศ.2559

$$V = \frac{C_s W}{R} \quad (8)$$

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

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (10)$$

โดยที่ V คือ แรงเฉือนพื้นฐาน
 C_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้าง
 W คือ น้ำหนักของโครงสร้างส่วนบน ไม่รวมน้ำหนักบรรทุกจร

- R คือ ค่าตัวประกอบปรับค่าผลตอบสนอง ตาราง 1 (AASHTO, 2002)
- S คือ สัมประสิทธิ์สำหรับคุณสมบัติของดิน (ตาราง 2) (สำนักงานคณะกรรมการ
กฤษฎีกา, 2550)
- T คือ คาบธรรมชาติของโครงสร้าง (วินาที)
- m คือ มวลของโครงสร้าง
- A คือ ค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดินเทียบกับค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (peak
ground acceleration) ได้จากแผนที่ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศ
ไทย ที่ได้ทำการศึกษาจาก (เป็นหนึ่ง, 2537)

ตาราง 1 ตารางตัวคูณปรับแก้ผลตอบสนอง (response modification factor, R)

สัมประสิทธิ์ลดทอนแรง (<i>Response Modification Factor, R</i>)	
โครงสร้างส่วนล่าง	R
1. เสาตอม่อแบบผนังคอนกรีต (Wall type piers)	2
2. เสาเข็มคอนกรีตรับแรงอัด (Reinforced Concrete Pile Bents)	
2.1 เสาเข็มในแนวดิ่ง (Vertical Pile Only)	3
2.2 เสาเข็มตอกเอียง (With Batter Piles)	2
3. เสาเข็มเดี่ยว (Single Columns)	3
4. เหล็ก หรือวัสดุที่มีเหล็กผสม และกลุ่มเสาอาคาร (Steel or Composite Steel)	
4.1 เสาเข็มในแนวดิ่ง (Vertical Pile Only)	5
4.2 เสาเข็มตอกเอียง (With Batter Piles)	3
5. เสาตอม่อหลายต้นรวมกันรับแรงดัด (Multiple Column bent)	5

ตาราง 2 สัมประสิทธิ์สำหรับคุณสมบัติของดิน (soil structure resonance coefficients)

ประเภทของดิน	คำอธิบาย	ค่าสัมประสิทธิ์ (S)
I	ดิน โดยมีความเร็วของคลื่นเฉื่อยสูงกว่า 760 เมตรต่อวินาที	1.0
II	ดินเหนียวแข็งซึ่งมีความหนาแน่นกว่า 60 เมตร	1.2
III	ดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง หรือทรายซึ่งมีความหนาแน่นของชั้นดินเหนียวกว่า 9 เมตร	1.5
IV	ดินเหนียวอ่อนซึ่งมีความหนาแน่นกว่า 12 เมตร โดยมีความเร็วของคลื่นเฉื่อยต่ำกว่า 150 เมตรต่อวินาที	2.5

ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness, K)

ค่าความแข็งเกร็ง (K) เป็นสมบัติของวัสดุที่แสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือต่อการเปลี่ยนรูปในช่วงขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น (elastic limit) ในขณะที่กำลังรับแรงนั้นๆ อยู่ที่ค่าความเกร็งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elastic) และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเสาซึ่งในที่นี้เราจะทำการหาค่าความแข็งเกร็งของเสาต่อม่อทั้งตามยาว และตามขวางพิจารณาจากพฤติกรรมการเคลื่อนตัวเมื่อเกิดแผ่นดินไหว สามารถหาได้จากสมการ (11) โดยตั้งสมมติฐานว่าในด้านแนวแกนที่ตั้งฉากกับเส้นทางจราจรเกิดลักษณะของพฤติกรรมโครงสร้างบริเวณด้านล่างเป็นแบบยึดแน่น (fixed) และด้านบนเป็นแบบปล่อยอิสระ (free) และสมการ (12) โดยตั้งสมมติฐานว่าในแนวแกนที่ขนานกับเส้นทางจราจรเกิดลักษณะของพฤติกรรมโครงสร้างบริเวณปลายเสาทั้งต่อม่อด้านล่างและหัวเสา รับพื้นสะพานมีการยึดรั้งของโครงเป็นแบบยึดแน่น (fixed) ตาราง 3 (AASHTO, 1996)

$$K = \frac{3E_c I}{h^3} \quad (11)$$

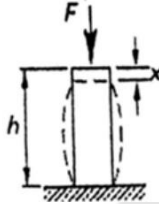
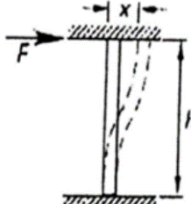
$$K = \frac{12E_c I}{h^3} \quad (12)$$

โดยที่ E_c คือ ค่าโมดูลัสของคอนกรีต

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเสา

h คือ ความยาวเสา

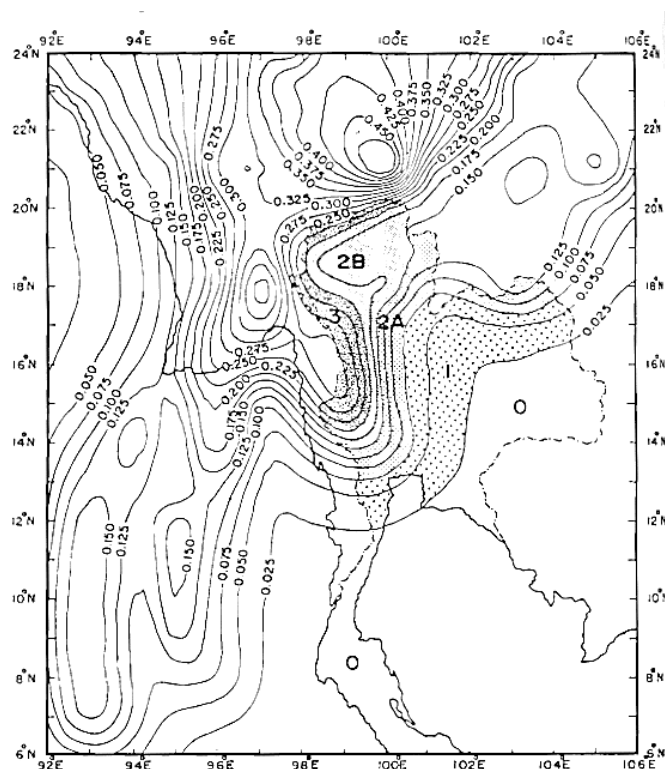
ตาราง 3 ตารางแสดงค่าความแข็งแกร่ง (stiffness, K)

รูปแบบโครงสร้าง	การโก่งตัว	ค่าสัมประสิทธิ์ (K)
	$\frac{Fh}{AE}$	$\frac{AE}{h}$
	$\frac{Fh^3}{3EI}$	$\frac{3EI}{h^3}$
	$\frac{Fh^3}{12EI}$	$\frac{12EI}{h^3}$
	$\frac{Wh^4}{8EI}$	$\frac{8EI}{h^3}$

ค่าอัตราเร่งในแนวราบของพื้นดิน

ความเสียหายเนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหวในประเทศที่ไม่ค่อยได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดขึ้นจากการที่ขาดความเอาใจใส่ถึงผลกระทบต่อกฎพิบัติดังกล่าวและไม่มีข้อกำหนดหรือมาตรฐานเพื่อรองรับ ทำให้เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นส่งผลให้เกิดความเสียหายเป็นวงกว้าง และหากประเทศดังกล่าวนำเอามาตรฐานหรือข้อกำหนดที่ใช้กันอยู่ในประเทศที่มีการเกิดแผ่นดินไหวร้ายแรงและบ่อยครั้งอาจจะทำให้เกิดความสั่นเปลี่ยนของวัสดุ อุปกรณ์ รวมถึงค่าใช้จ่ายที่ต้องเพิ่มขึ้นมากเกินความจำเป็น ซึ่งในประเทศไทยได้ศึกษาความเสี่ยงภัยของ

แผ่นดินไหวโดยบทความเขตแผ่นดินไหวและสัมประสิทธิ์ แผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย ปณิธาน และนพดล (ปณิธาน, 2536) ได้ทำการศึกษาวิจัย ทำให้พบว่าประเทศไทยมีขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหวไม่ได้มีค่าเท่ากันทุกพื้นที่ แต่จากข้อมูลต่างๆจะได้ค่าเฉลี่ยของความเร่งสูงสุดของประเทศไทยมีค่าประมาณ $0.15g$ จึงได้เลือกใช้ค่าอัตราเร่งในแนวนอนของพื้นดินจาก ต่อมาได้มีการศึกษาและจัดทำแผนที่ความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหว (เป็นหนึ่ง, 2537) ที่มีค่าความเร่งต่างกันในแต่ละพื้นที่ตามขนาดความรุนแรงของแรงแผ่นดินไหว (ภาพประกอบ 14) มาตรฐานการออกแบบอาคารในหลายประเทศได้กำหนดให้ใช้ค่าสูงสุดของอัตราเร่งในแนวนอนของพื้นดิน ณ ตำแหน่งอาคาร เป็นดัชนีแสดงความรุนแรงของผลกระทบจากแผ่นดินไหว ทั้งนี้เพราะขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่กระทำต่อตัวอาคารในด้านข้างนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ PGA นี่แต่เนื่องจากความไม่แน่นอนโดยธรรมชาติของขนาดตำแหน่ง และเวลาที่เกิดของแผ่นดินไหว การวิเคราะห์หาค่าสูงสุดของ PGA ที่อาจเกิดขึ้นในช่วงอายุการใช้งานของอาคารให้แน่นอนนั้นจึงเป็นไปได้ยาก ดังนั้นทฤษฎีความน่าจะเป็นจึงได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่า PGA ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบอาคาร Cornell เป็นวิธีความน่าจะเป็นที่สามารถนำเอาข้อมูลความรู้ และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบแผ่นดินไหวมาวิเคราะห์หาค่า PGA ได้อย่างเหมาะสม ดังแผนที่แสดงอัตราเร่งในแนวนอนของพื้นดิน



ภาพประกอบ 14 แผนที่แสดง contour line ของ PGA_0 / G และเขตแผ่นดินไหวของประเทศ
ไทยที่กำหนดตามเกณฑ์ของ *UBC1991* (เป็นหนึ่ง, 2537)

การออกแบบโดยคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านทานแผ่นดินไหว

วิธีการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านทานแผ่นดินไหวสำหรับสะพานในประเทศไทย
ได้จัดทำขึ้นนี้ได้อ้างอิงหลักการออกแบบสะพานตาม *AASHTO LRFD Bridge Design
Specification* ฉบับปี ค.ศ.2010 (*AASHTO, 2010*) กำหนดให้สะพานทั่วไปที่ออกแบบโดยคู่มือนี้
ยังคงเกิดการวิบัติหลังเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ได้น้อยโดยยอมให้มีความเสียหายของสะพานได้
มากแต่อาจซ่อมแซมไม่ได้หรือต้องก่อสร้างทดแทนบางส่วนหรือก่อสร้างใหม่ทั้งสะพาน อย่างไรก็ตาม
ตามสะพานที่มีความสำคัญในระดับที่สูงขึ้น เช่น ระดับที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงและการกิจทาง
ทหาร และ ระดับที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยกับชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในประเทศ คู่มือ
นี้จะลดความเสียหายลงให้สามารถซ่อมแซมได้ และสามารถเปิดใช้งานได้ในทันทีหรือภายหลัง
การซ่อม โดยระเบียบวิธีการออกแบบสะพานเพื่อด้านทานแผ่นดินไหวของไทยนี้ถูกจัดทำ และ
เผยแพร่ โดยกรมทางหลวงเมื่อปี พ.ศ.2559

ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Acceleration Response Spectrum)

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานในสองทิศทางทั้งตามยาวของสะพานและตามขวางของสะพาน สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ 1) Single Mode Spectral Method (SM) และ 2) Uniform Load Method (UM) สำหรับงานวิจัยจะใช้รูปแบบ Uniform Load Method

$$V = C_s W \quad (13)$$

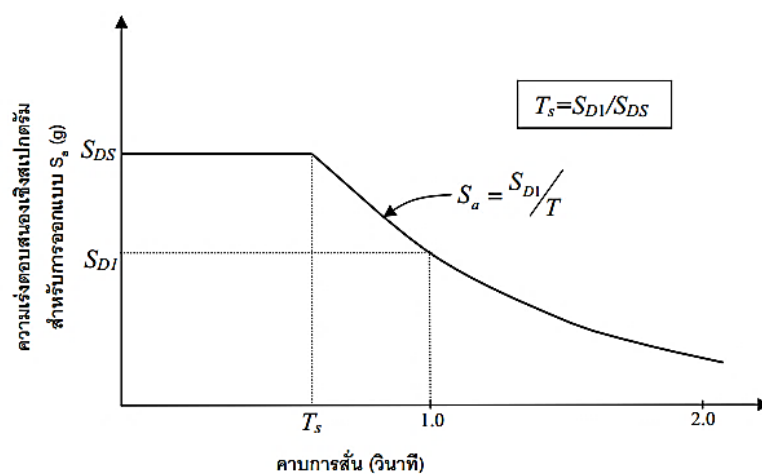
$$C_s = \frac{S_a}{R} \quad (14)$$

โดยที่	V	คือ แรงเฉือนที่ฐาน
	C_s	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว
	W	คือ น้ำหนักของโครงสร้างส่วนบน คำนวณตามข้อกำหนดของการรวมแรง (Combination load) หรือ N_u และ N_{ser}
	S_a	คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ S_a ที่คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร (T) จากภาพประกอบ 15 ภาพประกอบ 16 หรือ ภาพประกอบ 17 และภาพประกอบ 18
	R	คือ ค่าตัวประกอบปรับค่าผลตอบสนอง ของโครงสร้างส่วนล่างตามตาราง 6

การคำนวณค่าคาบการสั่นพื้นฐาน (fundamental period, T) ในทิศทางตามขวางและตามยาวของโครงสร้างจะถูกกำหนดไว้ตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว ดังสมการ (15)

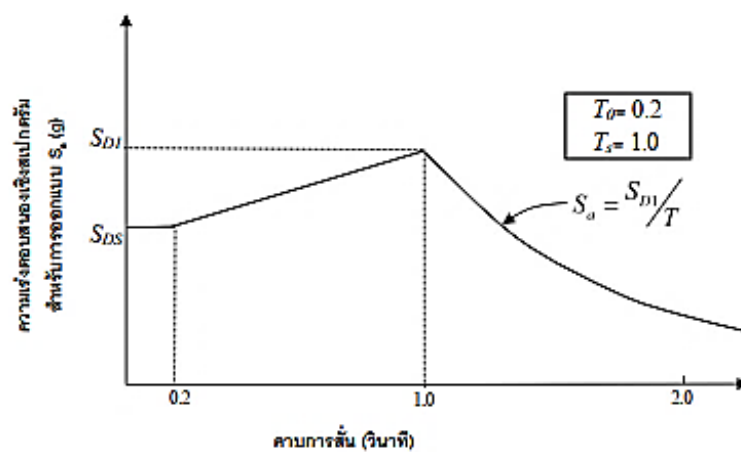
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK}} \quad (\text{วินาที}) \quad (15)$$

โดยที่	W	คือ น้ำหนักของโครงสร้างส่วนบน คำนวณตามข้อกำหนดของการรวมแรง (combination load) หรือ N_u และ N_{ser}
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (เมตร/วินาที ²)
	K	คือ ค่าความแข็งเกร็งของโครงสร้างตามตาราง 3



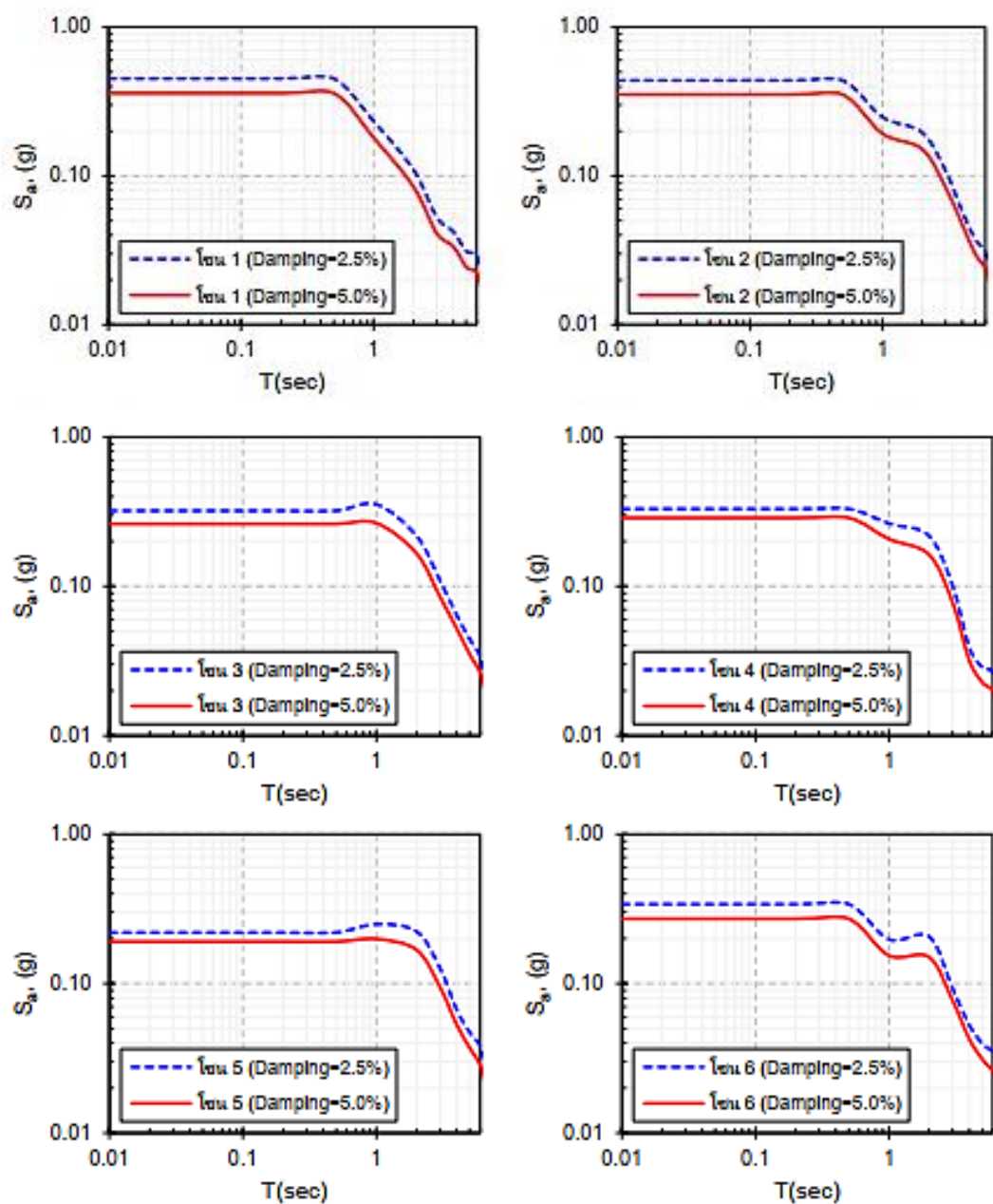
ภาพประกอบ 15 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย(ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{Ds}$

ที่มา: (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2561)



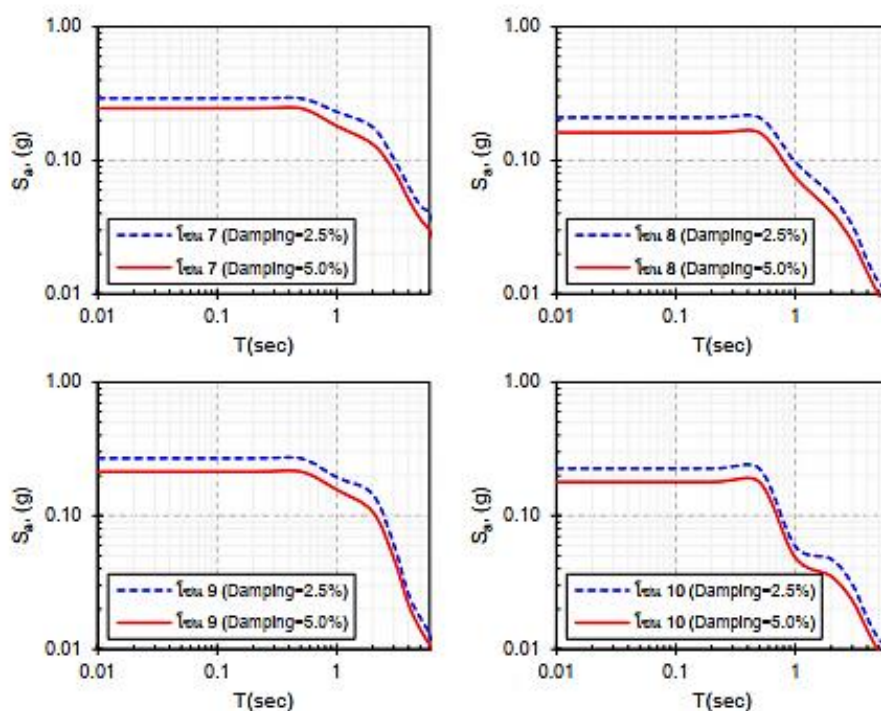
ภาพประกอบ 16 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย(ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} > S_{Ds}$

ที่มา: (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2561)



ภาพประกอบ 17 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า
สำหรับโซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ สำหรับโซน 1-6

ที่มา: (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2561)



ภาพประกอบ 18 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับ
โซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ สำหรับโซน 7-10

ที่มา: (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2561)

ตาราง 4 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับ
พื้นที่โซนต่างๆ (อัตราส่วนความหน่วง 5.0%) ของพื้นที่แอ่งกรุงเทพ

S_a โซน	S_a (0.01s)	S_{DS} (0.2s)	S_a (0.5s)	S_{D1} (1.0s)	S_a (2.0s)	S_a (3.0s)	S_a (4.0s)	S_a (5.0s)	S_a (6.0s)
1	0.360	0.360	0.360	0.181	0.085	0.041	0.034	0.024	0.022
2	0.352	0.352	0.352	0.193	0.151	0.084	0.047	0.030	0.024
3	0.262	0.262	0.262	0.265	0.166	0.085	0.052	0.035	0.026
4	0.287	0.287	0.287	0.207	0.163	0.078	0.032	0.023	0.020

ตาราง 4 (ต่อ)

S_a ไซน	S_a (0.01s)	S_{DS} (0.2s)	S_a (0.5s)	S_{D1} (1.0s)	S_a (2.0s)	S_a (3.0s)	S_a (4.0s)	S_a (5.0s)	S_a (6.0s)
5	0.191	0.191	0.191	0.199	0.168	0.094	0.053	0.037	0.028
6	0.272	0.272	0.272	0.154	0.150	0.077	0.042	0.031	0.026
7	0.246	0.246	0.246	0.181	0.132	0.084	0.051	0.036	0.030
8	0.162	0.162	0.162	0.075	0.041	0.025	0.015	0.010	0.008
9	0.214	0.214	0.214	0.156	0.107	0.048	0.022	0.014	0.011
10	0.179	0.179	0.179	0.049	0.035	0.023	0.014	0.010	0.008

ที่มา: (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2561)

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ณ บริเวณที่ตั้งของโครงสร้าง สามารถปรับแก้ให้เหมาะสมกับประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (16)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (17)$$

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)

F_a คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที

F_v คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 1.0 วินาที

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบคาบการสั่นที่ 0.2 วินาที (S_{DS}) และที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_{D1}) สามารถคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (18)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (19)$$

ประเภทของสะพานและความสำคัญของสะพานและประเภทของสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหว

คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว (กรมทางหลวง, 2559) ได้จำแนกประเภทของสะพานและความสำคัญของสะพานรวมทั้งประเภทของสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหวไว้ดังนี้

1. สะพานที่สำคัญที่สุด (critical bridges) คือสะพานที่อยู่ในเส้นทางยุทธศาสตร์และเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของประเทศตัวอย่างของสะพานประเภทนี้ ได้แก่ สะพานที่มีช่วงความยาวสะพานมากกว่า 120 เมตร สะพานเชื่อมต่อระหว่างพรมแดนของประเทศ เป็นต้น

2. สะพานสำคัญ (essential bridges) สะพานที่อยู่ในเส้นทางสายหลักระหว่างจังหวัดระหว่างสถานที่สำคัญ ได้แก่ สะพานที่มีช่วงความยาวสะพานมากกว่า 60 เมตร สะพานที่อยู่ในโครงข่ายของทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง (motorway)

3. สะพานทั่วไป (other bridges) คือสะพานที่ไม่ใช่ข่ายสะพานประเภทที่สำคัญที่สุดและสะพานสำคัญ โดยเป็นสะพานที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงข่ายทางหลวง ทางหลวงชนบท ทางหลวงสัมปทาน

ทั้งนี้ประเภทของสมรรถนะด้านทานแรงแผ่นดินไหวของสะพานขึ้นกับผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมโดยจำแนกไว้ดังตาราง 5

ตาราง 5 ประเภทสมรรถนะด้านแรงแผ่นดินไหวที่สัมพันธ์กับผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม

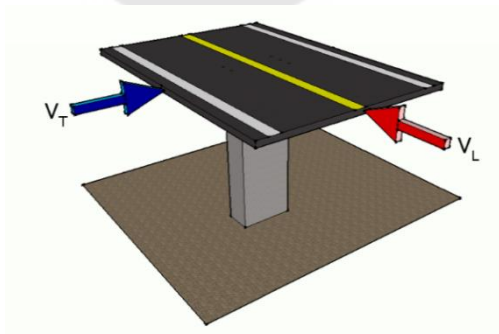
ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (S_{D1})	ประเภทสมรรถนะด้านทานแรงแผ่นดินไหว
$S_{D1} < 0.15$	1
$0.15 < S_{D1} < 0.20$	2A
$0.20 < S_{D1} < 0.30$	2B
$0.30 < S_{D1} < 0.50$	3

ที่มา : (กรมทางหลวง, 2559)

การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวจากทิศทางต่างๆ

การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวในทิศทางต่างๆ ที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานให้ดำเนินการดังนี้

1. ทิศทางของแรงแผ่นดินไหวที่พิจารณาจะพิจารณาทั้งทิศทางตามขวางช่องทางจราจรและทิศทางขนานเส้นทางจราจร เมื่อเกิดการไหวสะเทือนขึ้น ตามภาพประกอบ 19
2. การรวมแรงกระทำทางด้านข้างในทิศทางที่ตั้งฉากกัน เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า โดยให้แรงในสองทิศทางที่ตั้งฉากกันซึ่งไม่ได้กระทำพร้อมกันให้รวมผลของแรงโดยใช้ร้อยละ 100 ของผลจากแรงในทิศทางหนึ่งรวมกับร้อยละ 30 (ภาพประกอบ 19) ของผลจากแรงในทิศทางที่ตั้งฉากตามสมการ (20), (21)



ภาพประกอบ 19 แสดงแนวแรงในการคิดผลแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางต่างๆ

$$EQ = V_L + 0.3V_T \quad (\text{แรงตามแนว}) \quad (20)$$

$$EQ = V_T + 0.3V_L \quad (\text{แรงตามขวาง}) \quad (21)$$

ตาราง 6 แสดงค่าของ R-Factor สำหรับโครงสร้างส่วนล่าง

ประเภทโครงสร้างส่วนล่าง	ลำดับความสำคัญของสะพาน		
	สะพานที่สำคัญที่สุด (critical bridges)	สะพานสำคัญ (essential bridges)	สะพานทั่วไป (other bridges)
ตอม่อแบบกำแพงด้านแกนแข็ง (Wall type piers)	1.5	1.5	2.0
ตอม่อตึบเสาเข็ม (reinforced concrete pile bents)			
ก. เสาเข็มตอกในแนวตั้ง (vertical pile only)			
ข. เสาเข็มตอกเอียง (with batter piles)	1.5	2.0	3.0
	1.5	1.5	2.0
ตอม่อเสาเดี่ยว (single columns)	1.5	2.0	3.0
ตอม่อตึบเสาเข็มหน้าตัดเหลี่ยมรูปพรรณหรือหน้าตัดคอมโพสิต เหล็กรูปพรรณและคอนกรีต (steel or composite steel and concrete pile bents)			
ก. เสาเข็มตอกในแนวตั้ง (vertical pile only)			
ข. เสาเข็มตอกเอียง (with batter piles)	1.5	3.5	5.0
	1.5	2.0	3.0
ตอม่อเสาคู่หรือหลายเสา (multiple column bents)	1.5	3.5	5.0

ที่มา: (กรมทางหลวง, 2559)

การคำนวณแรงต่างๆ

การออกแบบโครงสร้างและตรวจสอบก่อนที่จะทำการออกแบบผู้ออกแบบจะต้องทำการกำหนดน้ำหนักบรรทุกที่จะกระทำต่อโครงสร้างนั้นๆด้วยว่าจะมีแรงประเภทใดบ้างและกระทำต่อโครงสร้างที่รองรับมีขนาดปริมาณเท่าใด โดยใช้คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินดินไหว (กรมทางหลวง, 2559) ของกรมทางหลวงเป็นหลัก และในส่วนเพิ่มเติมอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2010 (AASHTO, 2010) ถึงแม้ในปัจจุบันมาตรฐานของ AASHTO LRFD จะได้ออกมาอย่างตลอดและเป็นปัจจุบันแต่เพื่อให้การกำหนดค่าต่างๆของงานวิจัยที่ใช้คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินดินไหวเป็นหลักซึ่งอ้างอิงมาจากมาตรฐาน AASHTO LRFD 2010 (AASHTO, 2010) ยังคงรักษาแนวทางการออกแบบตามวัตถุประสงค์ของผู้จัดทำคู่มือได้อย่างถูกต้อง

น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load, DL)

น้ำหนักบรรทุกคงที่เป็นน้ำหนักหรือแรงที่เกิดขึ้นจากสิ่งที่จะทำให้เกิดแรงที่มีขนาดและตำแหน่งอยู่เดิมตลอดเวลาตั้งแต่ก่อสร้างจนคู่ไปกับอายุการใช้งานของสะพานดังกล่าว เช่น น้ำหนักของโครงสร้างสะพานเอง คาน พื้น ไม่เว้นแต่น้ำหนักวัสดุเททับหน้าของผิวทาง

ตาราง 7 ตารางแสดงหน่วยน้ำหนักของวัสดุต่างๆ

ชนิดของวัสดุ	หน่วยน้ำหนักของวัสดุ (กกม./ ³)
คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete)	2,400
คอนกรีตอัดแรง (Prestressed concrete)	2,500
แอสฟัลต์ (Asphalt)	2,250
เหล็กเสริม (Reinforced steel)	7,850
เหล็กหล่อ (Cast iron)	7,200
อลูมิเนียม (Aluminium)	2,800

น้ำหนักจร (Live Load, LL)

น้ำหนักจรหมายถึงน้ำหนักหรือแรงที่ส่งผลให้เกิดแรงต่อโครงสร้างโดยมีตำแหน่งที่กระทำไม่แน่นอน และขนาดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา เช่น แรงที่เกิดจากยานพาหนะ และคน

เดิมข้ามซึ่งการกำหนดหน่วยแรงของน้ำหนักจะแตกต่างออกไปแล้วแต่มาตรฐาน แต่สำหรับงานวิจัยจะใช้ข้อกำหนดของ AASHTO LRFD 2010 (AASHTO, 2010) ซึ่งประกอบไปด้วย (1) tandem load (2) truck load (3) lane load

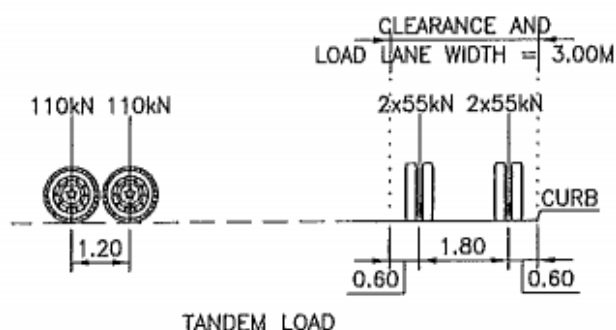
น้ำหนักของยานพาหนะ (Highway Load)

น้ำหนักของยานพาหนะที่ใช้ในการออกแบบจะใช้ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2010 (AASHTO, 2010) โดยน้ำหนักจะประกอบไปด้วยน้ำหนัก 3 ชนิด ในการใช้สำหรับวิเคราะห์น้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างสะพาน

น้ำหนักรถพ่วง (tandem Load) เป็นน้ำหนักที่สมมติขึ้นเพื่อใช้กับยานพาหนะที่ใช้ล้อเดี่ยว ขนส่ง วัสดุ ยุทโธปกรณ์ต่างๆ ประกอบไปด้วยแรงขนาด 2×110 กิโลนิวตัน วางห่างกัน 1.20 เมตร มีระยะห่างทางขวางเท่ากับ 1.80 เมตร ดังภาพประกอบ 20

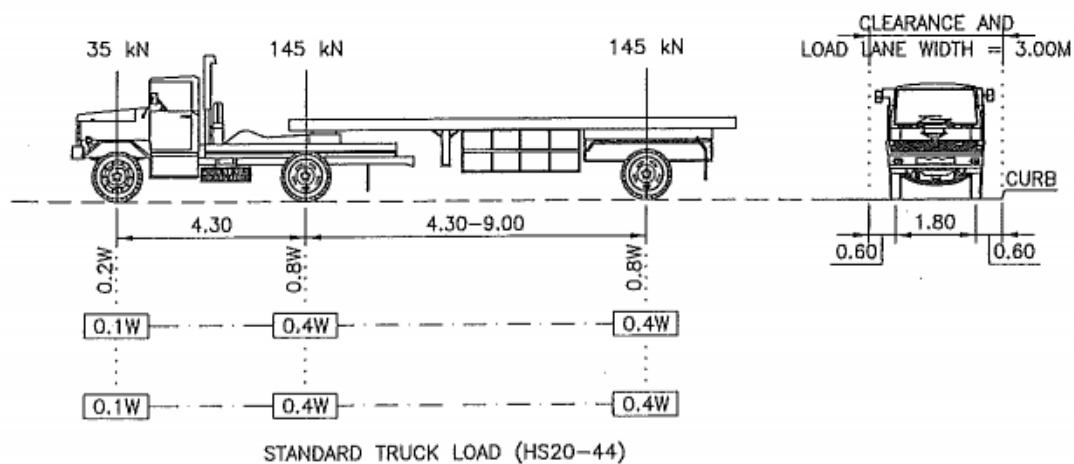
น้ำหนักรถบรรทุก (truck Load) จะเป็นน้ำหนักของรถบรรทุกที่มีระยะห่างระหว่างล้อหลังตั้งแต่ 4.30-9.00 เมตร มีระยะห่างทางขวางของตัวรถเท่ากับ 1.80 เมตร โดยที่มีน้ำหนักเท่ากับ 35 145 145 กิโลนิวตัน ตามลำดับดังภาพประกอบ 21

น้ำหนักสัญจรของช่องจราจร (lane Load) จะเป็นน้ำหนักที่แผ่กระจายชนิดเดียวไม่มีแรงกระทำแบบจุดเหมือนที่กล่าวมาก่อนหน้าโดยมีขนาดเท่ากับ 9.30 กิโลนิวตัน /เมตร ภาพประกอบ 22 โดยการคิदनน้ำหนักของมาตรฐาน AASHTO LRFD จะต่างจาก AASHTO LFD อย่างมาก เนื่องจากในการคิदनน้ำหนักจะต้องคิदनน้ำหนักแผ่กระจายที่มีขนาด 9.30 กิโลนิวตัน/เมตร กระทำร่วมกับ truck Load หรือ tandem Load อย่างใดอย่างหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดหน่วยแรงบนโครงสร้างที่สูงที่สุด



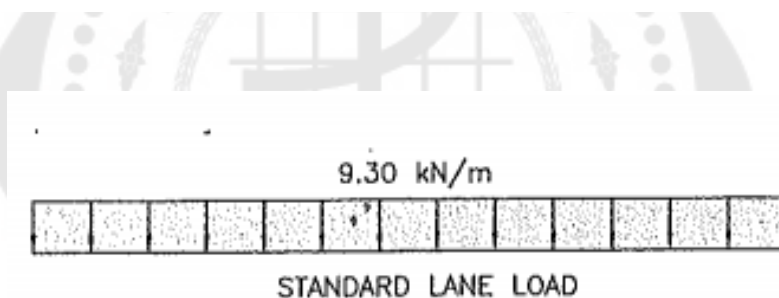
ภาพประกอบ 20 การออกแบบโดยน้ำหนักยุทโธปกรณ์ (design tandem)

ที่มา : (AASHTO, 2010)



ภาพประกอบ 21 การออกแบบโดยน้ำหนักบรรทุกบรรทุก (design truck)

ที่มา : (AASHTO, 2010)



ภาพประกอบ 22 การออกแบบโดยน้ำหนักแผ่กระจาย (design lane)

ที่มา : (AASHTO, 2010)

แรงกระแทก (impact force, IM)

แรงกระแทกเป็นแรงอีกประเภทหนึ่งที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักจลน์ของรถบรรทุกขณะมีการเคลื่อนที่ผ่านพื้นของสะพานเมื่อสะพานมีพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบจะทำให้เกิดการกระแทกของล้อรถกับพื้นสะพาน ส่งผลให้เกิดการสั่นไหวทำให้โครงสร้างสะพานสั่นไหวตาม และอาจเกิดการสั่นพ้องของโครงสร้างสะพาน เมื่อความถี่ในการสั่นพ้องดังกล่าวของรถยนต์มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติจะทำให้เกิดการสั่นไหวที่รุนแรง ดังนั้นแรงกระแทกจะเป็น ค่าอัตราส่วนความแตกต่าง

ระหว่างน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงบนสะพานขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ต่อน้ำหนักของยานพาหนะที่จอดหยุดนิ่ง

โดยที่มาตรฐาน AASHTO LRFD2010 (AASHTO, 2010) ได้กำหนดให้แรงกระแทกเท่ากับร้อยละ 33 ตามตารางที่ 8 มาตรฐานให้เพิ่มค่าแรงกระแทกเฉพาะน้ำหนัก truck load หรือ tandem load มีหน่วยเป็นร้อยละตามสมการ (22)

$$\text{สัมประสิทธิ์แรงกระแทก} = \left(1 + \frac{IM}{100}\right) \quad (22)$$

ตาราง 8 แรงกระแทก (impact force, IM)

ส่วนต่างๆ	แรงกระแทก (IM)
รอยต่อ	75%
ตรวจสอบความล้า	15%
ส่วนอื่นๆ	33%

ที่มา: (AASHTO, 2010)

การลดค่าน้ำหนักบรรทุกจร (reduction in load intensity)

ในการออกแบบสะพานที่ใช้น้ำหนักของรถบรรทุกเป็นน้ำหนักควบคุมการออกแบบจากข้อมูลทางสถิติ พบว่าโอกาสที่รถบรรทุกจะวิ่งพร้อมกันเต็มทุกช่องจราจรในช่วงเวลาเดียวกันนั้นเป็นไปได้น้อยมากจึงทำให้เกิดการใช้ค่าตัวแปรในการคูณลดค่าน้ำหนักบรรทุกจรถจากกรณีดังกล่าวนี้

ตาราง 9 ตัวคูณจำนวนช่องจราจร

จำนวนช่องจราจร	% การลดค่าน้ำหนักจร
หนึ่งช่องจราจร	1.20
สองช่องจราจร	1.00
สามช่องจราจร	0.85
มากกว่าสามช่องจราจร	0.65

ที่มา: (AASHTO, 2010)

แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal forces, CE)

เมื่อมีรถเคลื่อนที่บนสะพานและต้องมีการเข้าโค้งบริเวณสะพานดังกล่าวจะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเกิดขึ้นในทิศตั้งฉากกับเส้นสัมผัสกับตัวสะพาน โดยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะคิดเป็นร้อยละของน้ำหนัก truck load หรือ tandem load เท่านั้น ที่กระทำในทุกช่องจราจรโดยไม่รวมแรงกระแทก แรงหนีศูนย์กลางที่กึ่งกลางเลนที่จุด 1.80 เมตรเหนือผิวทางวิ่ง

$$CE = F \left(\frac{V^2}{127R} \right) \quad (23)$$

โดยที่ CE คือ แรงหนีศูนย์กลางเป็นร้อยละของน้ำหนักจร V คือ ความเร็วใช้ออกแบบ, กิโลเมตร/ชั่วโมง R คือ รัศมีความโค้ง วัดถึงเส้นกึ่งกลางสะพาน

F คือ 4/3 สำหรับทุกการรวมแรง (all load combination) เพื่อให้ครอบคลุม (M. John, 1991) ซึ่งพบว่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่ใช้วิ่งในอดีตจนถึงปัจจุบัน (exclusion vehicles) มีขนาดใหญ่กว่าน้ำหนัก truck load (HS20-44) เท่ากับ 1.0 สำหรับการคำนวณความล้า

แรงเบรก (breaking force)

แรงเบรกเป็นอีกหนึ่งแรงที่พิจารณาเนื่องจากมีผลต่อโครงสร้างส่วนบน และส่วนล่าง ที่ต้องใช้ในการออกแบบ การคำนวณหาแรงเบรกจะต้องอาศัยงานจากการเคลื่อนที่ เท้ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของยานพาหนะ

$$b = \frac{1}{2} \left(\frac{V^2}{gs} \right) \quad (24)$$

โดยที่	b	คือ สัดส่วนของแรงเบรกต่อน้ำหนักบรรทุก
	V	คือ ความเร็ว (เมตร/วินาที)
	g	คือ แรงโน้มถ่วง (9.807 เมตร/วินาที ²)
	s	คือ ระยะทางที่ลดความเร็วลงอย่างสม่ำเสมอกระทั่งเป็นศูนย์

มาตรฐาน AASHTO LRFD 2010 สมมติให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 90 กม./ชม. (25 เมตร/วินาที) ถ้าห้ามล้อให้หยุดภายในเวลา 10 วินาที ด้วยระยะทาง 122 เมตร จะได้ สัดส่วนของแรงเบรกต่อน้ำหนักบรรทุกประมาณร้อยละ 25

การรวมแรง (load combination)

การรวมผลของของแรงแผ่นดินไหวกับแรงอื่นๆ สำหรับส่วนประกอบของโครงสร้าง สะพานจะต้องพิจารณาร่วมกับแรงประเภทอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหว โดยแรงต่างๆจะถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือในส่วประเภทแรกคือน้ำหนักบรรทุกคงที่ หมายถึง น้ำหนักที่มีขนาด และตำแหน่งคงที่ตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพาน และ ประเภทที่ 2 คือน้ำหนักบรรทุกจร หมายถึง น้ำหนักที่เกิดขึ้นจากยานพาหนะหรือแรงที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาตามการใช้งานโครงสร้างสะพาน ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานตามเวลา ตาม การวิ่งของรถ และอื่นๆ ทำให้การรวมผลของแรงกำหนดไว้ดังนี้ตามมาตรฐานคู่มือการออกแบบ สะพานและถนนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว ของกรมทางหลวง ดังแสดงในตาราง 10

ตาราง 10 ค่า Load Factor สำหรับคูณปรับค่าแรงต่างๆที่ใช้ในการรวมผลแบบเชิงเส้น

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

ที่มา : (กรมทางหลวง, 2559)

โดยที่ แรงที่ใช้ในการออกแบบสะพานตามมาตรฐาน ได้แก่

DC คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักสะพานและวัสดุ

DD คือ แรงเนื่องจาก down drag

DW คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุผิวพื้นสะพานและอุปกรณ์ประกอบ
สะพาน

EH คือ แรงเนื่องจากแรงดันดินด้านข้าง

EV คือ แรงดันดินในแนวตั้ง

ES คือ แรงแผ่กระจายของดิน

EL คือ แรงเนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างและผลของ secondary effect
ของลวดอัดแรง

PS คือ แรงเนื่องจากลวดอัดแรง

CR คือ แรงเนื่องจากการคืบ

<i>SH</i>	คือ แรงเนื่องจากการหดตัว
<i>LL</i>	คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักจร
<i>IM</i>	คือ แรงเนื่องจากการกระทบ
<i>CE</i>	คือ แรงเนื่องจากการหนีศูนย์กลางของน้ำหนักจร
<i>BR</i>	คือ แรงเนื่องจากการหยุดของยานพาหนะ
<i>PL</i>	คือ แรงเนื่องจากผู้โดยสาร
<i>LS</i>	คือ แรงแผ่กระจายเนื่องจากยานพาหนะ
<i>WA</i>	คือ แรงเนื่องจากน้ำและกระแส
<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} ที่ใช้ในการปรับค่าเนื่องจาก น้ำหนักบรรทุกจร ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวสำหรับงานวิจัยเลือกใช้เท่ากับ 0.50 ตามคำแนะนำของคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวที่กำหนดต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.50

ตาราง 11 ค่าของแรงกระทำ (γ_p)

ประเภทของน้ำหนัก ชนิดของฐานราก และวิธีที่ใช้คำนวณปรับลด	ตัวประกอบกำลัง	
	มากที่สุด	น้อยที่สุด
DC: Component and Attachments	1.25	0.90
DC: Strength IV only	1.50	0.90
DD: Downdrag Piles, α Tomlinson Method	1.4	0.25
Piles, γ Method	1.05	0.30
Drilled shafts, O'Neill and Reese(1999) Method	1.25	0.35
DW: Wearing Surfaces and Utilities	1.50	0.65
EH: Horizontal Earth Pressure		
- Active	1.50	0.90
- At-rest	1.35	0.90
- AEP for anchored walls	1.35	N / A
EL: Locked-in Construction Stresses	1.00	1.00
EV: Vertical Earth Pressure		
- Overall Stability	1.00	N / A
- Retaining Walls and Abutments	1.35	1.00
- Rigid Buried Structure	1.30	0.90
- Rigid Frames	1.35	0.90
- Flexible Buried Structure other than Metal Box Culverts	1.95	0.90
- Flexible Metal Box Culverts and Structure Plate Culverts	1.50	0.90
with Deep Corrugations		
ES: Earth Surcharge	1.50	0.75

ที่มา: (AASHTO, 2010)

สำหรับงานวิจัยในการใช้ค่าน้ำหนักของโครงสร้างส่วนบน W จะมีค่าเท่ากับแรงกระทำรวม (combination load, N_u , N_{ser}) ตามข้อกำหนด ตาราง 10 และ 11 จะสามารถแสดงการรวมแรง ได้ดังนี้

Extreme Event:

$$N_u = 1.25N_{DC} + 1.5N_{DW} + 1.4N_{DD} + \gamma_{EQ}(N_{LL+IM}) + N_{EQ} \quad (25)$$

$$V_u = 1.25V_{DC} + 1.5V_{DW} + 1.4V_{DD} + \gamma_{EQ}(V_{LL} + V_{IM}) + V_{EQ} \quad (26)$$

$$M_u = 1.25M_{DC} + 1.5M_{DW} + 1.4M_{DD} + \gamma_{EQ}(M_{LL} + M_{IM}) + M_{EQ} \quad (27)$$

Service I:

$$N_{ser} = (N_{DC+DW+DD}) + (N_{LL+IM}) + N_{EQ} \quad (28)$$

$$V_{ser} = (V_{DC+DW+DD}) + (V_{LL+IM}) + V_{EQ} \quad (29)$$

$$M_{ser} = (M_{DC+DW+DD}) + (M_{LL+IM}) + M_{EQ} \quad (30)$$

การคำนวณกำลังดัดของหน้าตัด

สำหรับการตรวจสอบค่าวิสัยความสามารถของหน้าตัดหมายถึงการตรวจสอบถึงความสามารถของหน้าตัดที่ได้ทำการออกแบบไว้ตามข้อกำหนดและทฤษฎีต่างๆเพื่อให้ได้มาซึ่งกำลังที่เพียงพอในการต้านทานแรงที่เกิดขึ้น

การคำนวณหาโมเมนต์ในหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก

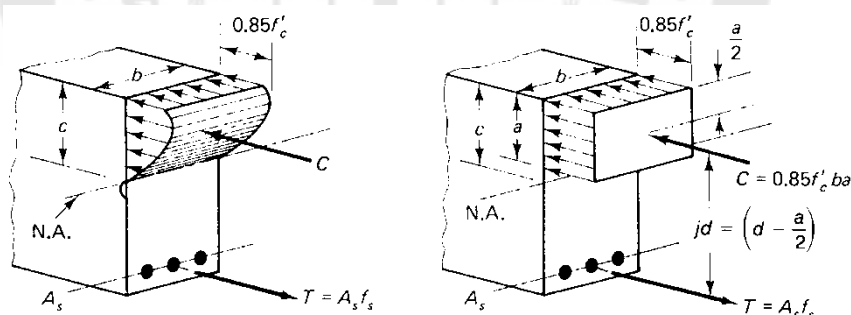
การคำนวณกำลังดัดของหน้าตัด เมื่อเกิดน้ำหนักบรรทุก หรือแรงต่างๆกระทำกับหน้าตัดแล้วจึงก่อให้เกิดหน่วยแรงที่ผิวของคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยกระจายเป็นหน่วยแรงอัด (compressive force, C) และหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจากเหล็กเสริม (tensile force, T) เกิดเป็นแรงคู่ควบ (couple force) พัฒนาเป็นโมเมนต์ดัด คือ M เท่ากับ C หรือ T คูณกับแขนของแรง (ระหว่าง C กับ T) ตามภาพประกอบ 23 โดยโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากหน้าตัดนี้จะเกิดการสลายเมื่อหน้าตัดได้รับโมเมนต์เกินที่จะสามารถรับได้ แล้วทำให้เกิดความเครียดอัดในหน้าตัดมีค่า เท่ากับ ความเครียดบดอัด ($\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0.003$ มม./มม.) นั่นคือวัสดุไม่สามารถรับแรงกระทำได้อีก

การกระจายตัวของหน่วยแรงอัดบริเวณเหนือแนวแกนสะเทิน (N.A.) จะมีความแตกต่างไปตามภาวะการใช้งานจะมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลา โดยความลึกของหน่วยแรงที่กระจายวัดจากผิวรับแรงอัดถึงแนวแกนสะเทินมีค่าเท่ากับ c ในภาพประกอบ 23 แต่ในปี ค.ศ. 1937 ได้ถูกเสนอให้พิจารณาการกระจายตัวของหน่วยแรงดังกล่าวที่อยู่ในรูปพาราโบลาเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างเท่ากับ $0.85f'_c$ และลึกเท่ากับ a โดยค่า a มีค่าเท่ากับ $\beta_1 c$ ดังภาพประกอบ 23

จากภาพประกอบ 23 จะทำให้สามารถคำนวณแรงอัดในคอนกรีตและแรงดึงของเหล็กเสริมได้ตามสมการ (31) และสมการ (32)

$$C = 0.85 f'_c ab \quad (31)$$

$$T = A_s f_y \quad (32)$$



ภาพประกอบ 23 การกระจายตัวของความเค้นดัด หน่วยแรง และแรงในหน้าตัดที่สภาวะประลัย
ที่มา : (Nawy, 1996)

การคำนวณหากล้างรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดของหน้าตัดเสาแบบแกนเดียว

เสา (column) คือ องค์อาคารที่มีอัตราส่วนของความสูงต่อส่วนแคบที่สุดมากกว่าหรือเท่ากับ 3 โดยที่องค์อาคารนี้ใช้รับแรงอัดตามแนวแกนเป็นหลัก

การคำนวณหากล้างรับน้ำหนักตามทฤษฎีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (ไม่ว่าจะเป็นเสาปลอกเดี่ยว หรือปลอกเกลียว) ถูกกำหนดไว้หลายมาตรฐานทำให้แต่ละมาตรฐานส่งผลถึงกำลังที่

ไม่เท่ากันโดยงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาถึงคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินดินไหวที่ได้มีมาตรฐานอ้างอิงจาก AASHTO LRFD 2010 จึงทำให้การคำนวณกำลังของหน้าตัดเกิดจากการรวมของกำลังต้านทานระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีต $0.85f'_cA_c$ และกำลังครากของเหล็กเสริม $A_{st}f_y$ ดังสมการ (33)

$$P_0 = 0.85f'_c(A_g - A_{st}) + f_yA_{st} \quad (33)$$

พฤติกรรมของเสาปลอกเดี่ยว และปลอกเกลียวมีความแตกต่างกัน ในทางการออกแบบจึงกำหนดให้คำนวณกำลังอัดตามแนวแกนระบุสูงสุด (maximum nominal strength, $P_{n,max}$) ของเสาสั้น ตามประเภทของเหล็กปลอก โดยการใช้ตัวคูณ λ คูณเข้ากับ P_0 ดังสมการ (34)

$$P_{n,max} = \lambda P_0 \quad (34)$$

เมื่อ λ เท่ากับ 0.80 และ 0.85 สำหรับเสาปลอกเดี่ยว และปลอกเกลียว ตามลำดับ

เช่นเดียวกับการออกแบบหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องรับทั้งแรงอัดและรับแรงดัด สมการที่ใช้ควบคุมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงอัดตามแนวแกนเพียงอย่างเดียว คือ

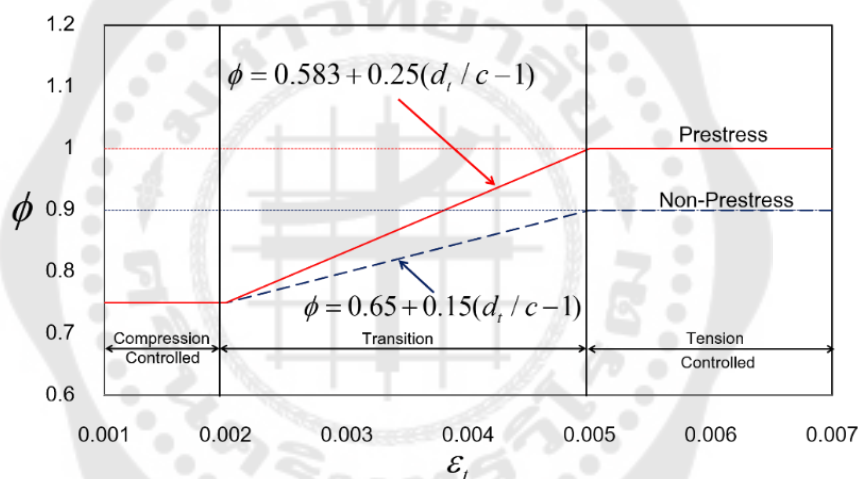
$$P_u \leq \phi P_n \quad (35)$$

เมื่อ P_u คือ แรงอัดประลัย (ultimate compressive force)

$P_{n,max}$ คือ กำลังอัดตามแนวแกนระบุสูงสุด (maximum compressive strength) ของหน้าตัด

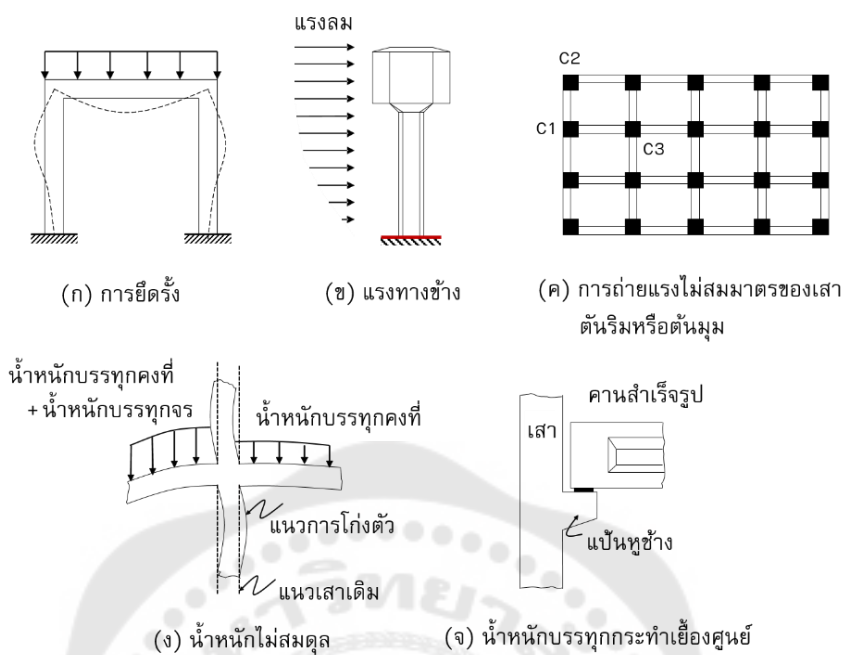
ϕ คือ แฟคเตอร์ลดค่า (strength reduction factor) มีค่าแปรผันตามความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่ไกลที่สุดวัดจากผิวรับแรงอัด ดังภาพประกอบ 24

ภาพประกอบ 25 เสาคอนกรีตมีโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงอัดในหลายกรณี ไม่เว้นแม้กรณีที่โครงสร้างรับแรงในแนวตั้งเพียงอย่างเดียว แต่โครงสร้างมีการยึดรั้ง (restraint) ก็สามารถทำให้เกิดโมเมนต์ดัดขึ้นได้ (ดังแสดงในภาพประกอบ 25(ก)) หรือกรณีที่โครงสร้างต้องรับแรงทางข้างโดยตรง เช่น แรงลม แรงแผ่นดินไหว แรงดันน้ำพลวัต หรือแรงระเบิด เป็นต้น (ดังแสดงในภาพประกอบ 25 (ข)) หรือกรณีของเสาด้านมุม (corner columns) หรือด้านริม (edge columns) ที่ต้องรับแรงแบบไม่สมมาตรจนสร้างโมเมนต์ดัดในเสาขึ้นได้ (ดังแสดงในภาพประกอบ 25(ค)) หรือกรณีที่เสาต้องรับ น้ำหนักบรรทุกที่ไม่สมดุล (unbalanced loading) ดังแสดงในภาพประกอบ 25(ง) หรือกรณีของการเยื้องศูนย์ (eccentric) อย่างตั้งใจในโครงสร้างแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูป (ดังแสดงในภาพประกอบ 25(จ))



ภาพประกอบ 24 ความสัมพันธ์ของค่า ϕ จากความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง ตามมาตรฐาน AASHTO 2010

ที่มา : (AASHTO, 2010)



ภาพประกอบ 25 รูปแบบที่เกิดขึ้นทำให้เกิดโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงอัดตามแนวแกน

ที่มา : (ภาณุวัฒน์, 2558)

โดยความสัมพันธ์ของแรงอัดประลัย (P_u) และโมเมนต์ดัดประลัย (M_u) สามารถแสดงผ่าน ระยะเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity, e) ดังแสดงในภาพประกอบ 26 ได้

$$e = M_u / P_u \quad (36)$$

โดยหลักการออกแบบยังอาศัยแนวคิดของวิธีกำลัง ซึ่งต้องพิจารณาร่วมกันและต้องผ่านทั้ง 2 กรณี ดังสมการ (37), (38) โดยสามารถตรวจสอบการกระจายของแรงดังภาพประกอบ

27

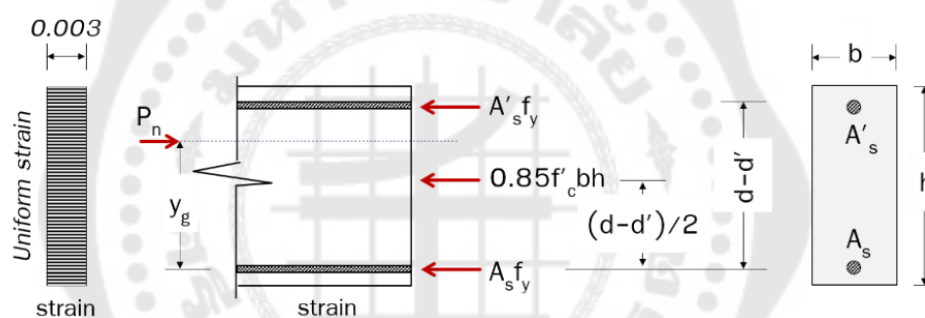
$$\phi P_n \geq P_u \quad (37)$$

$$\phi M_n \geq M_u \quad (38)$$



ภาพประกอบ 26 ความสัมพันธ์ของแรงอัด และโมเมนต์ดัด

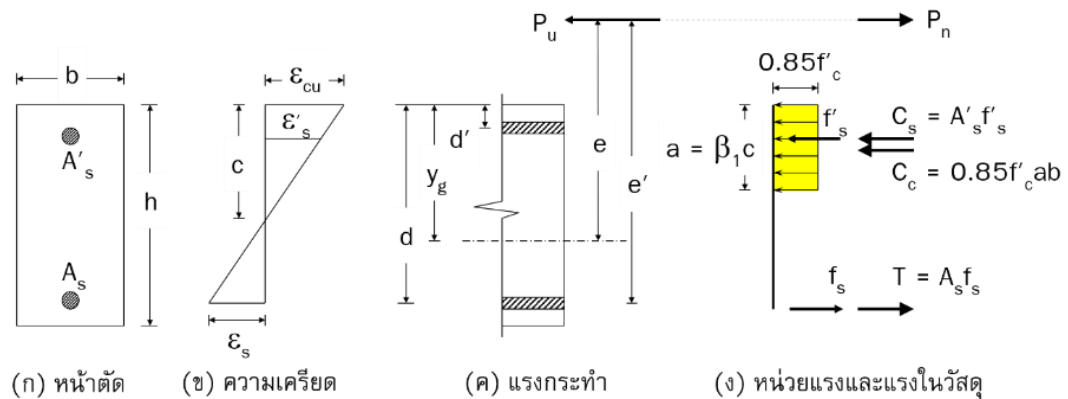
ที่มา : (ภาณุวัฒน์, 2558)



ภาพประกอบ 27 การกระจายของแรงเพื่อการคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วงพลาสติก

ที่มา : (ภาณุวัฒน์, 2558)

การกระจายของความเครียด หน่วยแรงภายใน และแรงภายในหน้าตัดของเสาที่รับทั้งแรงอัด (P_u) และโมเมนต์เนื่องจากการเยื้องศูนย์ ($M_u = P_u e$) แสดงตามภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 การกระจายของความเครียด หน่วยแรงภายใน และแรงภายในหน้าตัด

ที่มา : (ภาณุวัฒน์, 2558)

จากภาพประกอบ 28(ง) สามารถสมดุลแรงภายในหน้าตัดได้ด้วยสมการ $P_n = C_c + C_s - T$ ซึ่งเมื่อแทนค่าด้วยหน่วยแรง คูณด้วยพื้นที่ของแต่ละวัสดุจะได้

$$P_n = 0.85 f'_c b a + A'_s f'_s - A_s f_s \quad (39)$$

จากสมการ (39) แก้สมการเพื่อหาค่า a ได้เท่ากับ

$$a = \frac{(P_n - A'_s f'_s + A_s f_s)}{0.85 f'_c b} \quad (40)$$

คำนวณ M_n รอบจุดศูนย์ถ่วงพลาสติก (y_g) หรือ $M_n = P_n e$ จะได้

$$M_n = C_c \left(y_g - \frac{a}{2} \right) + C_s (y_g - d') + T (d - y_g) \quad (41)$$

เมื่อ C_c คือ แรงอัดในคอนกรีต มีค่าเท่ากับ $0.85 f'_c b a$

C_s คือ แรงอัดในเหล็กเสริมด้านรับแรงอัด มีค่าเท่ากับ $A'_s f'_s$

T คือ แรงดึงในเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงมีค่าเท่ากับ $A_s f_s$

คำนวณ M'_n รอบจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมหรือ $M'_n = P_n e'$ จะได้

$$M'_n = C_c(d - \frac{a}{2}) + C_s(d - d') \quad (42)$$

เมื่อทราบ e' และ $a = \beta_1 c$ จะสามารถคำนวณ P_n ได้ดังนี้

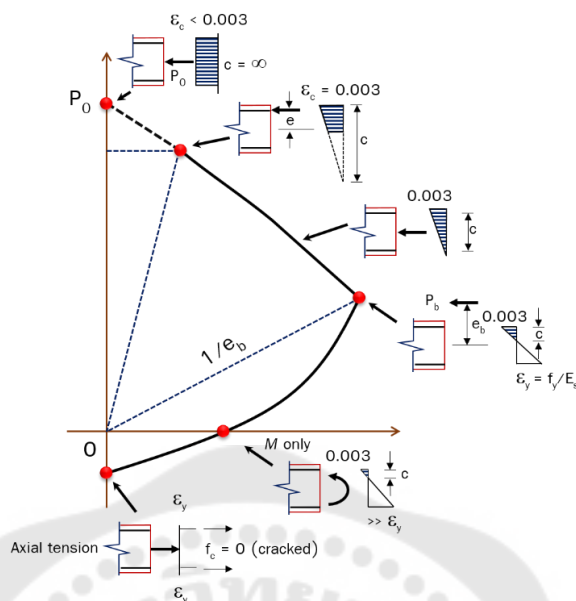
$$P_n = \frac{(0.85 f'_c b a (d - \frac{a}{2}) + A'_s f'_s (d - d'))}{e'} \quad (43)$$

ทั้งนี้หน่วยแรง ซึ่งคำนวณจากผลคูณของโมดูลัสยืดหยุ่น และความเครียดในเหล็กเสริมคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$f_s = E_s \varepsilon_s = 0.003(d - c) \frac{E_s}{c} \leq f_y \quad (44)$$

$$f'_s = E_s \varepsilon'_s = 0.003(c - d') \frac{E_s}{c} \leq f_y \quad (45)$$

กราฟในภาพประกอบ 29 เรียกว่า กราฟปฏิสัมพันธ์ (interaction diagram) โดยเส้นสีดำคือเส้นที่วาดขึ้นจากการเชื่อมกันระหว่างจุด M_n และ P_n หรือ (M_n, P_n) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเส้นโค้งดังกล่าวเป็นตัวแทนแสดงกำลังของหน้าตัดในการรับแรงอัดร่วมกับแรงดัดในกราฟเดียวนั่นเอง อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการคำนวณโดยไม่ใช้คอมพิวเตอร์อาจไม่สะดวก ในการคำนวณจุด (M_n, P_n) ทุกจุดอย่างละเอียด (ติดกัน) ดังนั้นโดยทั่วไปจึงจะคำนวณเฉพาะจุดสำคัญโดยทั่วไปจุดเหล่านี้จะมีทั้งหมดประมาณ 7 จุดตามภาพประกอบ 32 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบความสามารถของหน้าตัดเสาด้านนั้นๆให้มีกำลังเพียงพอต่อแรงกระทำไม่ว่าจะเป็นแรงอัดหรือแรงดัดที่อาจเกิดขึ้นได้เมื่อเกิดการโยกศูนย์ หรือแรงกระทำทางด้านข้างนั่นเอง



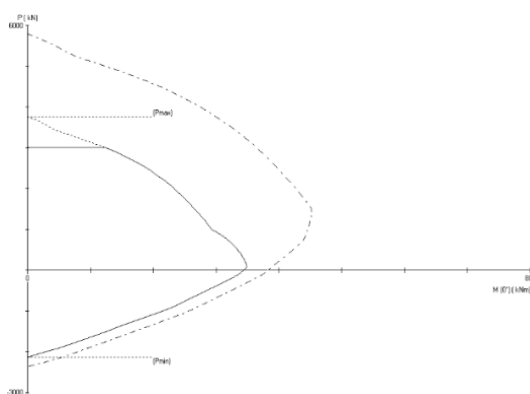
ภาพประกอบ 29 จุดสำคัญสำหรับกราฟปฏิสัมพันธ์

ที่มา : (ภาณุวัฒน์, 2558)

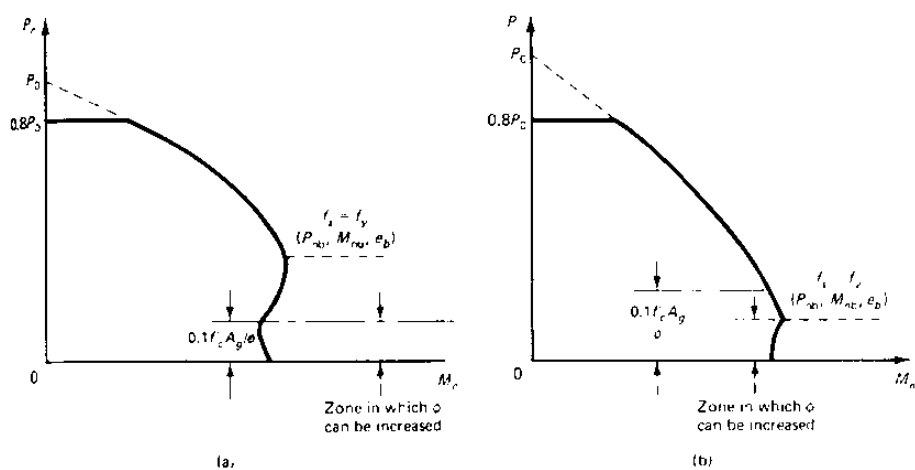
ภาพประกอบ 29 แสดงกราฟปฏิสัมพันธ์ ซึ่งเกิดจากการลากเส้นเชื่อมระหว่างจุดสำคัญต่างๆ เช่น จุดที่รับแรงอัดเพียงอย่างเดียว (P_{n0} หรือ P_0) จุดสุดท้ายที่ก่อนที่เกิดแรงดึงในหน้าตัด (zero tension) จุดสมดุล (balanced point) จุดเสามีพฤติกรรมเป็นคาน รวมถึงจุดที่เสารับแรงดึงตามแนวแกน (axial tension) เพียงอย่างเดียว ซึ่งใช้ในกรณีที่ต้องพิจารณาเสาเป็นท่อนรับแรงดึง ซึ่งเกิดจากสมดุลของหน้าตัดที่สถานะต่างๆ เมื่อเกิดแรงกระทำขึ้น

สำหรับการใช้งานเส้นปฏิสัมพันธ์ในการออกแบบข้อกำหนดจะกำหนดตัวคุณลดกำลังไว้ตามภาพประกอบ 24 ดังนั้น ณ สถานะต่างๆ ของหน้าตัดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจะต้องนำกำลังที่ได้คูณด้วยแฟคเตอร์ลดกำลัง ϕ ดังแสดงในภาพประกอบ 30 ที่แสดงเส้นประเป็นเส้นของกำลังในการต้านทานแรงอัดและแรงดัดตามทฤษฎี และเส้นทึบคือเส้นของกำลังในการต้านทานแรงอัดและแรงดัดเมื่อถูกลดกำลังลงตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งเมื่อกระบวนการข้างต้นเกิดขึ้นจะได้กราฟปฏิสัมพันธ์ที่มีประโยชน์อย่างมากในการใช้ออกแบบเสาเพื่อต้านทานแรงที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่หน้าตัดเสาต้องรับแรงอัดและการดัดหลายกรณี (load cases) โดยหลักการทำงานคือแรงอัดและแรงดัดที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอกที่กระทำต่อหน้าตัดคู่อันดับของแรงประลัย (M_u, P_u) เมื่อนำมาเขียนลงในกราฟจุดดังกล่าวจะต้องไม่เกิดเส้นทึบที่เกิดจากการลด

กำลังของหน้าตัดลง หากจุดดังกล่าว (หรือมีอีกหลายจุด ตามแต่ load case ที่มี) อยู่ภายนอกเส้นโค้ง ก็จะถือว่าหน้าตัดเสนั้นไม่สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัยควรต้องมีการออกแบบหน้าตัดเสาใหม่ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มเหล็กยื่น หรือขยายขนาดหน้าตัดเสา

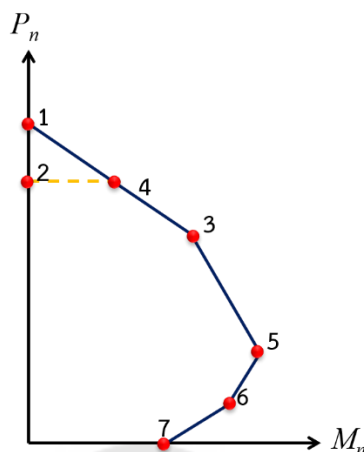


ภาพประกอบ 30 แนวคิดในการปรับลดค่ากราฟปฏิสัมพันธ์ซึ่งคำนวณได้ตามทฤษฎี หรือแบบกำลังระบุ ให้เป็นกราฟปฏิสัมพันธ์เพื่อการออกแบบ



ภาพประกอบ 31 จุดที่เริ่มปรับลดเพิ่มค่า ϕ

ที่มา : (Naaman, 1982)

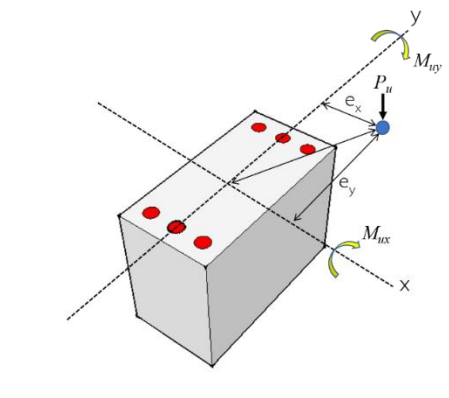


ภาพประกอบ 32 จุดสำคัญทั้ง 7 สำหรับการสร้างกราฟปฏิสัมพันธ์อย่างง่าย

- จุดที่ 1 คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดตามทฤษฎีมีพิกัด ($0, P_0$)
- จุดที่ 2 คือ กำลังรับแรงอัดที่มาตรฐานกำหนด มีพิกัด ($0, P_{n,max}$)
- จุดที่ 3 คือ จุดที่แรงดึงเป็นศูนย์ มีพิกัด คือ ($M_{o,t}, P_{n,t}$)
- จุดที่ 4 คือ จุดตัดระหว่างเส้นตรง 1-3 และเส้นนอนของ $P_{n,max}$ มีพิกัด คือ ($M_n, P_{n,max}$)
- จุดที่ 5 คือ จุดสมดุล มีพิกัดคือ ($M_{nb}, P_{n,b}$)
- จุดที่ 6 คือ จุดที่เสาเริ่มเปลี่ยนเป็นคานมีพิกัดคือ (M_c, P_c)
- จุดที่ 7 คือ จุดที่มีพฤติกรรมเป็นคานหรือมีแรงอัดเป็นศูนย์มีพิกัดคือ ($M_f, 0$)

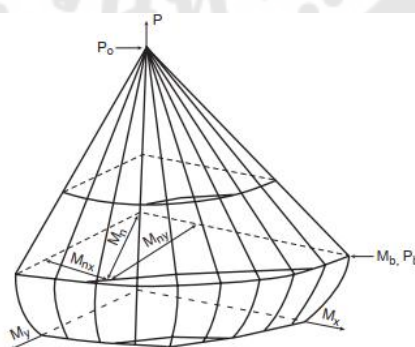
การตรวจสอบกำลังของหน้าตัดในการรับแรงสองแกน

สำหรับการพิจารณาเสาที่ต้องรองรับแรงกระทำสองแกนจะเป็นเสาของโครงสร้างที่อยู่บริเวณมุมของอาคารและเสาสะพานที่ต้องคำนวณแรง และโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในสองทิศทางซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้จะมีอยู่ 2 วิธีคือ (1) Reciprocal Load Method (2) Load Contour Method โดยรูปแบบที่ 2 จะเกิดจาก M_x คือโมเมนต์ที่เกิดจากแรงกระทำรอบแกน x และ M_y คือโมเมนต์ที่เกิดจากแรงกระทำรอบแกน y ซึ่งแรงกระทำนี้คือ P ที่มีการเอียงศูนย์ออกไปทั้งแนวแกน x และ y ดังภาพประกอบ 33



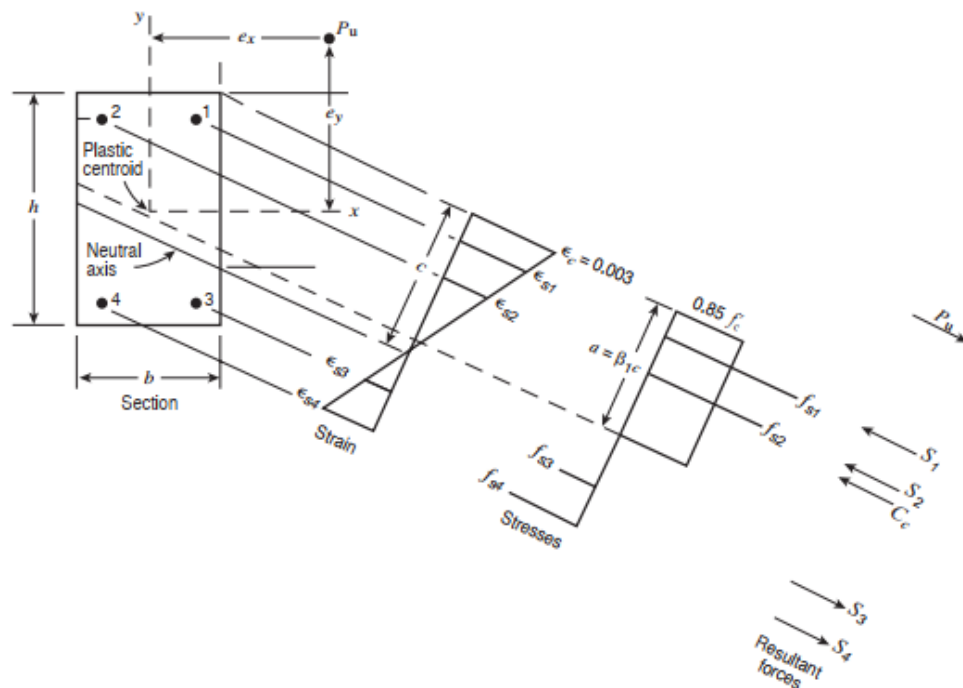
ภาพประกอบ 33 แรงกระทำที่เกิดจากการเยื้องศูนย์ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ดัด 2 แกน

สำหรับการเขียนกราฟปฏิสัมพันธ์ของแรงกระทำแบบแกนเดียวจะกำหนดความแข็งแรงของหน้าตัดด้วยแรงต้านทานแรงอัดและโมเมนต์ต้านทานบนระนาบเพียงระนาบเดียว แต่สำหรับการเขียนกราฟปฏิสัมพันธ์ของเสาที่จะต้องต้านทานแรง และโมเมนต์ดัดสองแกนจะต้องเขียนเป็นพื้นผิววิบัติดังภาพประกอบ 34 ซึ่งในการวิเคราะห์หน้าตัดที่มีลักษณะของเสาเป็นสี่เหลี่ยมจะมีความซับซ้อนของการวิเคราะห์เนื่องจากแนวแกนสะเทินจะไม่ได้อยู่ในแนวแกน x และ y แต่เนื่องจากการเยื้องของแรงอัดในแนวตั้งส่งผลให้แนวแกนสะเทินจะเอียงทำมุมเทียบกับแกนราบไปยังทิศทางของแรงอัดในแนวตั้งที่เกิดขึ้น ตามภาพประกอบที่ 35



ภาพประกอบ 34 พื้นผิววิบัติของเสาที่ต้องรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดสองแกน

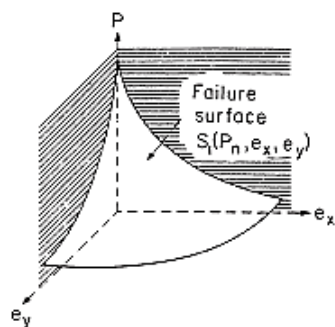
ที่มา: (Mahmoud, 2011)



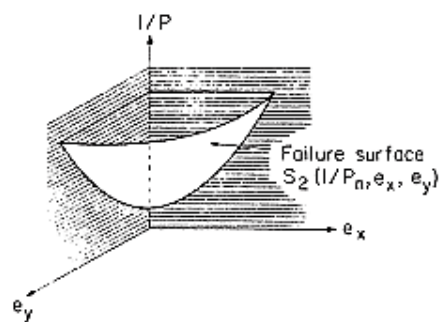
ภาพประกอบ 35 แนวแกนสะเทิน มุมของแกนที่หมุนไปและความเครียดบนหน้าตัดที่เกิด
โมเมนต์ดัด 2 แกน

ที่มา: (Mahmoud, 2011)

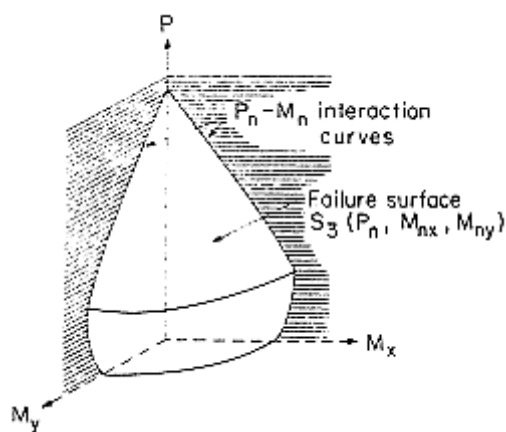
สำหรับการวิเคราะห์กำลังของหน้าตัดที่เกิดแรงภายใต้โมเมนต์ดัด 2 แกน และแรงกด จะมีตัวแปรอยู่ 3 ตัวได้แก่ P_n , M_{nx} และ M_{ny} ซึ่งอาจแสดงออกมาจากรูปแบบของแรงกระทำที่เกิดการเยื้องศูนย์ คือ $e_x = M_{ny} / P_n$ และ $e_y = M_{nx} / P_n$ โดยกำลังของหน้าตัดนี้เองจะถูกควบคุมด้วยพื้นผิวการวิบัติที่เกิดจากแรงกระทำที่ทำให้เกิดการวิบัติ P_n และการเยื้องศูนย์ e_x และ e_y หรืออาจเกี่ยวข้องกับโมเมนต์ดัด M_{nx} และ M_{ny} ที่จะเกิดรูปแบบของพื้นผิวการวิบัติอยู่ 3 รูปแบบ (1) พื้นผิวพื้นฐาน S_1 ที่ถูกกำหนดโดยตัวแปร P_n , e_x และ e_y ตามภาพประกอบ 36 (2) พื้นผิวส่วนกลับ S_2 ซึ่งเกิดจากพื้นผิว S_1 แล้วถูกนำมาเป็นส่วนกลับทำให้เกิดเป็นพื้นผิว $S_2(1/P_n, e_x, e_y)$ ตามภาพประกอบ 37 (3) พื้นผิววิบัติ S_3 ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับแรงกระทำตามแนวแกน P_n และโมเมนต์ดัด M_{nx} และ M_{ny} ทำให้เกิดเป็นพื้นผิว S_3 ตามภาพประกอบ 38



ภาพประกอบ 36 พื้นผิวพื้นฐาน S_1



ภาพประกอบ 37 พื้นผิวส่วนกลับ S_2



ภาพประกอบ 38 พื้นผิววิบัติ S_3

ที่มา: (Mahmoud, 2011)

รูปแบบการประเมินกำลังของหน้าตัด

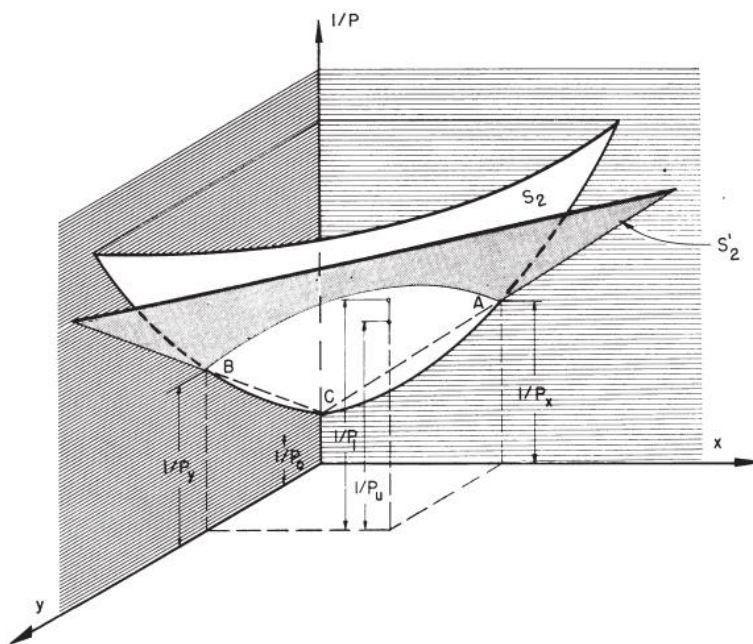
วิธีแรงกระทำส่วนกลับของเบสเลอร์ (Bresler Reciprocal Load Method) วิธีนี้จะเป็นวิธีการวิเคราะห์กำลังของหน้าตัดคล้ายกับพื้นผิวส่วนกลับ $S_2(1/P_n, e_x, e_y)$ จากความคล้ายคลึงนี้ทำให้ได้ว่าจะเกิด $1/P'_n$ บนระนาบของ $S'_2(1/P'_n, e_x, e_y)$ ซึ่งจะถูกกำหนดด้วยจุด A , B และ C ตามภาพประกอบ 39 สำหรับหน้าตัดใดๆ ค่า P_0 (จุด C) คือกำลังภายใต้แรงอัดเพียงอย่างเดียว, P_{0x} (จุด B) และ P_{0y} (จุด A) คือความแข็งแรงภายใต้การเอียงศูนย์ของ e_y และ e_x ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 39

$$\frac{1}{P_n} \approx \frac{1}{P'_n} = \frac{1}{P_{0x}} + \frac{1}{P_{0y}} - \frac{1}{P_0} \quad (46)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

$$P_n = \frac{1}{\frac{1}{P_{0x}} + \frac{1}{P_{0y}} - \frac{1}{P_0}} \quad (47)$$

เมื่อ P_{0x} คือ กำลังรับแรงแกนเดียวสูงสุดของเสาที่เกิดจากโมเมนต์ของ $M_{nx} = P_n e_y$
 P_{0y} คือ กำลังรับแรงแกนเดียวสูงสุดของเสาที่เกิดจากโมเมนต์ของ $M_{ny} = P_n e_x$
 P_0 คือ กำลังรับแรงแกนเดียวสูงสุดเมื่อโมเมนต์มีค่าเป็น 0

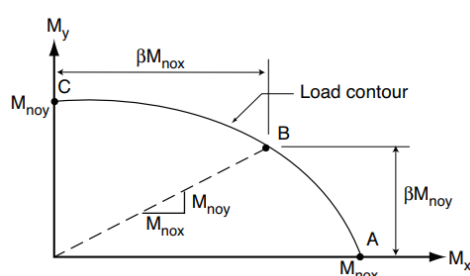


ภาพประกอบ 39 แบบจำลองวิธีแรงกระทำส่วนกลับ

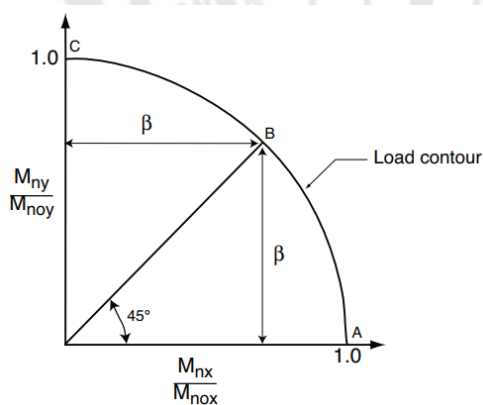
ที่มา: (Mahmoud, 2011)

วิธีเส้นชั้นแรงของพีซีเอ (PCA load contour method) (Mahmoud, 2011) วิธีนี้ได้รับการพัฒนาจาก วิธีเส้นชั้นแรงของเบสเลอร์ Bresler load contour method ที่เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการใช้งานมาก โดยทั่วไปเส้นชั้นความสูงของ P_n ตามภาพประกอบ 40 จะประกอบไปด้วยจุด B คือจุดที่กำหนดกำลังรับแรงดัดสองแกนของหน้าตัด M_{nx} และ M_{ny} ซึ่งจะอยู่ในอัตราส่วนเดียวกับกำลังต้านทานการดัดแกนเดียว M_{nox} และ M_{noy}

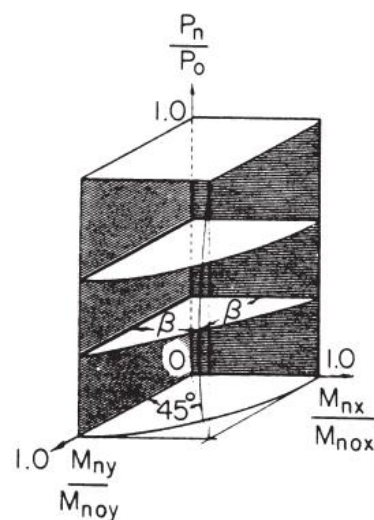
$$\frac{M_{nx}}{M_{ny}} = \frac{M_{nox}}{M_{noy}} \quad (48)$$



ภาพประกอบ 40 เส้นชั้นความสูงของพื้นผิววิบัติ S_3 ตามแนวราบของแรง P_n



ภาพประกอบ 41 เส้นชั้นความสูงของ P_n แบบไร้มิติ



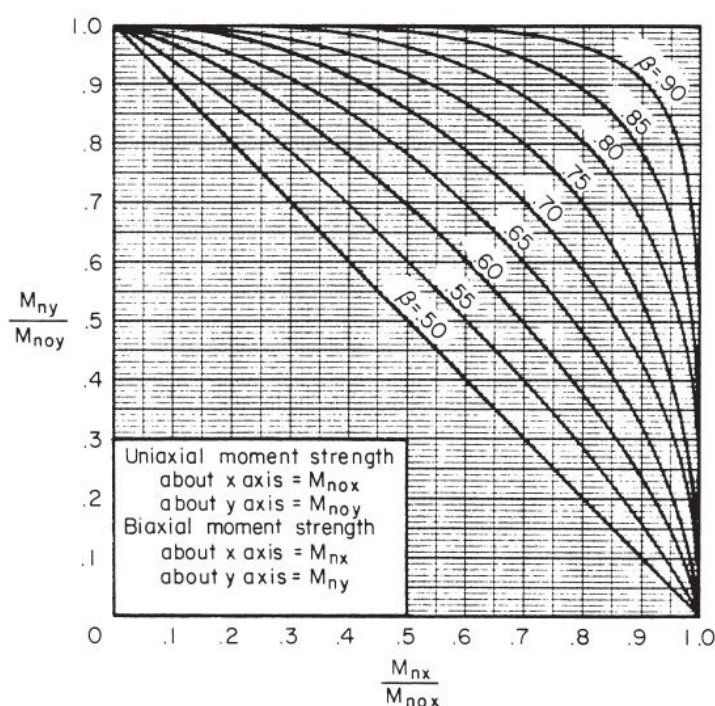
ภาพประกอบ 42 พื้นผิววิบัติ S_4

ที่มา: (Mahmoud, 2011)

เมื่อเส้นชั้นความสูงจากภาพประกอบ 40 ถูกเขียนขึ้นใหม่เป็นความสัมพันธ์แบบไร้มิติตามภาพประกอบ 41 โดยค่า β จะเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนของ P_n / P_0 , M_{nx} / M_{n0x} , M_{ny} / M_{n0y} ทำให้สามารถสร้างพื้นผิววิบัติ S_4 ตามภาพประกอบ 42 ทำให้ได้สมการ (49)

$$\left(\frac{M_{nx}}{M_{nox}} \right)^{\left(\frac{\log 0.5}{\log \beta} \right)} + \left(\frac{M_{ny}}{M_{noy}} \right)^{\left(\frac{\log 0.5}{\log \beta} \right)} = 1.0 \quad (49)$$

ในการออกแบบหน้าตัดค่า β จะถูกกำหนดค่าคงที่ไว้ 9 ค่า ตามภาพประกอบ 43 โดยที่ค่า β จะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.5 เมื่อค่าที่ได้ต่ำกว่าเส้นที่กำหนด และมีค่าเท่ากับ 1.0 เมื่อค่าที่ได้สูงกว่าเส้นกำหนด

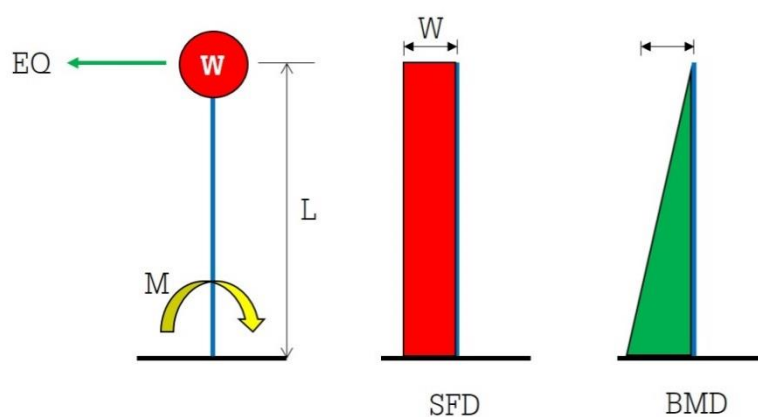


ภาพประกอบ 43 ความสัมพันธ์ของกำลังดัดสองแกน

ที่มา: (Mahmoud, 2011)

การตรวจสอบค่าโมเมนต์ดัดในเสา

โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นต่อเสาสะพานสามารถตรวจสอบได้จากทฤษฎีโครงสร้างของการเกิดโมเมนต์พิจารณาจากแผนภาพอิสระของวัตถุ (free body diagram) ที่เกิดจากแรงที่กระทำต่อเสาสะพาน ดังภาพประกอบ 44



ภาพประกอบ 44 โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหว

จากภาพประกอบ 44 จะสามารถสร้างสมการเพื่อตรวจสอบค่าโมเมนต์ และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อเสาสะพานถูกแรงแผ่นดินไหวกระทำทางด้านข้าง

$$M = EQ \times L \quad (50)$$

$$V = M / L \quad (51)$$

กลไกการต้านทานแรงเฉือน

สำหรับการคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนออกแบบของหน้าตัดเสาสะพาน (ϕV_n) ดังสมการ (52) ใช้แนวคิดของ AASHTO LRFD 2010 ซึ่งจะปฏิสัมพันธ์กับน้ำหนักโครงสร้าง (superstructure) ร่วมกับน้ำหนักบรรทุกทุกจรตามข้อกำหนดการรวมแรงของคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวเรียกว่าแรงอัดตามแนวแกนประลัย (N_u) (ซึ่งจะมีค่าลบเมื่อเป็นแรงอัด และมีค่าบวกเมื่อเป็นแรงดึง) โมเมนต์ดัดประลัย (M_u) และแรงเฉือนประลัย (V_u) โดย

ค่าตัวคูณลดกำลัง (resistance factor) ϕ สำหรับแรงเฉือน AASHTO LRFD 2010 กำหนดไว้เท่ากับ 0.9

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + V_p) \quad (52)$$

โดย V_c คือ กำลังต้านแรงเฉือนที่รับโดยคอนกรีตล้วน
 V_s คือ กำลังต้านแรงเฉือนที่รับโดยเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
 V_p คือ กำลังต้านแรงเฉือนของลวดอัดแรง

กำลังต้านแรงเฉือนจากส่วนของคอนกรีต

ในการหากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตสามารถหาได้หลายมาตรฐานแต่สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้มาตรฐาน AASHTO LRFD 2010 ในการคำนวณค่า V_c เนื่องจากคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวที่งานวิจัยนี้ใช้เป็นแนวทางในการประเมินมีส่วนอ้างอิงจากมาตรฐานดังกล่าว สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V_c = 0.2560\beta\sqrt{f'_c}(b_v d_v) \quad (53)$$

โดยที่ β คือ แฟกเตอร์แสดงความสามารถในการรับแรงดึงในแนวทะแยงของคอนกรีตสำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา

$$\beta = \frac{4.8}{(1 + 750\varepsilon_s)} \quad (54)$$

$$\varepsilon_s = \left[\frac{\left| \frac{M_u}{d_v} \right| + 0.5N_u + |V_u - V_p| - A_{ps}f_{po}}{E_s A_s + E_p A_{ps}} \right] \quad (55)$$

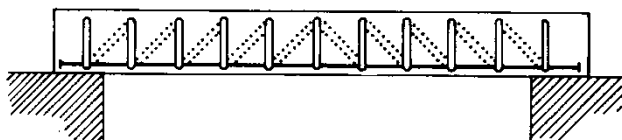
ε_s คือ ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวาง

M_u คือ โมเมนต์ดัดปลาย

V_u	คือ แรงเฉือนประลัย
N_u	คือแรงอัดตามแนวแกนประลัย (ค่าลบเมื่อเป็นแรงอัด และบวกเมื่อเป็นแรงดึง)
A_{ps}	คือ พื้นที่ลวดอัดแรง
f_{po}	คือ กำลังครากของลวดอัดแรง
E_p	คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง

กำลังต้านแรงเฉือนจากส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

แนวคิดของ Ritter จะแยกการรับแรงระหว่างคอนกรีต และเหล็กเสริมรับแรงเฉือน โดยเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะเริ่มทำงานหลังจากที่คอนกรีตไม่สามารถรับแรงได้แล้วกล่าวคือเหล็กเสริมจะเริ่มทำงานเมื่อรอยแตกกว้างทแยงเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยชิ้นส่วนของคอนกรีตที่อยู่ระหว่างรอยแตกกว้างเอียงจะฟอร์มตัวเหมือน แนวอัดเอียง (diagonal compressive strut) ในขณะที่เหล็กเสริมตามขวาง (ซึ่งอยู่ในแนวดิ่ง) จะถูกพิจารณาให้ยุบมารวมกันเป็นกระจุก โดยเรียงตัวกันเป็นระยะที่สม่ำเสมอ และทำหน้าที่เป็นตัวหิ้ว (hanger) สำหรับเหล็กเสริมรับแรงดัดจะทำหน้าที่เป็น คอร์ดล่าง (lower chord) และแนวคอนกรีตที่ยังไม่แตกกว้างด้านบนทำหน้าที่เป็น คอร์ดบน (upper chord) โดยองศาของแนวอัดเอียงจะมีค่าประมาณ 45 องศา ดังนั้นจึงเรียกแบบจำลองของ Ritter ซึ่งอาศัยหลักของ โครงข้อหมุนจำลอง (truss analogy) นี้ว่า the 45° truss model โดยในภาพประกอบ 45

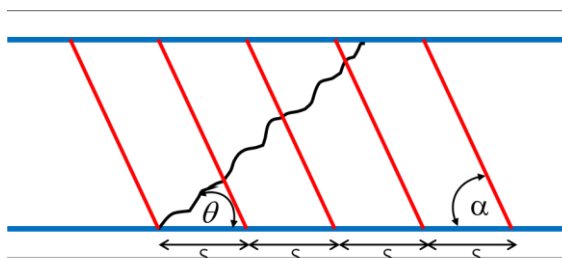


ภาพประกอบ 45 แนวคิด the 45° truss model ของ Ritter W. ในปี ค.ศ.1899

ที่มา : (Collins, 1996)

จากแนวคิดดังกล่าว พิจารณาสองส่วนหนึ่งของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (zone ข้ามมือของภาพประกอบ 45) ที่เสริมทั้งเหล็กเสริมรับแรงดัด และเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ทั้งนี้การวิเคราะห์จะพิจารณาสมการในรูปทั่วไปก่อน ดังนั้นจึงกำหนดให้แนวแรงอัดทแยงทำมุม θ (ไม่ใช่

45 องศา) และแนวเหล็กเสริมตามขวางวางทำมุม α (ไม่ใช่วางในแนวดิ่ง) ดังแสดงในภาพประกอบ 46



ภาพประกอบ 46 การวางเหล็กเสริมรับแรงเฉือน และแนวรอยร้าวจากการเฉือน สำหรับ
พิจารณา V_s

หากสมมติให้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่เอียงทำมุม α หนึ่งเส้นมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A_v และเรียงตัวที่ระยะ s โดยเพิ่มเติมเงื่อนไขไปว่า ขณะเกิดการแตกร้าวอย่างสมบูรณ์ เหล็กเสริมคราก ($f_s = f_{vy}$) ดังนั้นกำลังรับแรงเฉือนในแนวดิ่ง V_s คำนวณได้จากสมมูล ดังต่อไปนี้

$$V_s = N \times A_v \times f_{vy} \times \sin \alpha \quad (56)$$

จากความสัมพันธ์ตรีโกณมิติ จะพิสูจน์ได้ว่า

$$N_s = d(\cot \theta + \cot \alpha) \quad (57)$$

แทนค่า (57) ลงใน (56) จะได้

$$V_s = d(\cot \theta + \cot \alpha) A_v f_{vy} \sin \frac{\alpha}{s} \quad (58)$$

กรณีใช้แนวคิดของ Ritter นั่นคือ $\theta = 45^\circ$ ดังนั้นเขียน (58) ใหม่ เพื่อใช้เป็นสมการ ออกแบบกำลังต้านแรงเฉือนของเหล็กเสริมตามขวางที่วางตัวด้วยมุม α

$$V_s = d(1 + \cot \alpha) A_v f_{vy} \sin \frac{\alpha}{s} \quad (59)$$

กรณีเหล็กเสริมวางตัวในแนวตั้ง นั่นคือ $\cot \alpha = 0$ และ $\sin \alpha = 1$ จะเขียน (59) ใหม่ เพื่อใช้เป็นสมการออกแบบกำลังต้านแรงเฉือนของเหล็กเสริมตามขวางในทางปฏิบัติ

$$V_s = A_v f_{vy} \frac{d}{s} \quad (60)$$

การประเมินผลกระทบของมาตรการออกแบบเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวกับเสาสะพานที่มีอยู่เดิม

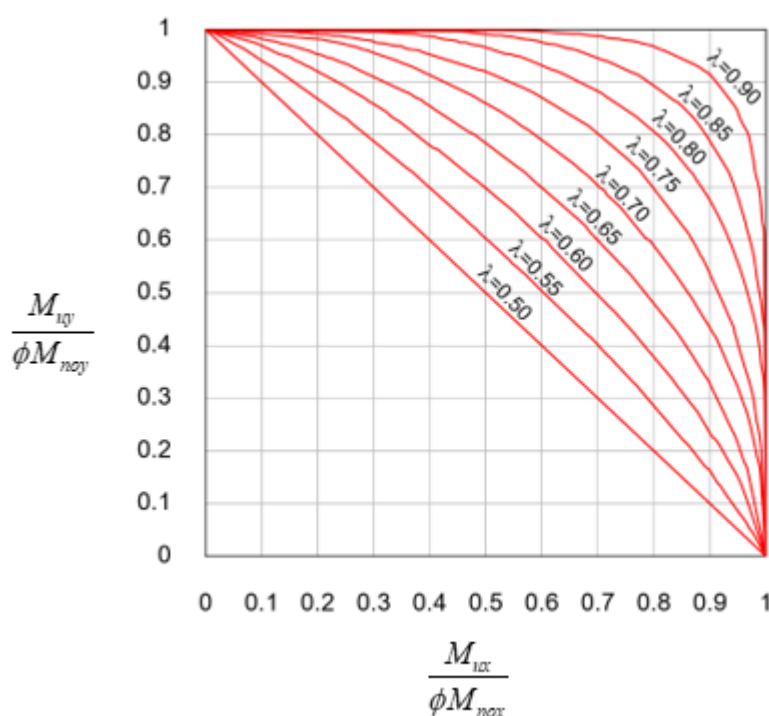
สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการประเมินอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของเสา สะพานเก่าที่ถูกออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2559 และใช้งานอยู่ในปัจจุบันว่ามีสมรรถนะในการต้านทาน การไหวสะเทือนตามคู่มือกำหนดมากน้อยเพียงใด เมื่อกรมทางหลวงได้มีการกำหนดคู่มือการ ออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวในปี พ.ศ. 2559 หลังจากทำการคำนวณแรงตาม แนวแกนประลัย N_u , แรงเฉือนประลัย V_u และโมเมนต์ดัดประลัย M_u ตามข้อกำหนดของคู่มือดัง สมการ (25)-(27) ต่อมาเพื่อทำการคำนวณความต้องการต่อวิสัยความสามารถของหน้าตัด (DCR) จึง จำเป็นต้องคำนวณหาลูกำลังต้านทานแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดของหน้าตัดหรือองค์อาคาร สำหรับ การตรวจสอบอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของโมเมนต์ดัดจะสามารถคำนวณได้หลาย วิธี งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี PCA Load Contour Method (Mahmoud, 2011) ที่มีคำแนะนำดังสมการ (61) โดยหาค่า M_n ของแต่ละแนวแกน x, y จาก M_{nox} และ M_{noy} จากโปรแกรม sp Column และนำมาหาค่าอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถสำหรับโมเมนต์ดัดของแต่ละหน้าตัด ในขณะที่ค่าอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถสำหรับแรงเฉือนจะเป็นไปตามสมการ (62) โดยหาค่า V_u จากสมการ (26) และ ϕV_n จากสมการ (52) จากงานวิจัยในการตรวจสอบสมรรถนะ ของสะพาน (Kim, 1998) ทำให้ทราบว่าหากเกิดแรงกระทำประมาณร้อยละ 80 ของแรงต้านทาน จะทำให้โครงสร้างเกิดการคราก ดังนั้นหากทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า DCR_M และ DCR_V มีค่า มากกว่า 0.80 จะแสดงถึงเสาดั้งสะพานต้นดังกล่าวอาจเกิดความเสียหายได้เมื่อเกิดเหตุการณ์

แผ่นดินไหวที่คาบการสั่นตามที่คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว (กรมทางหลวง, 2559) กำหนด

$$DCR_M = \frac{M_{ux}}{\phi M_{nox}} \left(\frac{\log 0.5}{\log \lambda} \right) + \frac{M_{uy}}{\phi M_{noy}} \left(\frac{\log 0.5}{\log \lambda} \right) \quad (61)$$

$$DCR_V = \frac{V_u}{\phi V_n} \quad (62)$$

โดยที่ค่า λ มีค่าจากอัตราส่วน $\frac{M_u}{\phi M_{no}}$ ของแต่ละแนวแกนดังภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 47 ความสัมพันธ์ความแข็งแรงของเสาที่มีโมเมนต์ดัดสองแกน

เมื่อทำการประเมินความสามารถของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยวที่
สภาวะประลัยเรียบร้อยแล้วจึงทำการประเมินความปลอดภัยของเสาสะพานดังกล่าวด้วย
อัตราส่วนความปลอดภัยของหน้าตัด ณ สภาวะใช้งานของโครงสร้างเสาด้วย V_{SER} และ M_{SER}

ตามสมการ (29), (30) ที่คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวกำหนด โดยการตรวจสอบอัตราส่วนความปลอดภัยสามารถตรวจสอบได้ตามสมการ (63) และ (64)

$$F.S._V = \frac{V_n}{V_{ser}} \quad (63)$$

$$F.S._M = \frac{1}{\frac{M_{ux,ser}}{M_{nox}} \left(\frac{\log 0.5}{\log \lambda} \right) + \frac{M_{uy,ser}}{M_{noy}} \left(\frac{\log 0.5}{\log \lambda} \right)} \quad (64)$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศุภชัย ปัญญาบรรจง และ โสภณัฐ ธรรมสถิร (ศุภชัย, 2560) ได้ทำการศึกษาการประเมินสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอยู่เดิมในประเทศไทย โดยพิจารณารูปแบบการวิบัติ ผลการศึกษาการวิบัติโครงสร้างเสาสะพานประเภทเสาเดี่ยวที่สั้น พบว่าหากมีการวิบัติจะเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนถึงร้อยละ 52 ส่วนเสาสะพานที่เป็นเสายาวจะวิบัติด้วยแรงเฉือนเพียง ร้อยละ 13 แสดงให้เห็นถึงความยาวที่มีผลต่อแรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในเสา และในการศึกษาเป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องช่วงเวลาของมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบของประเทศไทยโดยแบ่งเป็น 3 ช่วงการออกแบบ (1) ก่อนปี พ.ศ. 2540 (2) ระหว่างปี พ.ศ. 2540 ถึง ปี พ.ศ. 2559 และ (3) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 เป็นต้นไป ทำให้ทราบว่าแนวโน้มของการวิบัติแบบเฉือนนั้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 19, 36 และ 50 ตามลำดับเนื่องจากในการออกแบบมุ่งเน้นทำให้กำลังรับแรงดัดสูงขึ้น แต่ในส่วนของกำลังรับแรงเฉือนไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนไปด้วยกัน ทำให้อัตราส่วนการวิบัติแบบเฉือนเพิ่มขึ้นแต่อัตราการวิบัติแบบดัดลดลง

ใหม่ แก้วอุดร, พงศภัค เทพไชย และ ศุภกิตต์ ฤทธิศาสตร์ (ใหม่, 2559) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานจากแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบสะพานในประเทศไทย จากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างในทุกพื้นที่ วิธีเปิดแผนที่ความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวให้ค่ามากที่สุด แต่ในส่วนการคำนวณถึงแรงแผ่นดินไหว ในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงราย และกำแพงเพชร การคำนวณโดยวิธีตามมาตรฐานการออกแบบของคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว กระทรวงคมนาคมจะให้ค่าแรงที่มากที่สุด และในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร และกาญจนบุรี การคำนวณแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีเปิดแผนที่ความเสี่ยงจะให้ค่าที่มากที่สุด ในส่วนของการเสริมเหล็ก พื้นที่เขตกรุงเทพมหานคร วิธีการคำนวณตามมาตรฐานการออกแบบของคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว กระทรวงคมนาคม

จะให้ปริมาณเหล็กเสริมที่มากที่สุด แต่พื้นที่จังหวัดเชียงราย กาญจนบุรี และกำแพงเพชร วิธีเปิดแผ่นที่ความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวจะให้ค่าปริมาณเหล็กเสริมที่มากที่สุด

ทศพล (ทศพล, 2555) ได้ศึกษาแนวทางการประเมินและปรับปรุงสะพานตัวอย่างเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวโดยใช้สะพานที่มีการใช้งานในกรมทางหลวงชนบทมากที่สุดเป็นเงื่อนไขตั้งต้นในการประเมิน โดยใช้สมมติฐานพื้นที่ของสะพานอยู่บริเวณจังหวัดเชียงใหม่ โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่มากระทำกับโครงสร้างคัดเลือกจากชุดคลื่นแผ่นดินไหวขนาดระหว่าง 6.6 ถึง 6.9 มาตราริกเตอร์ ระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด 15 ถึง 30 กิโลเมตร มาวิเคราะห์และประเมินโครงสร้างโดยใช้ขีดจำกัดความปลอดภัยของโครงสร้างอ้างอิงตามมาตรฐาน ASCE41-06 ซึ่งพบว่าสะพานเกิดความเสียหายที่โคนเสาและคานขวางเนื่องจากแรงดัด และได้ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสะพานทั้งหมด 3 รูปแบบ (ก) วิธีพอกเสา (ข) วิธีเสริมค้ำยันทแยง (ค) วิธีเสริมก่อนยางที่ฐานรองรับ โดยมีเพียงวิธีพอกเสาตลอดความยาวเสาเท่านั้นที่สามารถรองรับความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหวได้เมื่อมีแรงกระทำตามทางยาวของสะพานได้

ภาณุวัฒน์ และ อมร (Joyklad, 2009) ได้นำเสนอการประเมินผลการวิบัติของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอยู่ในกรุงเทพฯ และบริเวณที่มีความสูงอยู่ที่ 6-10 เมตร ถึงความเสียหายของโครงสร้าง การเคลื่อนตัว และการวิบัติของโครงสร้างโดยผลการประเมินพบว่าสะพานทั้ง 9 ตัว มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว (μ_A) เท่ากันอยู่ที่ 4.0 โดยผลการประเมินยังแสดงให้เห็นว่าเสาที่รับแรงกดมากจะเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนมากกว่าเสาที่มีแรงกดน้อย

วรากร สิงหสุต (วรากร, 2551) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร และแรงอัดตามแนวแกนคงที่ จำนวน 3 ตัวอย่างสะพาน โดยศึกษาเกี่ยวกับผลของการโอบรัดของเหล็กปลอกที่มีในเสาคู่ต่อการเคลื่อนตัวในแนวแรงด้านข้างที่กระทำต่อเสาสะพาน มีขนาดตัวอย่างเท่ากับ $0.40 \times 0.40 \times 2.15$ เมตร และมีอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมตามยาวเท่ากับ 0.0123 และอัตราส่วนเหล็กเสริมแรงอัดตามแนวแกนเท่ากับ 0.057 ทั้ง 3 ตัวอย่างการทดสอบ แต่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาณเหล็กปลอกเป็น 0.00424, 0.01005 และ 0.01675 ตามลำดับ หรือมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 6.2, 14.8 และ 24.6 ตามลำดับ ของมาตรฐานการออกแบบ AASHTO (2005) โดยเปรียบเสาเป็นตัวแทนของเสาสะพานในประเทศไทย พบว่าค่าความเหนียวมีค่าเท่ากับ 4.7, 5.6 และ 4.9 ตามลำดับ และมีค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเท่ากับ 4.4, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งผลพบว่าผลของการเพิ่มปริมาณการโอบรัดไม่ได้ส่งผลต่อค่าความเหนียวและระยะเคลื่อนตัวสูงสุดอย่างชัดเจนโดยสอดคล้องกับผลงานทดสอบที่พบว่าค่าความเครียดเหล็กปลอกของตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าไม่

ถึงจุดคราก และยังสามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟเบอร์ ซึ่งพบว่าลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับระยะการเคลื่อนที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันในช่วงอัตราการเคลื่อนตัว ร้อยละ 0-2.5

ปรีดา และอมร (Chaimahawan, 2007b) ได้นำเสนอการประเมินผลแผ่นดินไหวเบื้องต้นสำหรับจุดต่อคาน-เสาของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอยู่เดิม โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้วิศวกรได้ประเมินโครงสร้างที่มีอยู่ถึงความสามารถของจุดต่อเสา-คาน ประกอบไปด้วยอัตราส่วนความตึงการต่อวิสัยสามารถ รายละเอียดการเสริมเหล็ก การตรวจสอบรูปแบบการพัง โดยแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกทุกแสดงถึงลักษณะของการพังของโครงสร้างที่มีอยู่ภายใต้มาตรฐานแรงแผ่นดินไหว และการคราก สามารถตรวจสอบรูปแบบการพังในบางชิ้นส่วนขององค์อาคารที่เกิดการครากนั้นๆ และยังได้มีการทดสอบจุดต่อเสา-คานที่ทำขึ้นในห้องปฏิบัติการเพื่อยืนยันถึงวิธีการตรวจสอบดังกล่าวด้วย

ปรีดา และอมร (Chaimahawan, 2007a) ได้มีการนำเสนอการประเมินข้อบกพร่องเมื่อเกิดแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายในกรุงเทพมหานคร ที่มีความสูงปานกลาง 5-15 ชั้น ไม่ว่าจะเป็น โรงเรียน มหาวิทยาลัย สถานที่ราชการ หรือสำนักงาน การประเมินแผ่นดินไหวประกอบด้วยอัตราส่วนความตึงการต่อวิสัยสามารถ การตรวจสอบการเสริมเหล็ก และการตรวจสอบรูปแบบการวิบัติ โดยมีอาคารทั้งหมด 8 อาคารที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งผลของการตรวจสอบทั้ง 8 อาคาร ไม่ได้มีการเสริมเหล็กเพื่อรองรับแผ่นดินไหว 5 อาคาร จาก 8 อาคารมีอัตราส่วนความตึงการต่อวิสัยสามารถไม่เป็นที่น่าพอใจ ร้อยละ 44 คานวิบัติด้วยแรงดัด ร้อยละ 15 คานวิบัติด้วยแรงเฉือน ร้อยละ 41 จุดต่อวิบัติด้วยแรงเฉือน จากผลดังกล่าวเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนมากถึง ร้อยละ 66 ส่วนมากจะเกิดการวิบัติที่คาน

นพพร จัตรชราษฏร์ (นพพร, 2554) ได้ทำการศึกษาการออกแบบสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อด้านแรงแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทยจากผลการศึกษาแรงแผ่นดินไหวที่กระทำตามยาวจะอยู่ในกลุ่มความรุนแรงแผ่นดินไหว SPC B ตามมาตรฐาน AASHTO 1996 ส่วนแนวตามขวางจะเท่ากับกลุ่มความรุนแรงแผ่นดินไหว SPC A ซึ่งมีความรุนแรงที่น้อยกว่า 0.09g แต่ที่ขณะทางภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทยจัดอยู่ในกลุ่มความรุนแรงแผ่นดินไหว SPC C ดังนั้น ในการวิจัยจึงแนะนำให้สะพานในประเทศไทยควรต้องทำการศึกษา และออกแบบสะพานให้มีความทันสมัยอยู่เสมอ ควรให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงเพื่อประสิทธิภาพโดยการพิจารณาตำแหน่งที่ตั้งของสะพาน ลักษณะของชั้นดิน และคุณสมบัติของสะพาน ประกอบการออกแบบ

จากการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าม้งงานวิจัยเกี่ยวกับแผ่นดินไหวที่หลากหลายไม่ว่าจะเป็นงานอาคาร หรืองานสะพาน โดยพบว่ายังไม่ม้งงานวิจัยใดที่ศึกษาอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถ (*DCR*) ของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยวที่มีอยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อผลกระทบที่เกิดจากแผ่นดินไหว เมื่อมีการกำหนดคู่มือการออกแบบสะพานและถนนของกรมทางหลวง เพื่อประเมินสมรรถนะ (*DCR*) และค่าความปลอดภัย (*F.S.*) ของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเสาเดี่ยวในการต้านทานการไหวสะเทือน โดยใช้ค่า *DCR* เป็นดัชนีชี้วัดสมรรถนะของเสาสะพาน ณ สภาวะประลัยของโครงสร้างก่อนที่จะเกิดการวิบัติหากเกิดแรงขนาดตามที่คู่มือกำหนด ก่อนการวิบัติ ถึงเสาสะพานที่มีอยู่ในประเทศไทยก่อนที่จะมีคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหวมีค่าเฉลี่ยของสมรรถนะที่เพียงพอและมั่นคงปลอดภัยต่อการใช้งานที่มีอยู่มากน้อยเพียงใดจำเป็นต้องมีการเสริมกำลังของเสาหรือไม่



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วัสดุอุปกรณ์

1. กฎกระทรวง ฉบับที่ 49 (พ.ศ.2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522
2. กฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2550
3. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1301/1302-61)
4. มาตรฐานการออกแบบสะพานตามมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specification 2010
5. คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว ของกรมทางหลวง พ.ศ.2559

วิธีการดำเนินการ

1. ศึกษาการออกแบบสะพานตามมาตรฐานของ AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2010
2. ศึกษาการออกแบบสะพานตามมาตรฐานของคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว ของกรมทางหลวง
3. ศึกษามาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1301/1302-61)
4. กำหนดพื้นที่การศึกษาเพื่อสร้างขอบเขตในการการศึกษาสะพานในประเทศไทยว่าในแต่ละพื้นที่เสี่ยงที่ได้รับผลกระทบเมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้น โดยแบ่งพื้นที่และจำนวนสะพานเพื่อการศึกษา ดังนี้ บริเวณที่ 1 คือกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 15 สะพาน บริเวณที่ 2 คือภาคเหนือและตะวันตก จำนวน 14 สะพาน แบ่งจากปี พ.ศ. ในการออกแบบเป็น สะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 และสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542 - 2559 ตามตาราง 12 และลักษณะของหน้าตัดเสาสะพานตามตาราง 13 และ 14

ตาราง 12 การจำแนกสะพานที่ทำการวิเคราะห์ตามช่วงเวลาในการออกแบบสะพานของประเทศไทย

บริเวณ	จำนวนสะพานที่ออกแบบก่อน	จำนวนสะพานที่ออกแบบระหว่างปี
	ปี พ.ศ.2541	พ.ศ.2542-2559
1	5	5
2	4	5

5. รวบรวมข้อมูลแบบสะพานที่จะใช้ในการตรวจสอบจากกรมทางหลวง ที่รับผิดชอบในการออกแบบสะพานและเก็บรวบรวมข้อมูลสะพานที่ใช้งานในประเทศไทย

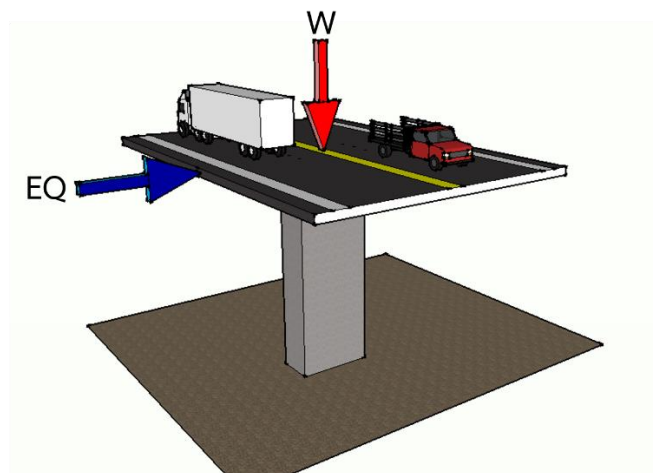
ตาราง 13 รายชื่อสะพานและลักษณะของสะพานในบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล

ลำดับ	ประเภท	รูปแบบหน้าตัดเสา	ปีพ.ศ. ที่ออกแบบ	ช่วงเวลาออกแบบ
1	EW	แปดเหลี่ยม	2535	ก่อน พ.ศ.2541
2	OP	วงกลม	2537	
3	OP	วงกลม	2538	
4	UT	แปดเหลี่ยม	2539	
5	IC	วงกลม	2541	ช่วง พ.ศ.2542 - 2559
6	OP	วงกลม	2542	
7	IC	วงกลม	2543	
8	IC	สี่เหลี่ยม	2555	
9	IC	วงกลม	2549	
10	IC	วงกลม	2558	

ตาราง 14 รายชื่อสะพานและลักษณะของสะพานในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก

ลำดับ	ประเภท	รูปแบบหน้าตัด เสา	ปีพ.ศ. ที่. ออกแบบ	ช่วงเวลา ออกแบบ
1	IC	วงกลม	2537	ก่อน พ.ศ.2541
2	IC	วงกลม	2537	
3	OP	วงรี	2540	
4	IC	วงกลม	2540	
5	IC	สี่เหลี่ยม	2542	ช่วง พ.ศ.2542 - 2559
6	IC	สี่เหลี่ยม	2542	
7	OP	สี่เหลี่ยม	2543	
8	OP	วงกลม	2548	
9	OP	วงกลม	2551	

6. คำนวณหาค่าน้ำหนักโครงสร้างส่วนบนที่กดลงเสาของสะพานเพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบหาแรงในแนวดิ่งที่จะเป็นตัวแทนแรงของน้ำหนักโครงสร้างส่วนบน (superstructure) (ภาพประกอบ 48) โดยคิดแรงกระทำแยกเป็น N_u และ N_{ser} ด้วยสมการ (27) และ (30) ตามการรวมแรงของคู่มือออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหว โดยจะทำการคำนวณเสาดันเดี่ยวและดันสูงของสะพานที่กระทำกับเสาคอม่อในแนวดิ่ง



ภาพประกอบ 48 แรงกระทำจากหน่วยแรงภายนอกที่ส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาตอม่อ

7. คำนวณหาค่าแรงที่กระทำต่อเสาสะพานทางด้านข้างที่เกิดจากแผ่นดินไหว (EQ)

8. วิเคราะห์โมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัดเสาสะพาน (M_u) สมการ (27) ทั้งสองแนวแกนเมื่อมีแรงกระทำในแนวดิ่งคือน้ำหนักจากโครงสร้างและอื่นๆตามข้อกำหนด (N_u) และวิเคราะห์โมเมนต์ดัดใช้งานของหน้าตัดเสาสะพาน (M_{ser}) สมการ (30) ทั้งสองแนวแกนเมื่อมีแรงกระทำในแนวดิ่งคือน้ำหนักจากโครงสร้างและอื่นๆตามข้อกำหนด (N_{ser}) ตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว

9. ทำการวิเคราะห์โมเมนต์ต้านทานของหน้าตัดเสาตอม่อ (M_{no}) ของแต่ละแนวแกน ด้วยโปรแกรม sp Column

10. วิเคราะห์แรงเฉือน corresponding shear force (V) ที่เกิดขึ้นจาก EQ ขณะเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวดังสมการ (26) และ (29)

11. ตรวจสอบค่า V_n จากสมการ (48) ด้วย V_c และ V_s ของโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้วว่ามีค่าอยู่ที่เท่าใดดังสมการ (53) และ (60)

12. ตรวจสอบความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของหน้าตัดจากค่าอัตราส่วนความต้องการต่อความจุของเสาสะพาน demand capacity ratio (DCR) ตามสมการ (61) (62) และ factor safety ($F.S.$) ของหน้าตัดสะพานที่ก่อสร้างตามสมการ (63) และ (64)

13. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นกับวิสัยสมารถการรับแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสองแกนของหน้าตัดเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ประเภทตอม่อเสาเดี่ยวจาก บริเวณที่ 1 และ บริเวณที่ 2 ทั้ง 38 หน้าตัด โดยมีเงื่อนไขของปีที่ทำการออกแบบสะพาน

ที่ออกแบวก่อนปีพ.ศ. 2541 และสะพานที่ออกแบวกว่งปี พ.ศ.2542-2559 ก่อนที่จะมีคู่มือการออกแบวสะพานและถนนเพื่อด้านทานแผ่นดินไหว พ.ศ.2559 ว่าสะพานที่ก่อสร้างภายในประเทศไทยในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวมีค่าอัตราส่วนความต้องการต่อความจุของเสาสะพาน (DCR) และอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่าใด มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน หรือต้องการเสริมกำลังของหน้าตัดเพื่อรองรับแผ่นดินไหวที่อาจจะเกิดขึ้นที่คาบการไวสะเทือนที่ 1,000 ปีตามคู่มือการออกแบวสะพานและถนนเพื่อด้านทานแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงปี พ.ศ.2559 กำหนด



บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

การวิเคราะห์ข้อมูล

จากการวิเคราะห์แรงที่กระทำตามข้อแนะนำของคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงต่อกำลังของหน้าตัดเสาเดี่ยวทั้งต้นเตี้ยและต้นสูง ที่ออกแบบเพื่อก่อสร้างทั้ง 2 บริเวณคือ (ก) บริเวณกรุงเทพและปริมณฑล (ข) บริเวณภาคเหนือและตะวันตก จะได้ผลการวิเคราะห์ (1) อัตราส่วนของปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด ($\rho_l = A_s / bd$) (2) อัตราส่วนแรงอัดตามแนวแกนประลัยต่อความแข็งแรงของหน้าตัด ($\sigma_0 = N_u / A_g f'_c$) (3) อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถของโมเมนต์ดัดสองแกนและแรงเฉือน ($DCR_{M \text{ or } V}$) โดยมีข้อมูลทั่วไปของหน้าตัดแบ่งเป็นพื้นที่บริเวณกรุงเทพและปริมณฑลดังตาราง 16 และบริเวณภาคเหนือและตะวันตกดังตาราง 17

ตาราง 16 ข้อมูลทั่วไปในการวิเคราะห์เสาบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล

ลำดับ	รหัส	พื้นที่ หน้าตัดเสา (A_g , cm. ²)	พื้นที่หน้าตัด เหล็กยื่น (A_s , cm. ²)	พื้นที่หน้าตัด เหล็กปลอก (A_v , cm. ²)	ระยะเรียง เหล็กปลอก (s , cm)	ความสูง เสา (h , m)
1	1SC	18,800.00	369.60	5.40	30.00	5.10
2	1TC	23,800.00	468.16	5.40	30.00	10.00
3	2SC	49,087.39	936.32	4.52	20.00	7.00
4	2TC	70,685.83	1232.00	4.52	20.00	12.50
5	3SC	31,415.93	776.16	2.26	20.00	3.95
6	3TC	38,013.27	776.16	4.52	20.00	10.15
7	4SC	16,181.20	295.68	2.54	30.00	1.55
8	4TC	26,841.00	591.36	3.82	30.00	6.10
9	5SC	25,446.90	591.36	2.26	20.00	4.40

ตาราง 16 (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	พื้นที่ หน้าตัดเสา (A_g , cm. ²)	พื้นที่หน้าตัด เหล็กยื่น (A_s , cm. ²)	พื้นที่หน้าตัด เหล็กปลอก (A_v , cm. ²)	ระยะเรียง เหล็กปลอก (s , cm)	ความสูง เสา (h , m)
10	5TC	49,087.39	1182.72	4.52	20.00	9.05
11	6SC	20,329.10	352.20	6.78	30.00	4.45
12	6TC	20,329.10	500.04	9.04	30.00	9.25
13	7SC	31,415.93	788.48	4.52	20.00	2.20
14	7TC	31,415.93	788.48	4.52	20.00	6.90
15	8SC	31,415.93	591.36	1.27	35.00	2.15
16	8TC	31,415.93	591.36	1.27	35.00	5.95
17	9SC	28,100.00	591.36	4.52	15.00	5.30
18	9TC	37,850.00	862.40	6.79	15.00	9.60
19	10SC	17,671.46	646.80	6.04	20.00	2.15
20	10TC	7,853.98	369.60	6.04	20.00	6.65

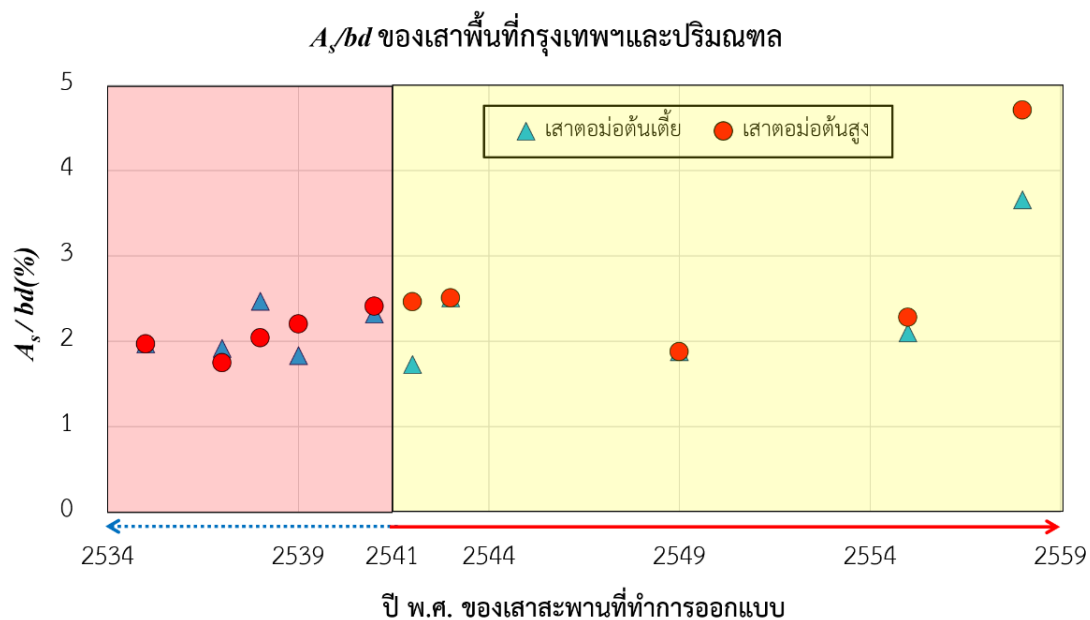
ตาราง 17 ข้อมูลทั่วไปในการวิเคราะห์เสถียรภาพบริเวณภาคเหนือและตะวันตก

ลำดับ	รหัส	พื้นที่ หน้าตัดเสา (A_g , cm. ²)	พื้นที่หน้าตัด เหล็กยื่น (A_s , cm. ²)	พื้นที่หน้าตัด เหล็กปลอก (A_v , cm. ²)	ระยะเรียง เหล็กปลอก (s , cm)	ความสูง เสา (h , m)
1	1SC	31,415.93	517.44	2.26	20.00	3.95
2	1TC	53,092.92	665.28	2.26	20.00	6.65
3	2SC	31,415.93	517.44	2.26	20.00	5.20
4	2TC	31,415.93	517.44	2.26	20.00	9.75
5	3SC	40,346.40	400.50	8.04	30.00	3.50

ตาราง 17 (ต่อ)

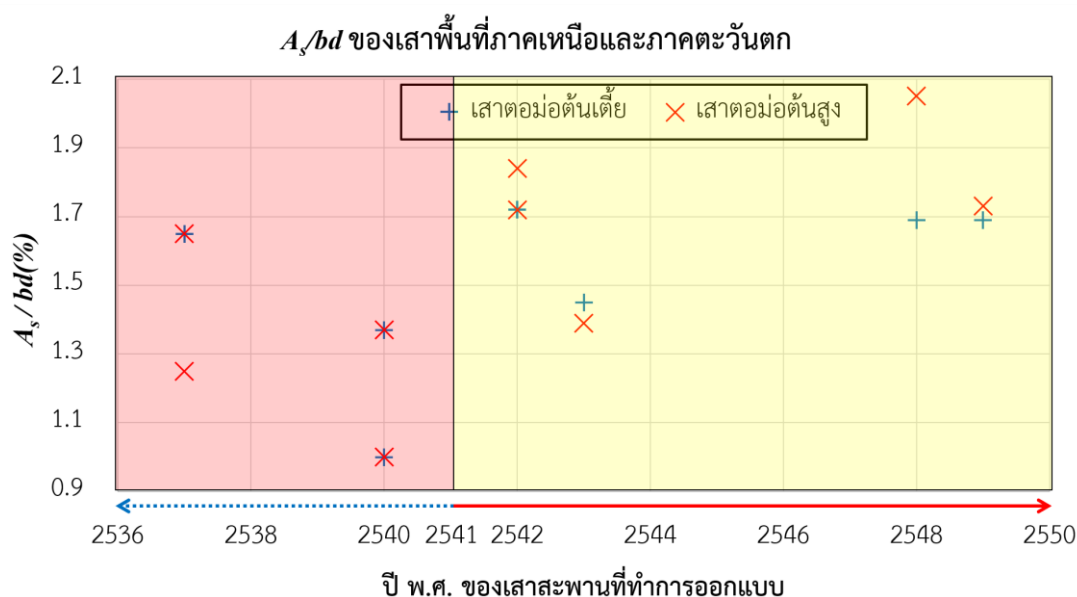
ลำดับ	รหัส	พื้นที่ หน้าตัดเสา (A_g , cm.2)	พื้นที่หน้าตัด เหล็กยื่น (A_s , cm.2)	พื้นที่หน้าตัด เหล็กปลอก (A_v , cm.2)	ระยะเรียง เหล็กปลอก (s , cm)	ความสูง เสา (h , m)
6	3TC	40,346.40	400.50	8.04	30.00	7.55
7	4SC	31,415.93	431.20	2.26	20.00	3.10
8	4TC	31,415.93	431.20	2.26	20.00	10.25
9	5SC	25,800.00	443.52	16.08	15.00	1.55
10	5TC	34,800.00	640.80	16.08	15.00	5.60
11	6SC	25,800.00	443.52	16.08	15.00	1.55
12	6TC	25,800.00	443.52	16.08	15.00	5.60
13	7SC	18,650.00	271.04	4.52	25.00	5.55
14	7TC	24,829.90	344.96	4.52	25.00	7.65
15	8SC	49,087.39	831.60	4.02	15.00	6.65
16	8TC	61,385.80	1256.64	8.04	15.00	8.75
17	9SC	49,087.39	831.60	4.02	15.00	3.10
18	9TC	61,383.90	1059.52	8.04	15.00	8.65

การวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของหน้าตัด



ภาพประกอบ 49 อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด (ρ_l) เสาเดี่ยว บริเวณที่ 1 ต้นตี้ยและต้นสูง

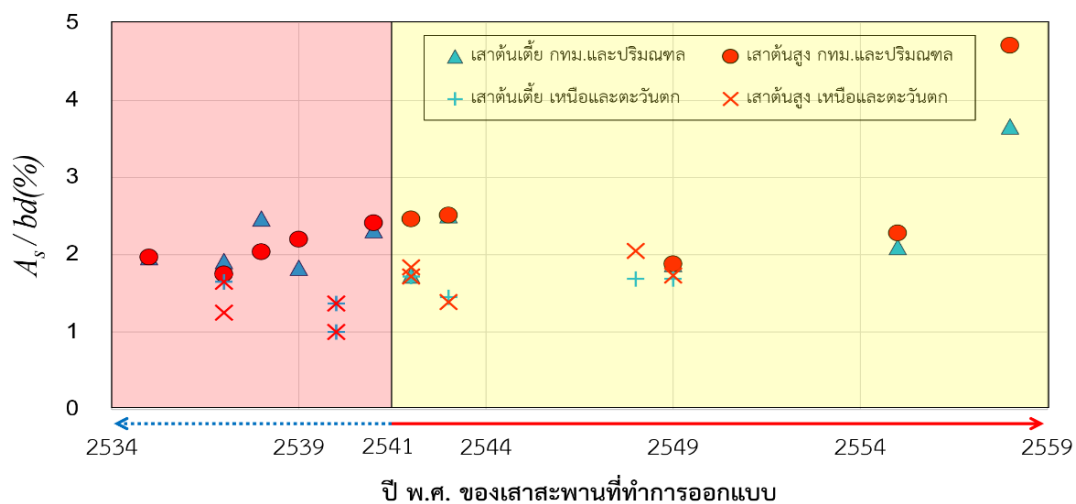
จากภาพประกอบ 49 จะเห็นว่าสะพานบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่ออกแบบก่อน พ.ศ. 2541 มีค่าอยู่ประมาณ 2% ทั้งต้นตี้ยและต้นสูง เช่นเดียวกับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 ก็มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน แต่มีเพียง 1 โครงการที่มีอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดมากกว่าร้อยละ 3 แต่ทั้งต้นตี้ยและต้นสูงจำนวน 38 เสาจะมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบ 50 อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด (ρ_l) เสาตอม่อเดี่ยว บริเวณที่ 2 ต้นเดียว และต้นสูง

จากภาพประกอบ 50 ผลการวิเคราะห์แสดงถึงปริมาณเหล็กเสริมหลักต่อพื้นที่หน้าตัดของสะพานบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 มีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 1 แต่ไม่เกินร้อยละ 2 โดยที่ต้นเดียวและต้นสูงมีค่าที่เท่ากันถึง 3 สะพานบ่งบอกถึงในการออกแบบสะพานของบริเวณภาคเหนือในช่วงก่อนปี พ.ศ. 2541 ผู้ออกแบบมักจะออกแบบให้เสาสะพานทั้งต้นเดียวและต้นสูงมีขนาดและลักษณะของการเสริมเหล็กเหมือนกัน และมีหนึ่งสะพานที่เสาดต้นเดียวไปสอดคล้องเหมือนกับเสาสะพานในสะพานอื่น 1 สะพาน และสำหรับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 นั้นก็ยังคงมีปริมาณเหล็กเสริมหลักต่อพื้นที่หน้าตัดเสาน้อยที่สุดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 1 และไม่เกินร้อยละ 2 เช่นเดียวกับสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 แต่จะสังเกตเห็นว่าสำหรับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 นั้นจะมีความแตกต่างสำหรับต้นเดียวและต้นสูงอยู่เล็กน้อยแสดงถึงการออกแบบของสะพานที่มีความแตกต่างกันเมื่อมีความยาวของเสาเข้ามาเกี่ยวข้องมิได้ใช้รูปแบบหน้าตัดเหมือนกันทั้งสะพานตามที่เคยออกแบบสะพานก่อนปี พ.ศ. 2541 ดังเดิม

A_s / bd ของเสาเปรียบเทียบระหว่างบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล
เปรียบเทียบกับภาคเหนือและภาคตะวันตก



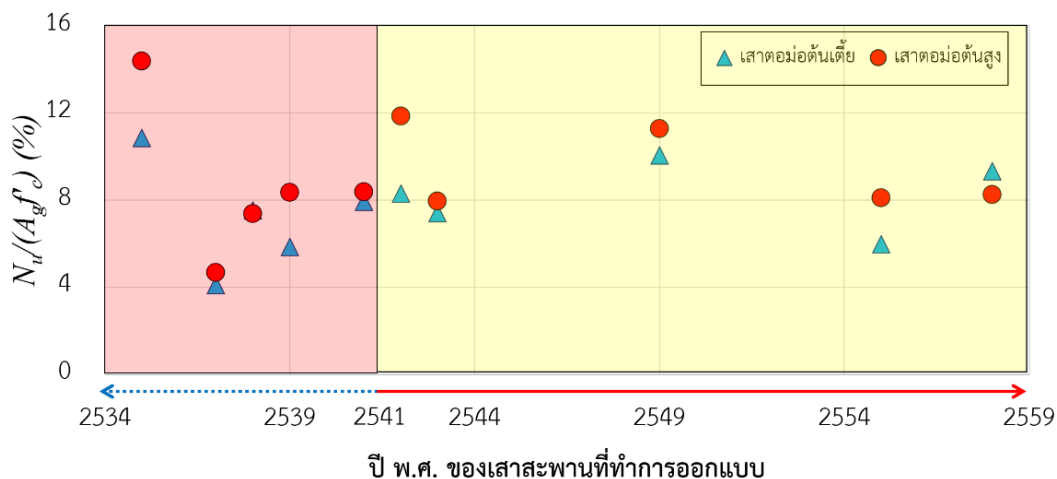
ภาพประกอบ 51 อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด (ρ_l) เสาตอม่อเดี่ยว บริเวณที่ 1 และ 2 ตื้นเตี้ย และตื้นสูง

ตาราง 18 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อหน้าตัดเสาสะพาน (ρ_l)

บริเวณ	ช่วงปีพ.ศ.ออกแบบ.	ตื้นเตี้ย	ตื้นสูง	ค่าเฉลี่ย
กรุงเทพมหานครและปริมณฑล	ก่อนปี พ.ศ.2541	2.10	2.07	2.09
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	2.38	2.77	2.57
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	2.24	2.42	2.33
ภาคเหนือและตะวันตก	ก่อนปี พ.ศ.2541	1.42	1.32	1.37
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	1.65	1.75	1.70
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	1.54	1.55	1.55
ทั้งสองบริเวณรวมกัน	ก่อนปี พ.ศ.2541	1.80	1.74	1.77
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	2.02	2.26	2.14
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	1.91	2.01	1.96

จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดของเสา ρ_l พบว่า ρ_l ของเสาบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล และบริเวณภาคเหนือและตะวันตกในส่วนของต้นเดียวกับต้นสูง ตั้งแต่อดีตจนถึง พ.ศ. 2555 มีค่าใกล้เคียงกัน มีเพียงสะพานโครงการเดียวที่มี ρ_l แตกต่างจากสะพานทั้งหมด ดังภาพประกอบ 51 โดยคู่มือกำหนดไว้ให้ค่า ρ_l จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 แต่ไม่เกินร้อยละ 4 ซึ่งพบว่ามีเสาด้านสูง จำนวน 1 ต้นที่มีค่าสูงกว่าข้อกำหนด โดยความเหนียวของโครงสร้างขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการแต่ตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุดคือค่าอัตราส่วนเหล็กเสริม (ภาณุวัฒน์, 2558) ดังนั้นสะพานต้นสูงดังกล่าวอาจมีความเหนียวของโครงสร้างที่ต่ำกว่าที่คู่มือกำหนด และหากเปรียบเทียบระหว่างเสาทั้ง 2 พื้นที่ จะพบว่าค่า ρ_l ในบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลจะมีค่ามากกว่าบริเวณภาคเหนือและตะวันตกดังตาราง 18 ทั้งนี้ค่า ρ_l แสดงถึงการควบคุมการวิบัติของหน้าตัดหากค่า ρ_l มีค่าที่สูงจะส่งผลให้หน้าตัดอาจเกิดการวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลัก เนื่องจากการวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลักหน้าตัดจะมีกำลังที่มากแต่จะมีความเหนียวของโครงสร้างลดลงซึ่งเป็นพฤติกรรมที่อันตราย ดังนั้นคู่มือจึงควบคุมไม่ให้ค่า ρ_l มีค่าเกินกว่าร้อยละ 4 แต่ถ้าหากมีค่าน้อยจะส่งผลให้ขนาดของหน้าตัดมีความใหญ่เกินไป ดังนั้นสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลจะมีความแข็งแรงในการรับแรงอัดตามแนวแกนของหน้าตัดที่สามารถรับกำลังได้มากแต่อาจเกิดความเสียหายได้ง่ายและอันตรายมากกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกที่มีความเหนียวของเสาสะพานมากกว่า และผลการวิเคราะห์การออกแบบสะพานตามช่วงเวลาการออกแบบ 2 ช่วงเวลาคือการออกแบบสะพานก่อนปี พ.ศ.2541 และช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 พบว่า ρ_l มีแนวโน้มสูงมากขึ้นจึงทำให้สะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 มีความเหนียวที่มากกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 แต่อย่างไรก็ดีจากผลการวิเคราะห์ ρ_l ภาพรวมทั้งหมดจะพบว่าในการออกแบบเสาสะพานไม่ว่าจะเป็นการออกแบบก่อน พ.ศ. 2541 หรือสะพานที่ออกแบบช่วง พ.ศ.2542-2559 ส่วนมากมีค่าที่ใกล้เคียงเฉลี่ยแล้วทั้ง 38 ต้นมีค่าร้อยละ 1.96 (ตาราง 18) ซึ่งอยู่ประมาณช่วงกลางของค่าตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวกำหนด (กรมทางหลวง, 2559) อย่างเหมาะสมและแสดงให้เห็นถึงการออกแบบตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการเลือกวิธีการออกแบบหน้าตัดที่ไม่ได้มีการเสริมเหล็กยื่นที่แตกต่างกัน

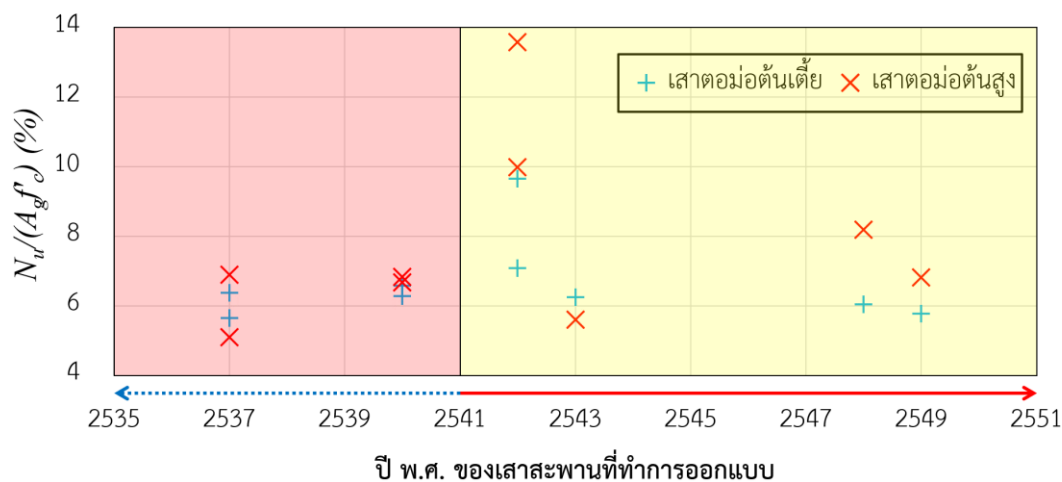
อัตราส่วนแรงกระทำต่อความแข็งแรงของหน้าตัดเสา ของพื้นที่กรุงเทพฯ
และปริมณฑล



ภาพประกอบ 52 อัตราส่วนแรงกระทำต่อความแข็งแรงของหน้าตัด (σ_0) เสาตอม่อเดี่ยว
บริเวณที่ 1 ต้นสั้น และต้นยาว

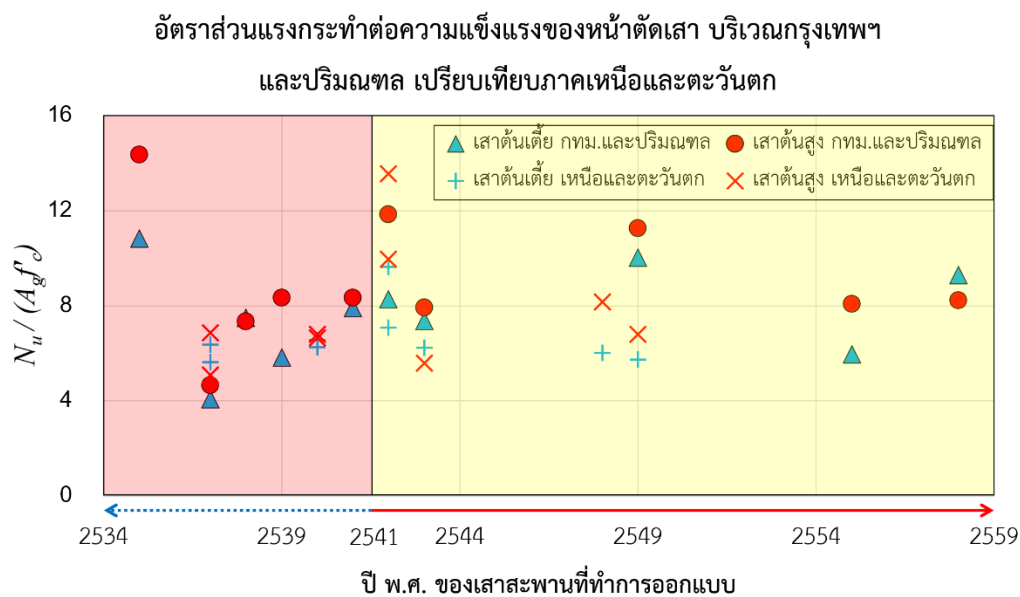
ภาพประกอบ 52 แสดงถึงอัตราส่วนแรงกระทำตามแนวแกนต่อความแข็งแรงของหน้าตัดของเสาสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล โดยสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 จะมีค่า σ_0 น้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 4 แต่ไม่เกินร้อยละ 15 โดยเสาต้นตี้ยจะมีค่าร้อยละของ σ_0 น้อยกว่าต้นสูงเสมอ และสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 นั้นจะพบว่ามีค่าความแตกต่างของ σ_0 ที่น้อยกว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 ซึ่งพบว่ามีค่า σ_0 ที่น้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 6 แต่ไม่เกินร้อยละ 12 แต่สำหรับต้นตี้ยยังคงมีค่า σ_0 ที่น้อยกว่าต้นสูงเสมอ แต่สำหรับการออกแบบสะพานทั้งก่อนปี พ.ศ. 2541 และสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 ยังคงมีค่าเฉลี่ยของ σ_0 ที่ใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมาก

อัตราส่วนแรงกระทำต่อความแข็งแรงของหน้าตัดเสา ของเสาบริเวณภาคเหนือ
และตะวันตก



ภาพประกอบ 53 อัตราส่วนแรงกระทำต่อความแข็งแรงของหน้าตัด (σ_0) เสาตอม่อเดียว
บริเวณที่ 2 ต้นเดียว และต้นสูง

ภาพประกอบ 53 แสดงถึงอัตราส่วนแรงกระทำตามแนวแกนต่อความแข็งแรงของหน้าตัดของเสาสะพานบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก โดยสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 จะมีค่า σ_0 น้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 5 แต่ไม่เกินร้อยละ 7 โดยส่วนมากเสาต้นเดียวจะมีค่าร้อยละของ σ_0 น้อยกว่าต้นสูงมีเพียง 1 สะพานที่มีค่าร้อยละของ σ_0 ในต้นสูงที่น้อยกว่าต้นเดียวแต่ก็ไม่ได้แตกต่างกันมาก สำหรับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 นั้นจะพบว่ามีค่าความแตกต่างของ σ_0 ที่มากกว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 ซึ่งพบว่ามีค่า σ_0 ที่น้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 5 แต่ไม่เกินร้อยละ 14 โดยส่วนมากต้นเดียวยังคงมีค่า σ_0 ที่น้อยกว่าต้นสูงมีเพียง 1 สะพานที่ต้นเดียวมีค่าร้อยละของ σ_0 มากกว่าต้นสูงแต่ก็ไม่ได้แตกต่างกันมาก แต่สำหรับการออกแบบสะพานทั้งก่อนปี พ.ศ. 2541 และสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 ยังคงมีค่าเฉลี่ยของ σ_0 ที่ใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมาก แต่พบว่ามีสะพานบางหน้าตัดที่ค่า σ_0 มีค่าสูงและห่างจากค่าเฉลี่ยไปอยู่ที่ร้อยละ 14



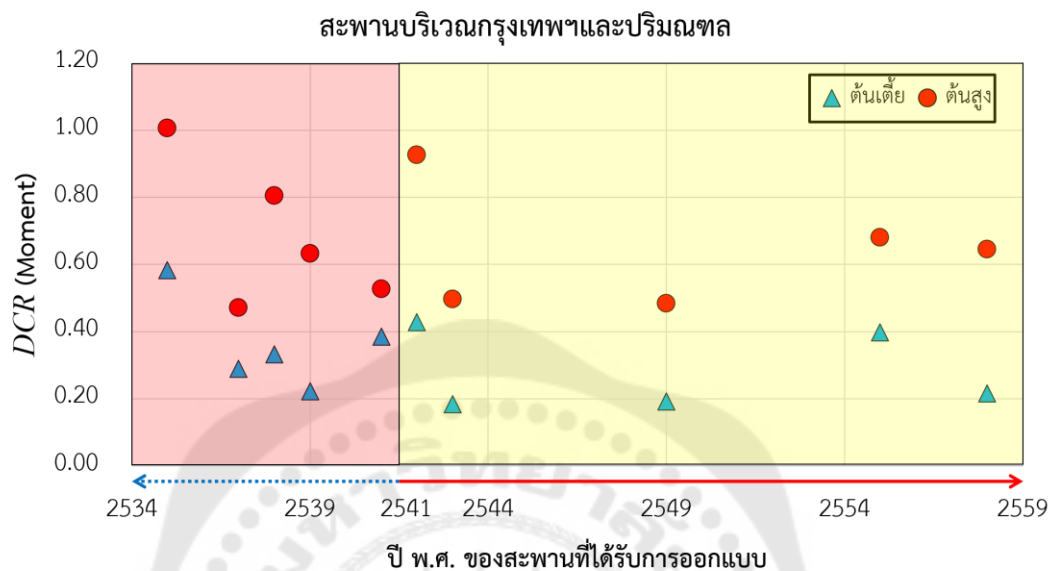
ภาพประกอบ 54 อัตราส่วนแรงกระทำต่อความแข็งแรงของหน้าตัด (σ_0) เสาตอม่อเดี่ยว
บริเวณที่ 1 และ 2 ตันเตี้ย และตันสูง

ตาราง 19 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงอัดตามแนวแกนประลัยต่อความแข็งแรงของหน้าตัด σ_0

บริเวณ	ช่วงปีพ.ศ.ออกแบบ.	ตันเตี้ย	ตันสูง	ค่าเฉลี่ย
กรุงเทพมหานครและ ปริมณฑล	ก่อนปี พ.ศ.2541	7.25	8.63	7.94
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	8.21	9.49	8.85
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	7.73	9.06	8.39
เหนือและตะวันตก	ก่อนปี พ.ศ.2541	6.22	6.38	6.30
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	6.96	8.83	7.90
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	6.63	7.74	7.19
ทั้งสองบริเวณรวมกัน	ก่อนปี พ.ศ.2541	6.79	7.63	7.21
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	7.58	9.16	8.37
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	7.21	8.43	7.82

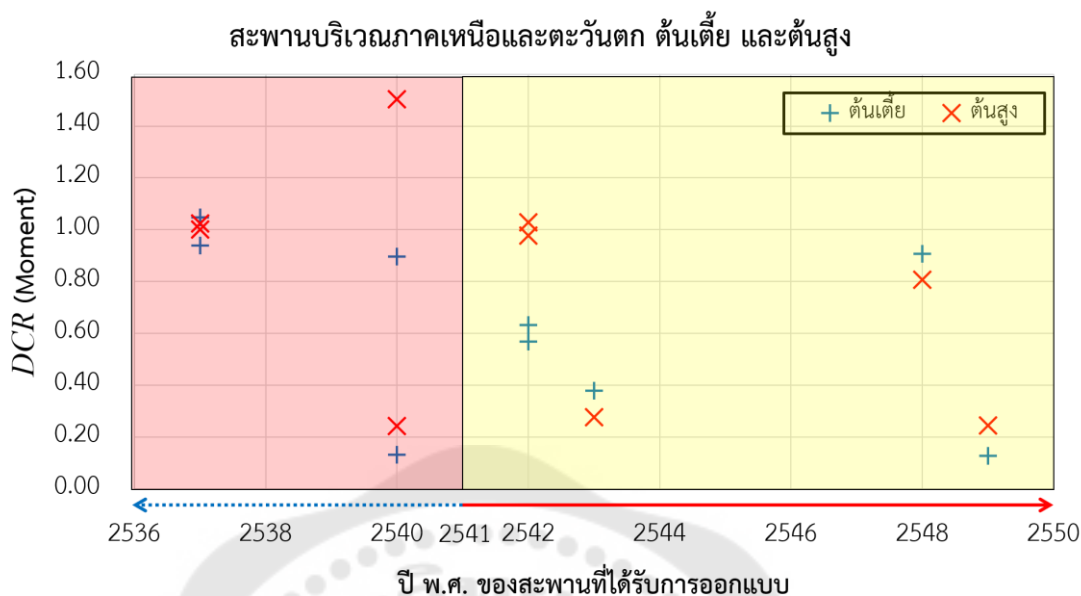
อัตราส่วนแรงอัดกระทำต่อความแข็งแรงของหน้าตัด σ_0 คือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเทียบกับกำลังของหน้าตัด จากผลการวิเคราะห์พบว่าเสาสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล (ภาพประกอบ 52) และบริเวณภาคเหนือและตะวันตก (ภาพประกอบ 53) ทั้ง 2 บริเวณมีค่า σ_0 ของต้นสูงมากกว่าต้นเตี้ยแสดงถึงการใช้งานกำลังของหน้าตัดในการรับแรงอัดที่สูงกว่าต้นเตี้ยดังภาพรวมของสองพื้นที่ในภาพประกอบ 54 หากนำทั้ง 2 บริเวณมาเปรียบเทียบกันจะพบว่า σ_0 ของเสาสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลจะมีค่า σ_0 เท่ากับ 8.39 มากกว่าบริเวณภาคเหนือและตะวันตกที่มีค่า 7.19 (ตาราง 19) แสดงว่าเสาสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลมีการใช้งานกำลังของหน้าตัดที่สูงกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก และหากพิจารณาถึงช่วงเวลาในการออกแบบที่แตกต่างกันจะพบว่าการออกแบบของสะพานทั้ง 2 บริเวณ สะพานที่ออกแบบก่อน พ.ศ.2541 มีค่า σ_0 เท่ากับ 7.21 น้อยกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 ที่มีค่า 8.37 ซึ่งแสดงถึงการออกแบบสะพานช่วงก่อนปีพ.ศ. 2541 จะออกแบบให้ใช้กำลังของหน้าตัดในการรับแรงอัดที่น้อยกว่าที่น้อยกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 แต่จากผลการวิเคราะห์แรงอัดกระทำตามแนวแกนบนหน้าตัดทั้งหมด 38 หน้าตัดพบว่ามีความเฉลี่ยน้อยกว่าร้อยละ 10 ของกำลังหน้าตัดแสดงให้เห็นถึงองค์อาคารหรือเสาที่นำมาวิเคราะห์มีพฤติกรรมเป็นลักษณะของคานซึ่งหมายถึงองค์อาคารที่รับแรงดัดเป็นหลักและมีแรงอัดกระทำบนหน้าตัดแต่ไม่เกิน $0.1f'_cA_g$ (ภาณุวัฒน์, 2558)

การวิเคราะห์อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถของหน้าตัดเสาตอม่อ



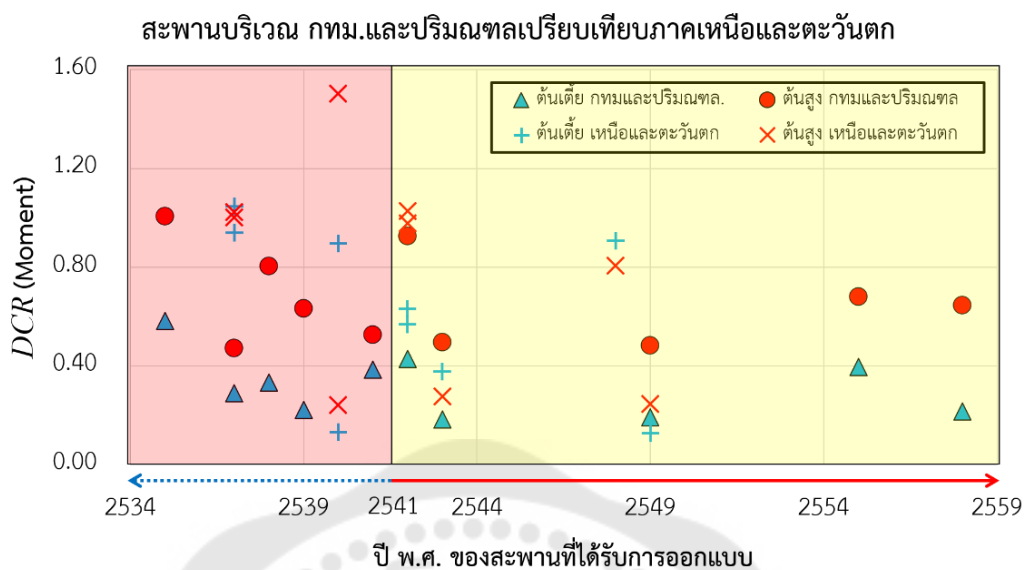
ภาพประกอบ 55 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถโมเมนต์ดัดสองแกน (DCR_M) เสาตอม่อเดี่ยว บริเวณที่ 1 ตื้นเตี้ย และตื้นสูง

ภาพประกอบ 55 แสดงถึงอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถของโมเมนต์ดัดเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยวบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล พบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 จะมีค่า DCR_M ของเสาดันเตี้ยกระจายอยู่ตั้งแต่ประมาณ 0.2 ถึง 0.6 และตื้นสูงมีค่าประมาณน้อยที่สุดอยู่ที่ 0.5 ถึง 1.0 โดยจะพบว่าเสาดันเตี้ยจะมีค่า DCR_M ที่น้อยกว่าตื้นสูงเสมอ และสำหรับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 นั้นจะมีค่า DCR_M ของเสาดันเตี้ยอยู่ตั้งแต่ประมาณ 0.2 ถึง 0.4 และตื้นสูงมีค่าประมาณตั้งแต่ 0.5 ถึง 0.9 และยังพบว่าเสาดันเตี้ยจะมีค่า DCR_M ที่น้อยกว่าตื้นสูงเสมอเช่นเดียวกับสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 แต่จะเห็นว่าช่วงความห่างของค่า DCR_M ของสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 จะมีค่าความห่างของ DCR_M ที่น้อยกว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541



ภาพประกอบ 56 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถโมเมนต์ดัดสองแกน (DCR_M) เสาคอมม่อเดียว บริเวณที่ 2 ต้นเตี้ย และต้นสูง

ภาพประกอบ 56 แสดงถึงอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถของโมเมนต์ดัดเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดียวบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก พบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 จะมีค่า DCR_M ของเสาต้นเตี้ยกระจายอยู่ตั้งแต่ประมาณ 0.1 ถึง 1.1 และต้นสูงมีค่าประมาณอยู่ที่ 0.2 ถึง 1.5 โดยจะพบว่าส่วนมากเสาต้นเตี้ยจะมีค่า DCR_M ที่น้อยกว่าต้นสูงแต่มีเพียง 1 สะพานที่เสาต้นเตี้ยมีค่า DCR_M ที่มีค่าสูงกว่าเสาต้นสูงแต่ไม่ได้มีค่าความแตกต่างที่แตกต่างกันมาก และสำหรับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 นั้นพบว่าจะมีค่า DCR_M ของเสาต้นเตี้ยอยู่ตั้งแต่ประมาณ 0.1 ถึง 0.9 และต้นสูงมีค่าประมาณตั้งแต่ 0.3 ถึง 1.1 โดยพบว่าสะพานจำนวน 3 สะพานเสาต้นเตี้ยจะมีค่า DCR_M ที่น้อยกว่าต้นสูง และจะมี 2 สะพานที่เสาต้นเตี้ยมีค่า DCR_M ที่มากกว่าเสาต้นสูง แต่ไม่ได้มีค่าแตกต่างกันมากเช่นเดียวกับสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 และจะพบว่าค่า DCR_M ของสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 จะมีค่าเฉลี่ยที่น้อยกว่า DCR_M ของสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541



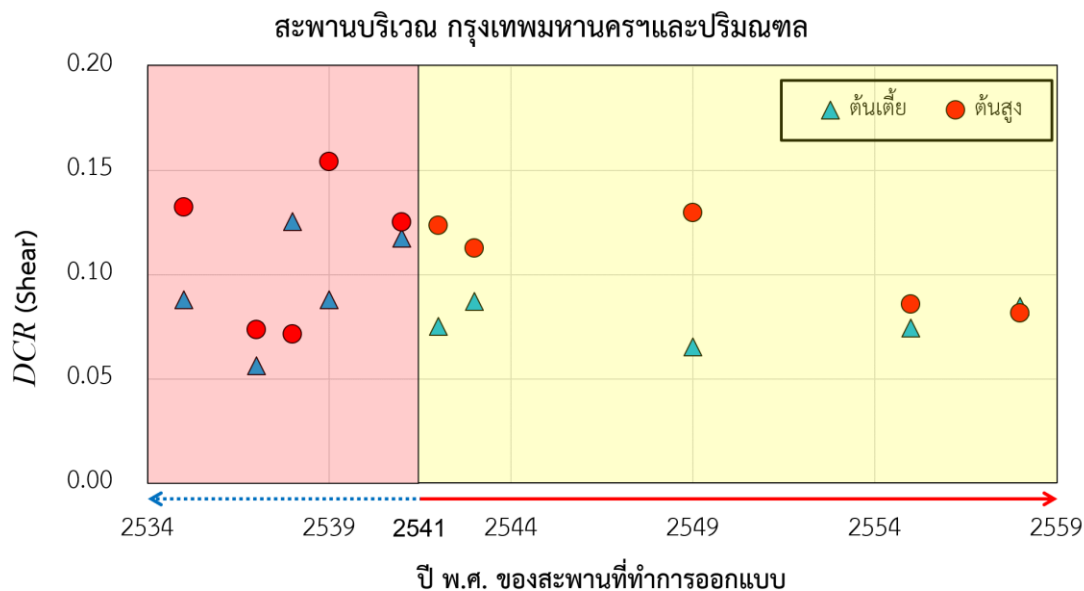
ภาพประกอบ 57 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถโมเมนต์ดัดสองแกน (DCR_M) เสา
ตอม่อเดียว บริเวณที่ 1 และ 2 ต่ำเดียว และต่ำสูง

ตาราง 20 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถของโมเมนต์ดัดสองแกน (DCR_M)

บริเวณ	ช่วงปีพ.ศ. ออกแบบ.	ต่ำ เดียว	ต่ำสูง	ค่าเฉลี่ย
กรุงเทพมหานครและ ปริมณฑล	ก่อนปี พ.ศ.2541	0.36	0.69	0.53
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	0.28	0.65	0.46
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	0.32	0.67	0.50
เหนือและตะวันตก	ก่อนปี พ.ศ.2541	0.75	0.94	0.85
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	0.52	0.67	0.60
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	0.63	0.79	0.71
ทั้งสองบริเวณรวมกัน	ก่อนปี พ.ศ.2541	0.54	0.80	0.67
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	0.40	0.66	0.53
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	0.47	0.73	0.60

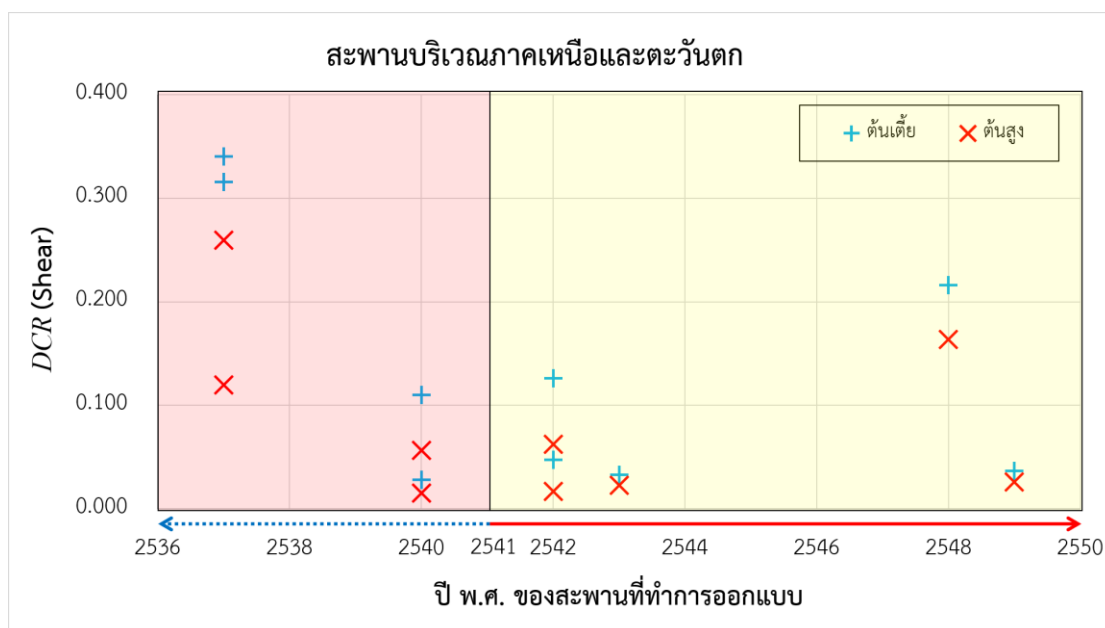
จากผลการวิเคราะห์ DCR_M สะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลของต้นสูงจะมีค่าเฉลี่ย มากกว่าต้นเตี้ย (ภาพประกอบ 55) เช่นเดียวกับสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก ที่ต้นสูงก็มีค่า DCR_M ของโมเมนต์เฉลี่ย มากกว่าต้นเตี้ย (ภาพประกอบ 56) เนื่องจากต้นสูงจะถูกโมเมนต์กระทำเนื่องจากความยาวของเสา โดยค่า DCR_M บริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลจะมีค่าเฉลี่ยที่ต่ำกว่าบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก (ภาพประกอบ 57) แสดงถึงสมรรถนะในการต้านทานโมเมนต์ดัดสองแกนของเสาสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลที่ดีกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก เมื่อคำนึงถึงช่วงเวลาของการออกแบบค่าเฉลี่ย DCR_M ทั้ง 2 บริเวณพบว่าเสาสะพานต้นเตี้ยและต้นสูงที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 จะมีค่ามากกว่าเสาสะพานต้นเตี้ยและต้นสูงที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 จากผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาแสดงถึงค่า DCR_M ของโมเมนต์ดัดสองแกน เสาสะพานต้นสูงที่มีค่าสูงกว่าต้นเตี้ยเสมอ เมื่อนำสะพานทั้ง 2 ช่วงเวลาที่มีการกำหนดแรงกระทำที่แตกต่างกันมาเปรียบเทียบกันด้วยคู่มือการออกแบบสะพานและถนนแสดงถึงสมรรถนะในการต้านทานโมเมนต์ดัดของสะพานที่ออกแบบช่วงปีพ.ศ. 2542-2559 จะดีกว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 ที่มีค่า DCR_M สูงดังภาพประกอบ 57 และตาราง 20 โดยพบว่าสะพานบริเวณภาคเหนือมีค่า DCR_M ของสะพานที่ออกแบบก่อน พ.ศ.2541 มีค่าเฉลี่ยมากกว่า 0.80 ซึ่งอาจเกิดจากในช่วงเวลาดังกล่าวยังไม่มีข้อบังคับของการกำหนดให้สะพานต้องมีการคำนวณแรงของแผ่นดินไหว จึงส่งผลให้สะพานมีค่าเฉลี่ย DCR_M ที่สูงถึง 0.85 ดังตาราง 20 แต่สำหรับการออกแบบสะพานในช่วงปีพ.ศ.2542 – 2559 จะพบว่าค่า DCR_M โดยส่วนมากจะมีค่าน้อยกว่า 0.80 แต่ก็จะมีเพียงไม่กี่สะพานที่มีค่า DCR_M มากกว่า 0.80 อาจเป็นผลเนื่องมาจากไม่ได้มีการบังคับใช้มาตรฐานการออกแบบทำให้วิศวกรผู้ออกแบบยังคงใช้มาตรฐานเก่าช่วงการออกแบบก่อน พ.ศ.2541 ที่ยังคำนึงถึงแรงแผ่นดินไหวไม่มากพอเป็นมาตรฐานในการคำนวณแต่ยังคงมีค่าเฉลี่ยของ DCR_M ในการออกแบบช่วงปีพ.ศ.2542 – 2559 เท่ากับ 0.60 ซึ่งมีสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวได้ เพราะฉะนั้นจากผลการวิเคราะห์พบว่าสะพานในประเทศไทยส่วนใหญ่มีความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดสองแกนที่เกิดจากแผ่นดินไหวได้ แต่จะมีสะพานต้นสูงบริเวณภาคเหนือของไทย และสะพานต้นสูงบางตัวของกรุงเทพฯและปริมณฑล ที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 ที่ควรต้องมีการเฝ้าระวังหรือเสริมกำลังเพื่อให้มีสมรรถนะที่เพียงพอต่อการต้านทานแผ่นดินไหว เมื่อใช้เกณฑ์ข้อแนะนำตามของคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวปี พ.ศ.2559 เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบสะพาน แต่ถ้าหากต้องการค่าที่มีความแม่นยำมากขึ้นควรนำโครงสร้างนั้นๆที่ต้องการตรวจสอบค่า DCR_M

ที่เกินค่าที่ยอมรับได้สามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้ด้วยระเบียบวิธีแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear analysis) เพื่อช่วยในการตัดสินใจถึงการเสริมกำลังของเสาสะพานต้นนั้นๆ



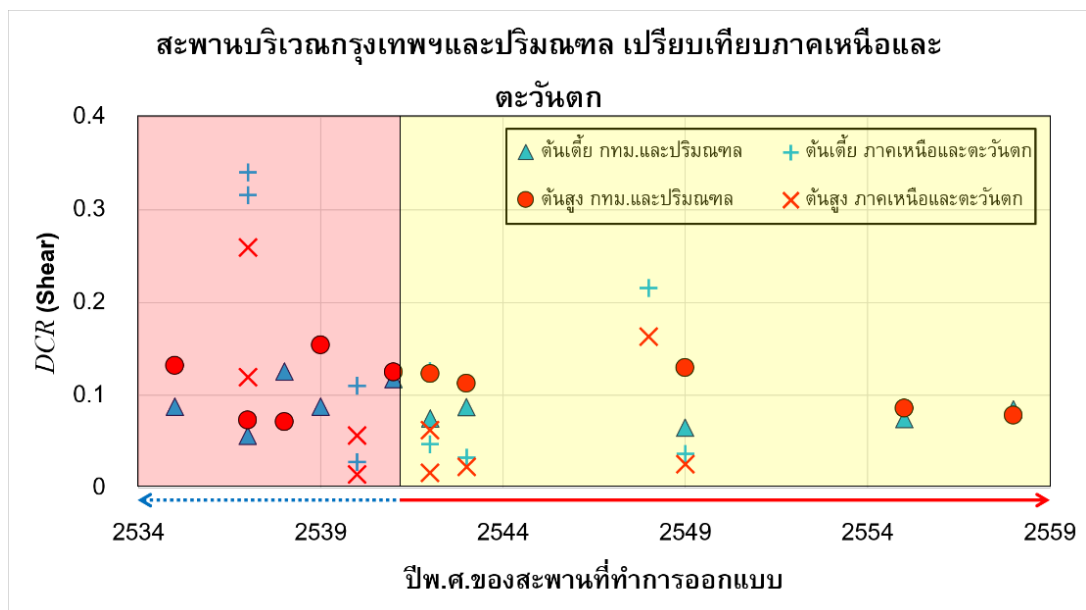
ภาพประกอบ 58 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถแรงเฉือน (DCR_v) เสาตอม่อเดี่ยว บริเวณที่ 1 ต้นเตี้ย และต้นสูง

ภาพประกอบ 58 แสดงถึงอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถของแรงเฉือนสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยวบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล พบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 จะมีค่า DCR_v ของเสาด้านเตี้ยกระจายอยู่ตั้งแต่ประมาณ 0.06 ถึง 0.13 และต้นสูงมีค่าประมาณอยู่ที่ 0.08 ถึง 0.16 โดยจะพบว่าส่วนมากเสาด้านเตี้ยจะมีค่า DCR_v ที่น้อยกว่าต้นสูง แต่มีเพียง 1 สะพานที่เสาด้านเตี้ยค่าของ DCR_v สูงกว่าเสาด้านสูง และสำหรับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 นั้นพบว่าจะมีค่า DCR_v ของเสาด้านเตี้ยอยู่ตั้งแต่ประมาณ 0.07 ถึง 0.09 และต้นสูงมีค่าประมาณตั้งแต่ 0.08 ถึง 0.13 โดยเสาด้านเตี้ยจะมีค่า DCR_v ที่น้อยกว่าต้นสูงเสมอ และจะพบว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 จะมีค่าความห่างของ DCR_v ที่น้อยกว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 แต่ถือว่ามีค่า DCR_v ที่เกิดขึ้นกับเสาสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลนั้นมีค่าน้อยมาก



ภาพประกอบ 59 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถแรงเฉือน (DCR_V) เสาคอม่อเดี่ยว บริเวณที่ 2 ต้นเตี้ย และต้นสูง

ภาพประกอบ 59 แสดงถึงอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถของแรงเฉือนสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยวบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก พบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 จะมีค่า DCR_V ของเสาต้นเตี้ยกระจายอยู่ตั้งแต่ประมาณ 0.03 ถึง 0.35 และต้นสูงมีค่าประมาณอยู่ที่ 0.02 ถึง 0.26 โดยจะพบว่าเสาต้นเตี้ยจะมีค่า DCR_V ที่มากกว่าต้นสูงเสมอ และสำหรับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 นั้นพบว่าจะมีค่า DCR_V ของเสาต้นเตี้ยอยู่ตั้งแต่ประมาณ 0.03 ถึง 0.21 และต้นสูงมีค่าประมาณตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.17 โดยเสาต้นเตี้ยจะมีค่า DCR_V ที่มากกว่าต้นสูงเสมอ และจะพบว่าสะพานที่ออกแบบทั้ง 2 ช่วงเวลาคือการออกแบบสะพานก่อนปี พ.ศ. 2541 และการออกแบบสะพานช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 มีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน และถือว่าค่า DCR_V ที่เกิดขึ้นกับสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกมีค่าน้อยมาก

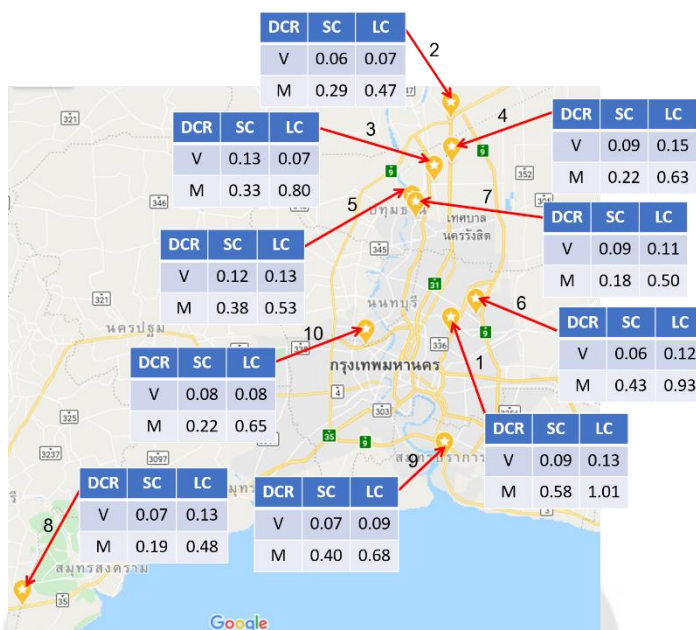


ภาพประกอบ 60 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถแรงเฉือน (DCR_V) เสาตอม่อเดี่ยว บริเวณที่ 1 และ 2 ตันเตี้ย และตันสูง

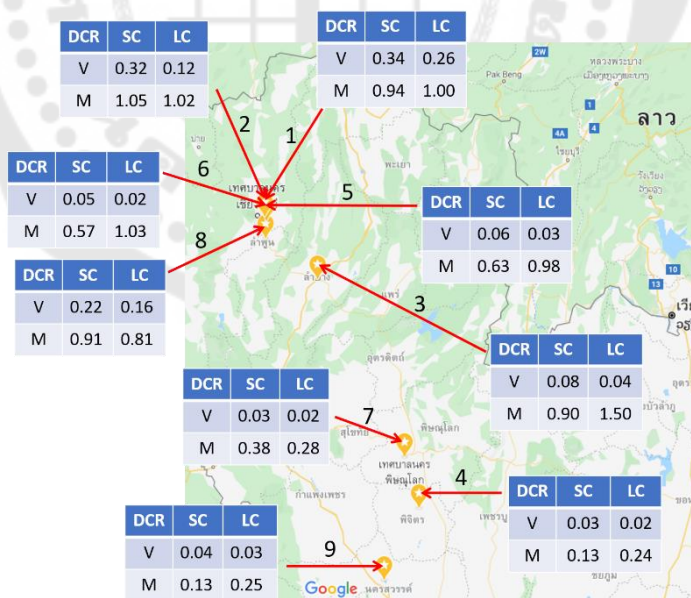
ตาราง 21 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถของแรงเฉือน (DCR_V)

บริเวณ	ช่วงปีพ.ศ.ออกแบบ.	ตันเตี้ย	ตันสูง	ค่าเฉลี่ย
กรุงเทพมหานครและ ปริมณฑล	ก่อนปี พ.ศ.2541	0.10	0.11	0.10
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	0.08	0.11	0.09
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	0.09	0.11	0.10
เหนือและตะวันตก	ก่อนปี พ.ศ.2541	0.19	0.11	0.15
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	0.08	0.05	0.07
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	0.13	0.08	0.10
ทั้งสองบริเวณรวมกัน	ก่อนปี พ.ศ.2541	0.14	0.11	0.12
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	0.08	0.08	0.08
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	0.11	0.09	0.10

DCR_V สำหรับสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลพบว่าต้นสูงมีค่าเฉลี่ย DCR_V มากกว่าต้นเตี้ย (ภาพประกอบ 58) ตรงข้ามกับกับสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกที่ต้นสูงมีค่าเฉลี่ย DCR_V ของแรงเฉือนน้อยกว่าต้นเตี้ย (ภาพประกอบ 59) แต่สำหรับทั้ง 2 บริเวณ แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย DCR_V จะมีค่าใกล้เคียงกัน (ภาพประกอบ 60) โดยจะมีค่าเท่ากันที่ 0.10 ดังตาราง 21 เมื่อพิจารณาค่า DCR_V ของสะพานตามช่วงเวลาการออกแบบจะพบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 มีสมรรถนะในการต้านทานแรงเฉือนที่ดีกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 และเมื่อพิจารณาสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลก่อนปี พ.ศ.2541 จะพบว่ามีสมรรถนะในการต้านทานแรงเฉือนได้ดีกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกก่อนปี พ.ศ.2541 แต่สะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 จะมีสมรรถนะในการต้านทานแรงเฉือนที่ดีกว่าสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าเสาสะพานทั้ง 2 บริเวณ ถึงแม้จะมีค่าเฉลี่ย DCR_V ต่างกันบ้างเล็กน้อยแต่อย่างไรก็ตามค่า DCR_V ที่ปรากฏมีค่าต่ำมาก จากค่าเฉลี่ยของสองพื้นที่เพียง 0.10 เมื่อเทียบกับ DCR_M ที่มีค่าเฉลี่ยของสองพื้นที่ถึง 0.60 เพราะฉะนั้นจากค่า DCR_V ที่น้อยกว่า DCR_M ถึง 0.50 ผู้วิจัยจึงถือว่าสะพานที่ก่อสร้างในประเทศไทยเพื่อต้านแผ่นดินไหวจึงไม่มีความน่าวิตกต่อการเสียหายจากการเฉือนพัง การผลการวิเคราะห์ DCR_V ที่มีค่าน้อยอาจเกิดจากข้อมูลที่แสดงก่อนหน้าในภาพประกอบ 54 ที่แสดงถึงอัตราส่วน $N_u / f_c' A_g$ ของเสาทั้ง 38 เสามีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าร้อยละ 10 ซึ่งส่งผลให้เสามีพฤติกรรมเป็นคานที่ต้องรับโมเมนต์ดัดเป็นส่วนมากและมีแรงอัดตามแนวแกนประมาณไม่เกินร้อยละ 10



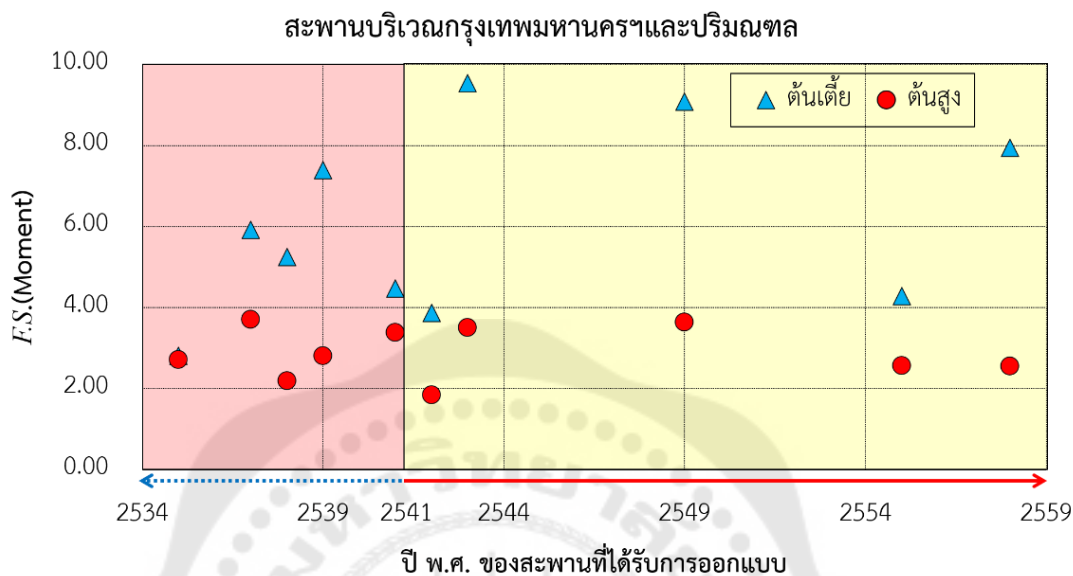
ภาพประกอบ 61 ที่ตั้งและอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถ (DCR) ของแรงเหวี่ยง และ
โมเมนต์ดัด เสาสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล



ภาพประกอบ 62 ที่ตั้งและอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถ (DCR) ของแรงเหวี่ยง และ
โมเมนต์ดัด เสาสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก

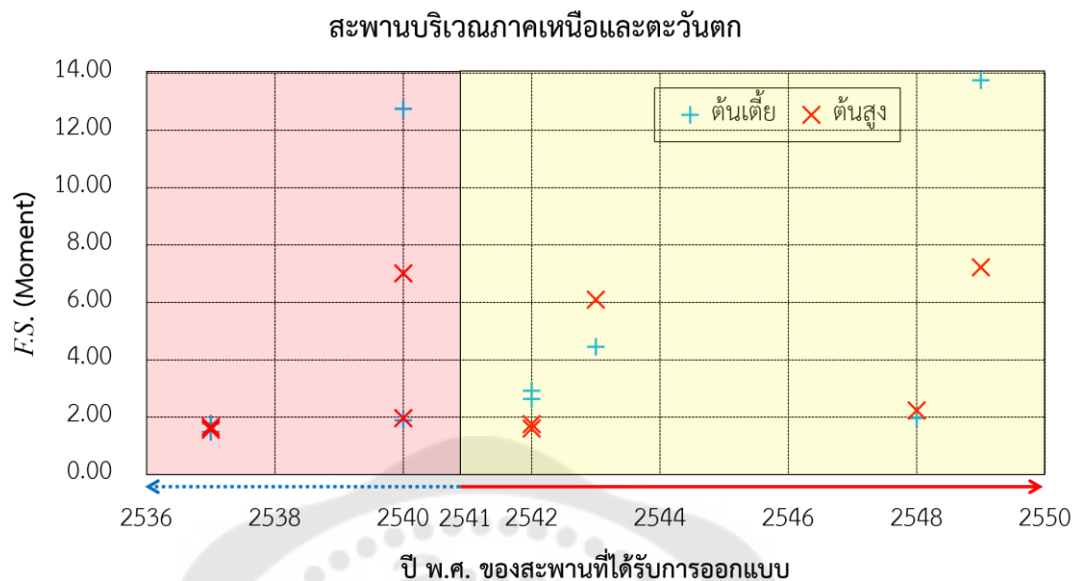
ภาพประกอบ 61 แสดงถึงตำแหน่งที่ตั้งของสะพานที่ถูกประเมินทั้ง 10 สะพานบริเวณ กรุงเทพฯและปริมณฑล โดย V คือค่า DCR_V , M คือค่า DCR_M , SC คือเสาต้นเดี่ยว และ LC คือเสาต้นสูง จะเห็นว่าเสาสะพานที่อยู่ในจังหวัดกรุงเทพฯและปทุมธานีจะมีค่า DCR_M ที่สูงกว่าจังหวัดปริมณฑลอื่นๆที่มีข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งจังหวัดที่อยู่ไกลออกไปจากจังหวัด กรุงเทพฯ อย่างจังหวัดสมุทรสาครและสมุทรสงครามจะมีค่า DCR_M ที่น้อยกว่าจังหวัดอื่นๆซึ่งถือว่าไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว ภาพประกอบ 62 แสดงถึงตำแหน่งที่ตั้งของสะพานที่ถูกประเมินทั้ง 9 สะพานบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกจะเห็นว่าเสาสะพานที่อยู่ในบริเวณตั้งแต่จังหวัดลำปางขึ้นไปทางเหนือของประเทศจะมี DCR_M ของเสาต้นสูงมีค่ามากกว่า 0.80 ซึ่งแสดงถึงสมรรถนะของเสาเมื่อเกิดแผ่นดินไหวขนาดคาบการสั่นตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหว เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทตอม่อเสาเดี่ยวอาจได้รับความเสียหายบ้าง แต่สะพานที่ตั้งอยู่ถัดลงมาทางใต้ของจังหวัดลำปางจะพบว่าสะพานยังคงมีความปลอดภัยและมีค่า DCR ของโมเมนต์ดัดสองแกนและแรงเฉือนที่ต่ำซึ่งแสดงถึงสมรรถนะที่ดีในการต้านเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว

การวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย



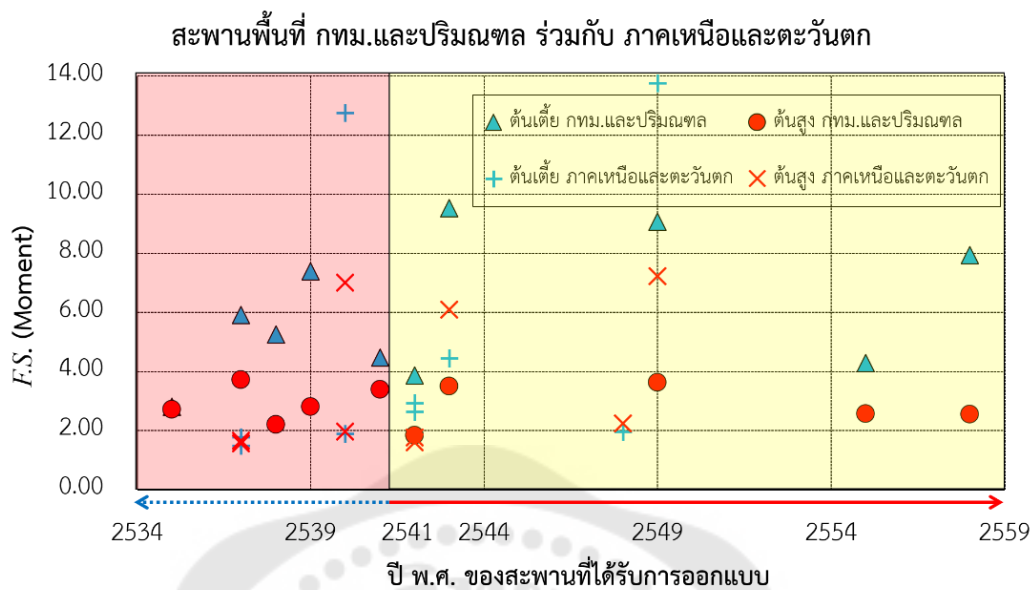
ภาพประกอบ 63 อัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัด ($F.S._M$) เสาสะพานบริเวณที่ 1 ต้นเตี้ยและต้นสูง

ภาพประกอบ 63 แสดงถึงอัตราส่วนความปลอดภัยของเสาต่อโมเมนต์ดัด ณ สภาวะใช้งานของโครงสร้างเสาสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล การวิเคราะห์พบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 มีค่า $F.S._M$ ต้นเตี้ยอยู่ที่ประมาณ 4.2 ถึง 7.5 และต้นสูงอยู่ที่ประมาณ 2.1 ถึง 3.9 โดยที่ต้นเตี้ยจะมีความปลอดภัยเนื่องจากการดัดพั้งที่มีกว่าต้นสูง สำหรับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 พบว่ามีค่า $F.S._M$ ของต้นเตี้ยอยู่ที่ประมาณ 3.9 ถึง 9.5 และต้นสูงอยู่ที่ประมาณ 1.9 ถึง 3.9 และค่าความปลอดภัยของต้นเตี้ยยังคงมากกว่าต้นสูงเช่นเดียวกับสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 และยังพบว่าเสาดต้นสูงทั้ง 2 ช่วงระยะเวลาการออกแบบทั้งออกแบบก่อน พ.ศ. 2541 และออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 มีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งสองช่วงเวลา



ภาพประกอบ 64 อัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัด ($F.S._M$) เสายสะพานบริเวณที่ 2 ต้นเตี้ยและต้นสูง

ภาพประกอบ 64 แสดงถึงอัตราส่วนความปลอดภัยของเสาค้ำโมเมนต์ดัด ณ สภาวะใช้งานของโครงสร้างเสายสะพานบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก การวิเคราะห์พบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 มีค่า $F.S._M$ ต้นเตี้ยอยู่ที่ประมาณ 1.9 ถึง 12.6 และต้นสูงอยู่ที่ประมาณ 1.9 ถึง 7.0 โดยที่ต้นเตี้ยและต้นสูงมีค่าความปลอดภัยเนื่องจากการดัดพ้องที่ใกล้เคียงกัน มีเพียง 1 สะพานที่ต้นเตี้ยมีค่า $F.S._M$ ที่มากกว่าต้นสูง สำหรับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2550 พบว่ามีค่า $F.S._M$ ของต้นเตี้ยอยู่ที่ประมาณ 2.0 ถึง 13.8 และต้นสูงอยู่ที่ประมาณ 1.9 ถึง 7.0 และมีสะพานจำนวน 3 สะพานที่ค่า $F.S._M$ ของต้นเตี้ยมากกว่าต้นสูง



ภาพประกอบ 65 อัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัด ($F.S._M$) เสาคานบริเวณที่ 1 และ 2 ดันเดี่ยวและดันสูง

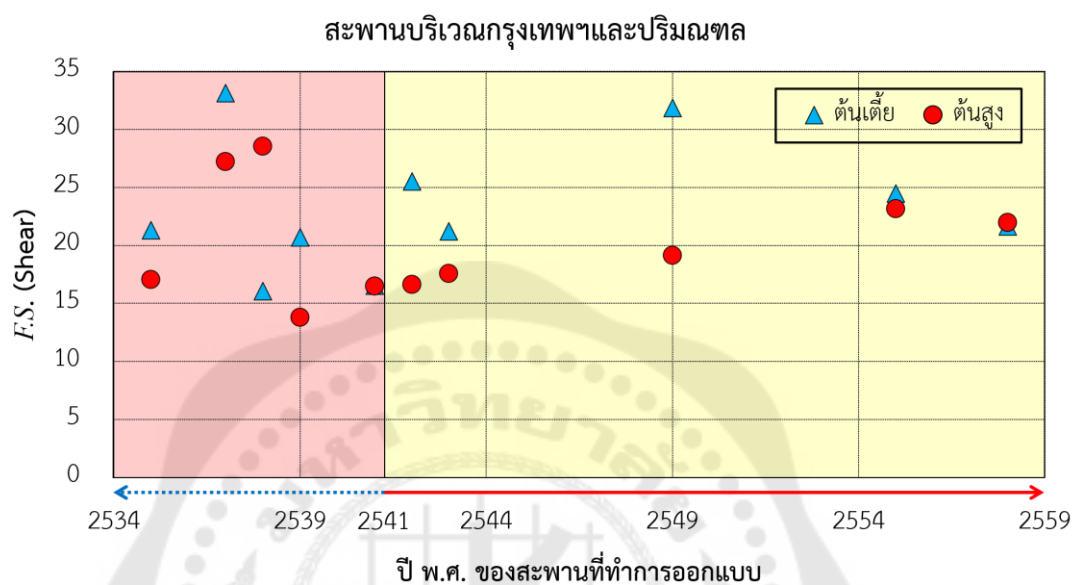
ตาราง 22 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความปลอดภัยต่อโมเมนต์ดัด $F.S._M$

บริเวณ	ช่วงปีพ.ศ.ออกแบบ.	ดันเดี่ยว	ดันสูง	ค่าเฉลี่ย
กรุงเทพมหานครและ ปริมณฑล	ก่อนปี พ.ศ.2541	5.17	2.97	4.07
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	6.94	2.82	4.88
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	6.05	2.89	4.47
เหนือและตะวันตก	ก่อนปี พ.ศ.2541	4.48	3.05	3.76
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	5.14	3.79	4.46
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	4.85	3.46	4.15
ทั้งสองบริเวณรวมกัน	ก่อนปี พ.ศ.2541	4.86	3.00	3.93
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	6.04	3.30	4.67
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	5.48	3.16	4.32

อัตราส่วนความปลอดภัยคือค่าความปลอดภัยของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยวเมื่อเกิดการไหวสะเทือน ณ สภาวะใช้งานของโครงสร้าง โดยอัตราส่วนความปลอดภัยนี้ควรมีค่ามากกว่า 1.00 ตามอัตราส่วนของความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระทำ จะถือว่าสะพานดังกล่าวมีความปลอดภัยหากเกิดการไหวสะเทือนขึ้น จากผลการวิเคราะห์สะพานทั้ง 19 สะพาน พบว่า ณ สภาวะใช้งานโครงสร้างขณะเกิดแผ่นดินไหว สะพานที่ทำการวิเคราะห์มีความมั่นคงแข็งแรงและปลอดภัยต่อการวิบัติของโมเมนต์ดัดทุกสะพานที่ทำการวิเคราะห์ โดยที่เสาสะพานทั้งบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล (ภาพประกอบที่ 63) และบริเวณภาคเหนือและตะวันตก (ภาพประกอบที่ 64) เมื่อทำการเปรียบเทียบทั้งเสาด้านซ้ายจะมีค่าเฉลี่ย $F.S._M$ มากกว่าเสาด้านขวาดังภาพประกอบที่ 65 ซึ่งแสดงถึงความปลอดภัยต่อการดัดของด้านซ้ายที่มากกว่าด้านขวานั้นเอง โดยที่เสาสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลจะมีค่าเฉลี่ยความปลอดภัยของการเกิดโมเมนต์ดัดสูงกว่าเสาสะพานบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความปลอดภัย ณ สภาวะใช้งาน โดยใช้เกณฑ์การออกแบบตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านต้านแผ่นดินไหวเป็นข้อกำหนดจะพบว่าเสาสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล และบริเวณภาคเหนือและตะวันตก ที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 มีค่าความปลอดภัยที่ต่ำกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 และเมื่อรวมทั้ง 2 บริเวณก็ยังคงพบว่าเสาสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 มีค่าเฉลี่ย $F.S._M$ ที่ต่ำกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 ซึ่งถือว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 ณ สภาวะใช้งานปกติจะมีความปลอดภัยที่ไม่สูงเท่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 เช่นเดียวกับค่า DCR_M ที่วิเคราะห์ไว้ก่อนหน้านี้พบว่า ณ สภาวะสุดขีด (extreme event) สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยว ที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 ก็ยังคงมีสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวเมื่อเกิดภาวะสุดขีดได้ดีกว่าเสาสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 ซึ่งความปลอดภัยของสะพานเมื่อเทียบที่สภาวะใช้งานนี้ก็ยังคงเป็นไปในทางเดียวกันกับค่าเฉลี่ยของ DCR_M โดยค่าเฉลี่ยความปลอดภัยของการเกิดโมเมนต์ดัด ($F.S._M$) ทั้ง 19 สะพานจะมีค่าเท่ากับ 4.32 ดังตาราง 22 ซึ่งถือว่ามีความปลอดภัย ณ สภาวะใช้งานเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้นตามสถานที่ต่างๆของประเทศไทย เมื่อวิเคราะห์สะพานที่ถูกก่อสร้างไว้จากคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหว ของกรมทางหลวง

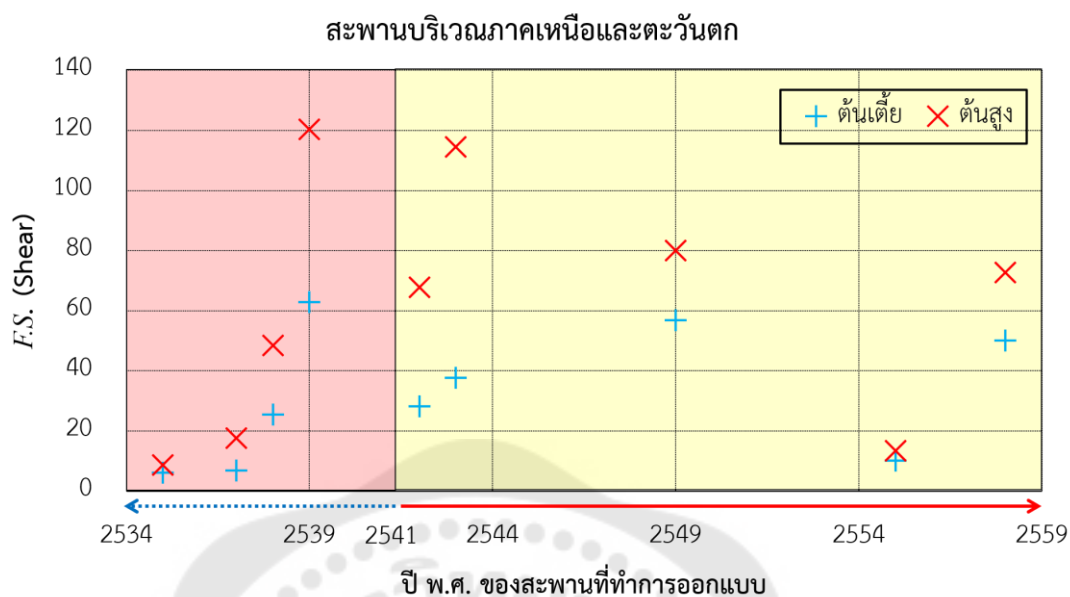
จากผลการวิเคราะห์ในภาพประกอบที่ 52 เนื่องจากเสาสะพานมีพฤติกรรมเป็นคาน ดังนั้นโมเมนต์ที่กระทำต่อเสาสะพานจึงเกิดขึ้นมากและขึ้นอยู่กับความยาวของเสาด้านนั้นๆ โดยในบางโครงการจะพบว่าเสาสะพานถูกออกแบบด้วยเสาที่มีความยาวมากที่สุดและถูกนำรูปแบบนั้นๆมาใช้กับเสาสะพานต้นที่มีความยาวสั้นที่สุดด้วยดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าความปลอดภัยของเสา

สะพานในเรื่องความปลอดภัยต่อการตัดพังของเสาสะพานต้นสั้นมีค่าความปลอดภัยที่มากกว่าเสาสะพานต้นยาวนั่นเอง



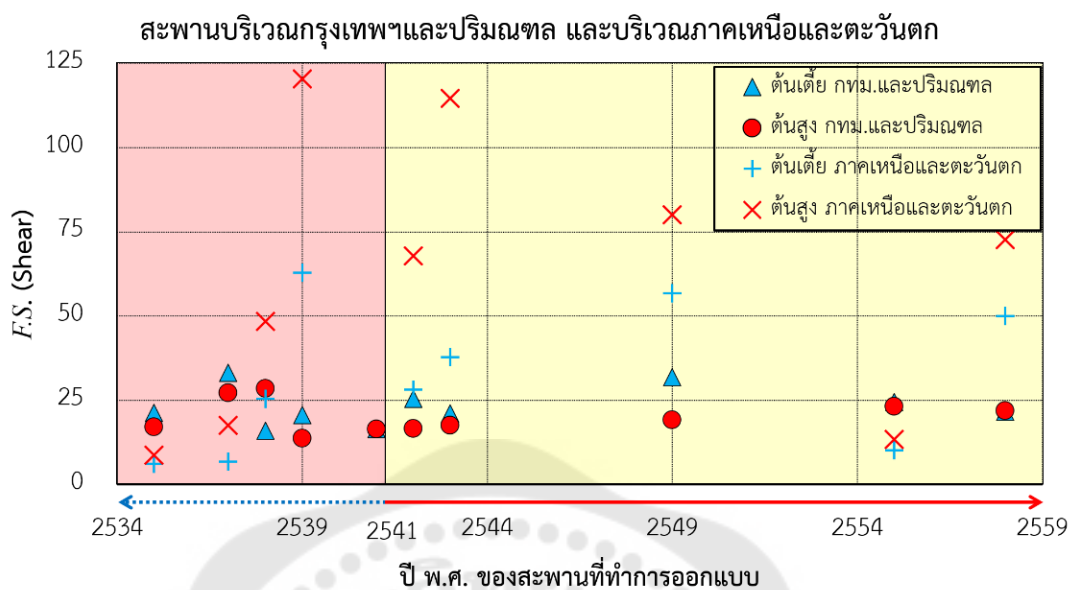
ภาพประกอบ 66 อัตราส่วนความปลอดภัยของแรงเฉือน ($F.S._v$) เสาสะพานบริเวณที่ 1 ต้นเดี่ยวและต้นสูง

ภาพประกอบ 66 แสดงถึงอัตราส่วนความปลอดภัยของเสาต่อแรงเฉือน ณ สภาวะใช้งานของโครงสร้างเสาสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล การวิเคราะห์พบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 มีค่า $F.S._v$ ต้นเดี่ยวอยู่ที่ประมาณ 16.0 ถึง 33.0 และต้นสูงอยู่ที่ประมาณ 14.0 ถึง 28.0 โดยที่มีต้นเดี่ยวจำนวน 3 สะพานที่มีความปลอดภัยเนื่องจากการเฉือนพังที่มากกว่าต้นสูง สำหรับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 พบว่ามีค่า $F.S._v$ ของต้นเดี่ยวอยู่ที่ประมาณ 21.0 ถึง 32.0 และต้นสูงอยู่ที่ประมาณ 17.0 ถึง 24.0 และพบว่าเสาสะพานต้นเดี่ยวจำนวน 4 สะพาน มีความปลอดภัยเนื่องจากการเฉือนพังที่มากกว่าต้นสูง จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ทั้งเสาต้นเดี่ยวและต้นสูงจำนวน 38 เสาพบว่าเสาทั้ง 2 ช่วงระยะเวลาการออกแบบทั้งออกแบบก่อน พ.ศ. 2541 และออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 มีค่าความปลอดภัยเนื่องจากการเฉือนพังที่สูงพอสมควรในบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล



ภาพประกอบ 67 อัตราส่วนความปลอดภัยของแรงเฉือน ($F.S._v$) เสาสะพานบริเวณที่ 2 ต้นเตี้ยและต้นสูง

ภาพประกอบ 67 แสดงถึงอัตราส่วนความปลอดภัยของเสาคู่แรงเฉือน ณ สภาวะใช้งานของโครงสร้างเสาสะพานบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก การวิเคราะห์พบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 มีค่า $F.S._v$ ต้นเตี้ยอยู่ที่ประมาณ 6.0 ถึง 63.0 และต้นสูงอยู่ที่ประมาณ 9.0 ถึง 120.0 โดยพบว่ามีเสาสะพาน 1 ต้นที่มีค่า $F.S._v$ ที่สูงมาก โดยที่ต้นเตี้ยจะมีความปลอดภัยเนื่องจากการเฉือนพังที่น้อยกว่าต้นสูงเสมอ สำหรับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 พบว่ามีค่า $F.S._v$ ของต้นเตี้ยอยู่ที่ประมาณ 10.0 ถึง 57.0 และต้นสูงอยู่ที่ประมาณ 13.0 ถึง 114.0 และพบว่าเสาสะพานต้นเตี้ยมีความปลอดภัยเนื่องจากการเฉือนพังที่น้อยกว่าต้นสูงเสมอ จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ทั้งเสาต้นเตี้ยและต้นสูงจำนวน 38 เสาพบว่าเสาทั้ง 2 ช่วงระยะเวลาการออกแบบทั้งออกแบบก่อน พ.ศ. 2541 และออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 มีค่าความปลอดภัยเนื่องจากการเฉือนพังที่สูงพอสมควรในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก



ภาพประกอบ 68 อัตราส่วนความปลอดภัยของแรงเฉือน ($F.S._v$) เสาคานบริเวณที่ 1 และ 2
ต้นเตี้ยและต้นสูง

ตาราง 23 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความปลอดภัยต่อแรงเฉือน $F.S._v$

บริเวณ	ช่วงปีพ.ศ.ออกแบบ.	ต้นเตี้ย	ต้นสูง	ค่าเฉลี่ย
กรุงเทพมหานครและปริมณฑล	ก่อนปี พ.ศ.2541	21.54	20.62	21.08
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	24.95	19.70	22.33
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	23.24	20.16	21.70
เหนือและตะวันตก	ก่อนปี พ.ศ.2541	25.37	48.79	37.08
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	36.63	69.76	53.19
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	31.62	60.44	46.03
ทั้งสองบริเวณรวมกัน	ก่อนปี พ.ศ.2541	23.24	33.14	28.19
	ช่วงปี พ.ศ.2542-2559	30.79	44.73	37.76
	ตั้งแต่อดีต - ปี พ.ศ.2559	27.21	39.24	33.23

อัตราส่วนความปลอดภัยต่อแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ณ สภาวะใช้งานของโครงสร้างเสา สะพาน ($F.S._v$) ที่ออกแบบตั้งแต่อดีตจนถึงปี พ.ศ. 2559 พบว่าเสาสะพานบริเวณกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล ดันเดี่ยมีความปลอดภัยเฉลี่ยต่อแรงเฉือน ณ สภาวะใช้งาน ($F.S._v$) ที่มากกว่าต้นสูง (ภาพประกอบ 66) แตกต่างจากเสาสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกที่ดันเดี่ยมี $F.S._v$ ที่ต่ำกว่าต้นสูง (ภาพประกอบ 67) โดยเสาสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกจะมี $F.S._v$ ที่สูงกว่าเสาสะพานบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล (ภาพประกอบ 68) และเมื่อวิเคราะห์ $F.S._v$ ตามช่วงเวลาในการออกแบบสะพานบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑลที่ออกแบบก่อน พ.ศ. 2541 มีค่าเฉลี่ย $F.S._v$ ที่ 21.08 ซึ่งใกล้เคียงกับสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 ที่มีค่าเฉลี่ย $F.S._v$ ที่ 22.33 (ตาราง 23) สำหรับสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 มีค่าเฉลี่ย $F.S._v$ ที่ 37.08 ซึ่งน้อยกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 ที่มีค่าเฉลี่ย $F.S._v$ ที่ 53.19 (ตาราง 23) แต่อย่างไรก็ดีจากค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความปลอดภัยต่อแรงเฉือน ภาพประกอบ 68 และตาราง 23 พบว่าค่าเฉลี่ย $F.S._v$ ทั้ง 19 สะพานเท่ากับ 33.23 มีค่ามากกว่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อโมเมนต์ดัดที่มีค่าเท่ากับ 4.32 (ตาราง 22) อยู่มาก จากค่าความแตกต่างของอัตราส่วนความปลอดภัยนี้เองจึงอาจกล่าวได้ว่าเสาสะพานมีความปลอดภัยต่อแรงเฉือนที่ดีกว่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อโมเมนต์ดัด โดยจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยของเสาสะพานทั้งในบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล และบริเวณภาคเหนือและตะวันตก พบว่าสะพานดัดทั้งหมดยังคงมีความปลอดภัยต่อการใช้งาน กรณีสภาวะใช้งานขณะเกิดแผ่นดินไหว (service eq)

อีกข้อสังเกตพบว่าเสาสะพานบางตัวมี $F.S.$ ที่สูงมากซึ่งจากการตรวจสอบพบว่าเกิดขึ้นจากขนาดของแรงแผ่นดินไหวในบางพื้นที่มีขนาดที่ไม่รุนแรงได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวที่น้อยมาก หรือขนาดหน้าตัดเสาสะพานที่มีขนาดใหญ่มากทำให้มีค่า $F.S._v$ สูงถึง 120 (ภาพประกอบ 67) โดยสะพานดังกล่าวนี้ตั้งอยู่ในแถบจังหวัดพิษณุโลกที่ไม่ได้รับผลกระทบของแผ่นดินไหว แต่ในการออกแบบผู้ออกแบบอาจใช้รูปแบบของเสาที่คำนวณการต้านทานแรงแผ่นดินไหวมาใช้งาน เมื่อตรวจสอบย้อนกลับไปทำให้เสาดังกล่าวมีค่าความปลอดภัยที่สูงมาก ซึ่งหากตรวจสอบเพียงค่า V_c เพียงอย่างเดียวก็มีความสามารถต้านทานแรงเฉือนได้อยู่แล้ว ถึงแม้ยังไม่ได้มีการคำนวณ V_s ดังนั้นจึงทำให้เกิดค่าความปลอดภัยของแรงเฉือนที่สูงมาก สอดคล้องกับพฤติกรรมของคานที่ต้องออกแบบให้รับโมเมนต์ดัดเป็นหลักโดยที่แรงเฉือนในบางหน้าตัดกำลังคอนกรีตเพียงอย่างเดียวก็สามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้ และยังพบค่าความแตกต่างของ $F.S._v$ ที่เกิดขึ้นมากบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกจากภาพประกอบ 67 พบว่ามีความ

แตกต่างกันอย่างมาก เกิดจากที่ตั้งของสะพานที่นำมาตรวจสอบทั้ง 9 สะพานไม่ได้อยู่ในบริเวณเดียวกันแต่เป็นตัวแทนตั้งแต่จังหวัดเชียงรายยาวลงมาถึงจังหวัดนครสวรรค์ดังภาพประกอบ 62 ซึ่งแสดงถึงบริเวณที่ตั้งของสะพานมีผลต่อแรงที่กระทำต่อสะพานเป็นอย่างมาก และในการออกแบบยังออกแบบให้ขนาดของหน้าตัดเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยวนี้นี้มีขนาดหน้าตัดที่ใหญ่

โดยที่เสาสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกมีค่าเฉลี่ยความปลอดภัยต่อแรงเฉือน ณ สภาวะใช้งานที่ดีกว่าเสาสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล อาจเกิดจากข้อกำหนดต่างๆของแรงแผ่นดินไหว และความตระหนักในการใส่ใจถึงการเกิดแผ่นดินไหวที่อาจจะเกิดขึ้นส่งผลให้สะพานในบริเวณภาคเหนือและตะวันตกต้องคำนวณและรองรับแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี และสำหรับการออกแบบสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกในช่วงปี พ.ศ.2542-2559 มีความปลอดภัยมากกว่าสะพานบริเวณที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 อาจเกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นระยะในบริเวณภาคเหนือจึงทำให้ผู้ออกแบบทำการออกแบบโดยคำนึงถึงแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นส่งผลให้กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด และกำลังต้านทานแรงเฉือนของหน้าตัดมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์เสาสะพานต้นเตี้ยและต้นสูงของสะพานนั้นๆ จำนวน 19 สะพาน หรือ 38 เส้า แบ่งเป็นบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลจำนวน 20 เส้า และบริเวณภาคเหนือและตะวันตกจำนวน 18 เส้า จากผลการวิเคราะห์จะพบว่าเสาสะพานในบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล และบริเวณภาคเหนือและตะวันตกมีอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด (ρ_l) เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.96 ซึ่งถือว่ามีความสามารถและเหมาะสมในการต้านทานการวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลักได้ตามที่คู่มือกำหนด ในเรื่องอัตราส่วนแรงอัดกระทำตามแนวแกนที่เกิดขึ้นต่อกำลังของหน้าตัด (σ_c) เสาสะพานจำนวน 38 เส้าทั้ง 2 บริเวณ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 7.82 โดยสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลจะมีอัตราส่วนแรงอัดกระทำตามแนวแกนบนหน้าตัดเส้าที่สูงกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก และเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาของการออกแบบสะพานจะพบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปีพ.ศ.2541 มีอัตราส่วนแรงอัดกระทำตามแนวแกนบนหน้าตัดเส้าที่ต่ำกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปีพ.ศ.2542-2559 และการที่แรงอัดกระทำตามแนวแกนบนหน้าตัดทั้งหมด 38 หน้าตัดมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 ของกำลังหน้าตัดบ่งบอกถึงองค์อาคารหรือเส้าที่นำมาวิเคราะห์มีพฤติกรรมเป็นลักษณะคล้ายคาน

สำหรับ DCR_M ของเสาสะพาน 38 เส้า พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.60 ซึ่งถือว่ามีความสมรรถนะในการต้านแผ่นดินไหวที่ดี จากผลการวิเคราะห์ DCR_M ของสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลที่น้อยกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก ส่งผลให้สะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลมีสมรรถนะที่ดีกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก ซึ่งเข้าใจได้ว่าพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลเป็นจุดยุทธศาสตร์สำคัญของประเทศทำให้วิศวกรผู้ออกแบบมีความจำเป็นในการออกแบบความสามารถให้สามารถใช้งานได้หากเกิดเหตุการณ์ต่างๆขึ้นและขนาดของแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นยังไม่รุนแรงเหมือนกับภาคเหนือที่มีค่า DCR_M ของเส้าต้นสูงที่มีค่าสูงมากกว่า 0.80 เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาในการออกแบบจะพบว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปีพ.ศ.2542-2559 มีสมรรถนะในการต้านแผ่นดินไหวที่ดีกว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ.2541 ซึ่งจะเห็นว่าเสาสะพานตั้งแต่อดีตจนถึงปีพ.ศ.2559 มีแนวโน้มของสมรรถนะที่ดีขึ้น เมื่อใช้คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวเป็นเกณฑ์การตรวจสอบ ซึ่งอาจเกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นทั่วโลกและเกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก ทำให้ผู้ออกแบบ และเกณฑ์ข้อกำหนดต่างๆ กำหนดการออกแบบหน้าตัดให้มีสมรรถนะที่เพียงพอสามารถใช้งานอยู่ได้หาก

เกิดเหตุแผ่นดินไหวตามสถานที่ต่างๆขึ้น และจากการวิเคราะห์สำหรับเสาที่มีค่า DCR_M สูงกว่า 0.80 เพื่อให้การวิเคราะห์มีความใกล้เคียงมากขึ้น อาจจะต้องนำเสาในต้นนั้นๆไปทำการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear analysis) เพื่อทำการวิเคราะห์ DCR_M ให้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้นเพื่อทำการเสริมกำลังที่เพียงพอต่อไป และยังพบว่าเสาสะพานตั้งแต่จังหวัดลำปางลงมาทางใต้ของบริเวณภาคเหนือและตะวันตกมีค่า DCR_M ต่ำดังนั้นสามารถลดปริมาณวัสดุก่อสร้างลงได้แต่เสาสะพานยังคงมีสมรรถนะที่เพียงพอเมื่อเกิดแผ่นดินไหว สำหรับ DCR_V จากเสาสะพาน 38 เสาพบว่ามีความเฉลี่ยเพียง 0.10 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับค่า DCR_M ที่มีค่าเฉลี่ยถึง 0.60 ดังนั้นจะถือว่าสะพานทั้งหมดภายในประเทศไทยไม่มีความเสี่ยงต่อการวิบัติด้วยแรงเขื่อนเมื่อใช้คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินแผ่นดินไหวเป็นเกณฑ์เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว

เมื่อวิเคราะห์เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยวถึงอัตราส่วนความปลอดภัย ณ สภาวะใช้งานของโครงสร้างจะพบว่าทั้ง 19 สะพานมีความปลอดภัย ณ สภาวะใช้งานโดยจะพบว่าความปลอดภัยต่อโมเมนต์ดัดจะเป็นตัวควบคุมความปลอดภัยเช่นเดียวกับ DCR_M เพราะเนื่องจากค่า $F.S._M$ มีค่าเฉลี่ยทั้ง 19 สะพานเพียง 4.32 แต่สำหรับ $F.S._V$ มีค่าสูงถึง 33.23 ซึ่งแตกต่างกันมาก และพบว่าสะพานที่ออกแบบและก่อสร้างบริเวณภาคเหนือและตะวันตกจะมีความปลอดภัย ณ สภาวะใช้งานของแรงเขื่อน ($F.S._V$) มากกว่าสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล แต่สะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลจะมีค่าเฉลี่ยความปลอดภัยต่อแรงดัด ($F.S._M$) ที่ดีกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก เมื่อคำนึงถึงช่วงเวลาการออกแบบสะพานจะพบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 จะมีค่าเฉลี่ย $F.S._V$ และ $F.S._M$ ที่น้อยกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 แสดงถึงมาตรการการออกแบบสะพานที่มีความใส่ใจถึงแรงแผ่นดินไหวที่มีมากขึ้น ทำให้สะพานที่ออกแบบช่วงหลังมีความปลอดภัย ณ สภาวะใช้งานที่ดีกว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 นั้นเอง

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงสมรรถนะการต้านทานการไหวสะเทือนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ประเภทเสาเดี่ยวในประเทศไทยที่มีอยู่ซึ่งถูกออกแบบตั้งแต่อดีตจนถึงปี พ.ศ. 2559 ในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล และบริเวณภาคเหนือและตะวันตก ก่อนที่จะมีคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อดำเนินแผ่นดินไหวแล้ว สำหรับงานวิจัยในอนาคตที่น่าสนใจอาจหนีไม่พ้นในส่วนของการประเมินสมรรถนะของเสาสะพานที่ถูกออกแบบหลังปี พ.ศ. 2559 ว่า

เมื่อมีคู่มือการออกแบบสะพานเพื่อดำเนินงานแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงแล้วสะพานที่ถูกออกแบบนั้น ผู้ออกแบบส่วนมากจะออกแบบให้สะพานดังกล่าวมีสมรรถนะในการต้านทานการไหวสะเทือนได้มากน้อยเพียงใดในแต่ละพื้นที่ และแตกต่างจากสะพานที่ได้ออกแบบไว้ก่อนที่จะมีคู่มือแต่ละช่วงเวลาหรือไม่ และยังมีอีกตัวแปรที่มีความสำคัญสำหรับการวิเคราะห์คือการเลือกใช้ค่า γ^{EQ} ก็เป็นอีกหนึ่งหัวข้องานวิจัยที่มีความน่าสนใจในการเลือกใช้ค่าสำหรับตัวแปรนี้ ที่ทางกรมทางหลวงแนะนำให้ใช้ไม่น้อยกว่า 0.50 ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่เมื่อนำมาปรับใช้กับสะพานที่ถูกออกแบบเพื่อใช้งานในประเทศไทย เพราะเนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นการประมาณค่าการใช้งานเกี่ยวกับน้ำหนักจรที่เกิดขึ้นบนสะพานในประเทศไทยซึ่งความหนาแน่นของการใช้งานสะพานแต่ละสะพานที่มีความหนาแน่นที่ไม่เท่ากันในแต่ละพื้นที่เช่นในเขตเมืองกับเขตต่างจังหวัด



บรรณานุกรม

- (AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (5th Edition). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO; 2010.
- AASHTO. Standard Specification for Highway Bridges. In: 16, editor. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials; 1996.
- AASHTO. Standard Specification for Highway Bridges. In: 17, editor. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2002.
- AASHTO. Standard Specification for Highway Bridges. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.; 1973.
- baanfinder. สะพานพระราม 9 สะพานนวัตกรรมก่อสร้างเฉลิมพระชนม์ก้องโลก [Internet]. 2016 Oct. [cited: 20 July 2020]. Available: https://www.baanfinder.com/th/article/02yq_สะพานพระราม-9-นวัตกรรมก่อสร้างเฉลิมพระชนม์ก้องโลก.
- Chaimahawan P, Pimanmas A. Assessment of Seismic Deficiency of Existing Reinforced Concrete Buildings in Bangkok. Engineering Journal of Research and Development. 2007;18(3): 19-28.
- Collins MP, Mitchell D, Adebar P, Vecchio F. A general shear design method. Aci Structural Journal. 1996;93(2):36 -44.
- Danielle Venton. Core Concept: Tectonic tremors could offer insights into the big shakers [Internet]. 2016 July [cited: 6 April 2020]. Available from: <http://www.pnas.org/content/113/29/7930>.
- GEONOI2015. [แผ่นดินไหวเขย่าได้หวั่น ขนาด 6.4 แมกนิจูด โศกนาฏกรรมรับตรุษจีน](#))6 ก.พ.2559) อาคารถล่มหลายหลัง [Internet]. 2016Feb. [cited: : 6 October 2018]. Available: <https://geonoi.wordpress.com/author/geonoi2015/>.

GEONOI2015. การเคลื่อนที่ของเปลือกโลก [Internet]. 2016 Feb. [cited: 6 October 2018].

Available from: <https://geonoi.wordpress.com/2015/11/01/การเคลื่อนที่ของเปลือกโลก/>.

John M, Kulicki, Dennis R, editors. A New Live Load Model for Bridge Design. Proceedings of 8th Annual International Bridge Conference; 1991 June; Pittsburgh, PA.

Joyklad P, Pimanmas A, editors. Assessment of seismic performance of existing bridge piers in Bangkok. Paper presented at the In Proceedings of the Sixth Regional Symposium on Infrastructure Development (RSID6); 2009; Bangkok, Thailand.

Kim I, Okamura H, Maekawa K. Method for checking seismic performance of concrete structures and its effectiveness. Journal of Structural Engineering. 1998;44:165-70.

Mahmoud E. Kamara, Lawrence C. Novak. Note on ACI 318-11 Building Code Requirement for Structure Concrete. skokie, Illinois: Portland Cement Association; 2011

Naaman AE. Prestressed Concrete Analysis and Design: Fundamentals. 1, editor. New York: McGraw-Hill; 1982.

Nawy EG. Reinforced concrete : a fundamental approach. 3rd ed.. ed. Englewood Cliffs, NJ: Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall; 1996.

[Pairach Piboonrunroj](#). รวมภาพ คลิป ข่าว ฯลฯ แผ่นดินไหวเชียงราย –5 พฤษภาคม 2557 – ขนาด 6.3 ริกเตอร์ [Internet]. 2014 May [cited: 6 October 2018]. Available: <https://pairach.com/2014/05/05/chiangraiquake/>.

Preeda Chaimahawan, Amorn Pimanmas, . Simple Seismic Evaluation Methodology for Gravity-Designed Reinforced Concrete Building. Engineering journal of research and development. 2007;18(1).

sss28651. เขื่อนยักษ์อุเวร์ เขื่อนกันแม่น้ำโคโลราโด [Internet]. 2015 Nov. [cited: 20 July 2020]. Available: <http://www.thaigoodview.com/node/134701?page=0,13>.

Vacationist. Golden Gate Bridge สะพานโกลเดนเกต [Internet]. 2016[cited: 7 October 2018]. Available: <http://www.vacationistmag.com/goldengate-bridge/>.

เป็นหนึ่งใน วานิชชัย, อาเด ลิซานโตโน. การวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย.

วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา; 2537.

เว็บภัยพิบัติ. รายงานภัยพิบัติประจำวัน [Internet]. 2018 Feb. [cited: 6 October 2018].

Available: <https://paipibat.com/?tag=แผ่นดินไหวเม็กซิโก>.

ใหม่ แก้วอุดร, พงศภัค เทพไชย, ศุภกิตต์ ฤทธิศาสตร์. การศึกษาเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานจาก
แผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบสะพานในประเทศไทย. นครนายก: มหาวิทยาลัยศรีนครินทร
วิโรฒ; 2559.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว.

กรุงเทพฯ: บริษัท ดิจิตอล ออฟเซต เอเชีย แปซิฟิก จำกัด; 2552.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

มยผ.1301/1302-61. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด; 2561.

กรมทรัพยากรธรณี. แผนที่รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย [Internet]. 2558 [cited: 30 June 2020].

Available:http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=77164&filename=index.

กรมทางหลวง. คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว. กรุงเทพมหานคร: กรมทาง

หลวง กระทรวงคมนาคม; 2559.

ทศพล แก้วนุชดาสร. กรณีศึกษาการประเมินและปรับปรุงสะพานตัวอย่างเพื่อต้านแผ่นดินไหว.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2555

นพพร ฉัตรคชราชกูร์. การออกแบบสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อต้านแรงแผ่นดินไหวสำหรับ

ประเทศไทย. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2544.

ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์, นพดล คูหาทสันะดีกุล. เขตแผ่นดินไหวและสัมประสิทธิ์ แผ่นดินไหว

สำหรับประเทศไทย. การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2536: วิศวกรรมสถาน
แห่งประเทศไทยฯ; 2536. p. 268-87.

ประชาชาติธุรกิจ. เผยผลการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานพระราม 5 โครงสร้างแข็งแรง ใช้งาน

ได้อย่างปลอดภัย [Internet]. 2018 September [cited: 20 July 2020]. Available:

<https://www.prachachat.net/property/news-35749>.

ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลด. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก วิชา วศย 321 : เอกสารประกอบการสอน..

นครนายก: นครนายก : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2558.

วรากร สิงหสุต. สมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหวของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย

ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2551.

วิฑูรย์ลันนา. สะพานขาวทาสมู อีกหนึ่งแห่งแหล่งท่องเที่ยวยอดนิยมของคนรักการถ่ายรูป ของ

จังหวัดลำพูน [Internet]. 2017 October [cited: 20 July 2020]. Available:

<http://www.cm77.com/news/travel/>

detail/item/175.html.

ศุภชัย ปัญญาบรรจง, ไสภณัฐ ธรรมสถิต. การประเมินเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอยู่เดิมในประเทศไทย โดยพิจารณารูปแบบการวิบัติ. นครนายก: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2560.

สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา. กฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนักความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแผ่นดินไหว พ.ศ.2550. กรุงเทพฯ 2550.

สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา. กฎกระทรวง ฉบับที่ 49 (พ.ศ.2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522. กรุงเทพฯ 254

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปกรณ์ภัทร บุดชา
วัน เดือน ปี เกิด	15 ธันวาคม 2535
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	54/1 หมู่9 ถ.นิคม-ชัยพฤกษ์ ต.หนองสาหร่าย อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา 30130

