

อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่มีอยู่เดิมในประเทศไทยเนื่องจากมาตรการ
ออกแบบด้านการไหวสะเทือนไทย

DEMAND-CAPACITY RATIO OF EXISTING REINFORCED CONCRETE
BRIDGE COLUMNS IN THAILAND ACCORDING TO THAI SEISMIC
DESIGN MEASURING

ปรกรณ์ภัทร บุตชา¹ และ ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด²

¹นิสิตปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 63 หมู่ 7 ถนน รังสิต-นครนายก ต.องครักษ์ อ.องครักษ์
จ.นครนายก 26120, pagornphat.bud@g.swu.ac.th

²อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 63 หมู่ 7 ถนน รังสิต-นครนายก ต.องครักษ์ อ.องครักษ์
จ.นครนายก 26120, panuwatj@g.swu.ac.th

Pagornphat Budcha¹ and Panuwat Joyklad²

¹Master Student, Department of civil and environmental Engineer, Faculty of Engineering,
Srinakharinwirot University, 63 M.7 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Khong 16, Ongkharak,
Nakhonnayok 26120, Thailand, pagornphat.bud@g.swu.ac.th

²Lecturer, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering,
Srinakharinwirot University, 63 M.7 Rangsit-Nakhonnayok Road, Khong 16, Ongkharak,
Nakhonnayok 26120, Thailand, panuwatj@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมรรถนะของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอยู่เดิมในประเทศไทยในการ
ด้านการไหวสะเทือน ในรูปของอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถ (DCR) โดยใช้คู่มือ
การออกแบบสะพานและถนนด้านแผ่นดินไหว ในพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว
(1) บริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล (2) บริเวณภาคเหนือและตะวันตก ตั้งแต่อดีตจนถึง
ปี พ.ศ. 2559 ซึ่งนอกจากจะได้แสดงดัชนีโครงสร้างที่สำคัญของเสาสะพาน ที่สามารถใช้เป็นข้อมูล
อ้างอิงในการดำเนินการวิจัยต่อไปในอนาคต พบว่าอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของ

โมเมนต์เป็นตัวแปรที่ควบคุมการวิบัติ โดยสะพานในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑลจะมีสมรรถนะในการต้านการไหวสะเทือนที่ดีกว่าในพื้นที่ภาคเหนือและตะวันตก และผลการวิเคราะห์แสดงถึงเสถียรภาพที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 มีค่า DCR_M น้อยกว่าส่งผลให้มีสมรรถนะที่ดีกว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 ทำให้แนวโน้มสมรรถนะของสะพานจากมาตรการออกแบบสะพาน เมื่อวิเคราะห์ย้อนกลับไปในแต่ละช่วงเวลาพบว่าสมรรถนะของสะพานมีค่าดีขึ้นตามลำดับ แต่ควรเฝ้าระวัง และทำการวิเคราะห์เพื่อเสริมกำลังของเสาสะพานบริเวณภาคเหนือที่มีค่า DCR_M เกินกว่า 0.80

คำสำคัญ: เสาเดี่ยวสะพาน, แผ่นดินไหว, อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถ, กำลังเฉือน, กำลังดัด

ABSTRACT

This research studied the performance of existing reinforced concrete bridge columns in Thailand. In terms of Demand-capacity-ratio (DCR). By using the manual of bridge and road designs for seismic resistance. The areas that may be affected by earthquakes from the past until 2016 comprises (1) Bangkok and its boundary provinces (2) north and west region of Thailand. This paper shows the important structural index of the bridge's column that can be used as a reference for future research. Moreover, it shows that the biaxial moment is the variable for failure control. Bridges in Bangkok and its boundary provinces have better seismic-resistant performance than bridges in the north and west region of Thailand. The analysis result shows that the DCR_M of bridge designed during 1999-2016 is less than the DCR_M of bridge designed before 1998. The trends for the performance of bridge safety design is gradually better than the past but still need to be considered, especially the reinforced concrete bridge's columns for the northern region that DCR_M are required to be higher than 0.80.

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

1. บทนำ

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างสำคัญหลายประเภท โดยโครงสร้างที่ต้องมีการเฝ้าระวังเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายภายใต้เหตุการณ์ดังกล่าวตัวหนึ่งคือสะพาน โดยเฉพาะเสาสะพานเป็นโครงสร้างที่รองรับน้ำหนัก

ของสะพานทั้งหมด หากเสาสะพานเกิดการวิบัติจะสร้างให้เกิดความเสียหายที่ร้ายแรงและส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่ที่สะพานตั้งอยู่ ความจำเป็นดังกล่าวจึงนำไปสู่การสร้างมาตรการการออกแบบสะพานเพื่อต้านการไหวสะเทือนขึ้น จากที่ได้ทำการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น พบว่าแนวทางการออกแบบสะพานเพื่อต้านการไหวสะเทือนในประเทศไทย แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงเวลา ได้แก่ (1) ก่อนปี พ.ศ. 2541 เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวสำหรับประเทศไทยยังไม่มีกฎกระทรวงในการคำนวณแรงแผ่นดินไหวขึ้น ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 49 (พ.ศ. 2540) [1] ที่ได้มีการบังคับเพียงการออกแบบโครงสร้างอาคาร ให้คำนึงถึงการจัดรูปแบบเรขาคณิตให้มีเสถียรภาพต่อการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ทำให้การออกแบบสะพานจำเป็นต้องอ้างอิงตามมาตรฐานจากต่างประเทศที่มีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ สำหรับประเทศไทยคือ วิธีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างแบบคงที่ 6% ตามมาตรฐาน AASHTO1973 [2] ในแนวทางข้างต้นกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างเท่ากับ 6% ของน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง ที่กำหนดแรงขณะเกิดแผ่นดินไหวเกิดขึ้นจากน้ำหนักของโครงสร้างส่วนบน (W , Superstructure) เพียงอย่างเดียวไม่รวมน้ำหนักบรรทุกจร (2) ระหว่างปี พ.ศ. 2542-2559 ซึ่งในช่วงต้นมีงานวิจัยที่เป็นที่ยอมรับในประเทศไทยคือ แผนที่เส้นชั้นความสูง (Contour Lines) PGA_0 / G ของ Warnitchai et al [3] แนวทางข้างต้นกำหนดอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (PGA) ที่มีความน่าจะเป็น 10% ที่จะเกิดค่าสูงกว่าในคาบการเกิด 50 ปี เพื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างเมื่อเกิดการไหวสะเทือนในแต่ละพื้นที่ควบคู่กับ AASHTO Standard 2002 [4] โดยที่กำหนดแรงเหมือนกับ AASHTO1973 (3) หลังปี พ.ศ.2559 ซึ่งเป็นผลมาจาก เมื่อ พ.ศ. 2557 ได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้นที่ อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย ทำให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สิน ไม่ว่าจะเป็นอาคาร บ้าน วัด พระพุทธรูป ถนน และอื่นๆ ทำให้กรมทางหลวงได้พิจารณาสร้างมาตรฐานเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับสะพานและถนนในรูปแบบของคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว [5] เผยแพร่ในปี พ.ศ. 2559 ใช้ควบคู่กับมาตรฐาน มยผ.1302-52 [6] ของกรมโยธาธิการและผังเมือง เพื่อเป็นมาตรฐานเดียวกันทั่วประเทศ

ด้วยการจัดทำมาตรฐานคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวในปี พ.ศ. 2559 นี้เองจึงทำให้เป็นเหตุในการศึกษาถึงสมรรถนะของสะพานที่มีอยู่เดิมก่อนที่จะมีคู่มือว่าสะพานในพื้นที่เสี่ยงแต่ละบริเวณ หรือสะพานที่ออกแบบตามช่วงเวลาต่างๆ ก่อนที่จะมีคู่มือการออกแบบสะพานของกรมทางหลวง มีสมรรถนะของสะพานภายใต้การไหวสะเทือนเป็นอย่างไร สามารถที่จะรองรับเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวได้อย่างเหมาะสมหรือไม่

งานวิจัยนี้จะประเมินสมรรถนะของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทเสาเดี่ยวเพื่อเป็นตัวแทนของเสาสะพานในประเทศไทยเนื่องจากเสาสะพานประเภทเสาเดี่ยวเป็นรูปแบบที่ถูกใช้งานบ่อยและก่อสร้างในพื้นที่ๆ จำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากเสาเดี่ยวนี้เกิดการเสียหายหรือวิบัติ

จะทำให้เกิดผลกระทบต่อนพื้นที่ที่อยู่ด้านล่างของสะพานแบบตันที่หันใดไม่สามารถป้องกันความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ โดยใช้มาตรฐานการออกแบบตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวปี พ.ศ. 2559 ร่วมกับมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61 [7] ฉบับล่าสุดที่ทางกรมโยธาธิการและผังเมืองได้กำหนดแทน มยผ.1302-52 ที่เป็นฉบับเก่าเพื่อคำนวณในส่วนแรงกระทำ (demand) และ AASHTO LRFD 2010 [8] ในการคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนของหน้าตัดเสาเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างความต้องการต่อวิสัยความสามารถของเสาสะพาน (DCR) สำหรับโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนที่เกิดขึ้น โดยค่าคาบของแผ่นดินไหวทีู่กกำหนดตามคู่มือกรมทางหลวงดังกล่าวอยู่ที่ประมาณ 1,000 ปี ซึ่งหมายถึงการที่จะเกิดความรุนแรงขนาดนี้กับความเป็นไปได้เท่ากับ 7% ภายในช่วงระยะเวลา 75 ปี

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการต้านทานการไหวสะเทือนของโครงสร้างคอนกรีตอยู่พอควร โดยในปี พ.ศ. 2550 Chaimahawan et al [9] มีการนำเสนอแนวทางการประเมินผลเบื้องต้นของแผ่นดินไหวที่มีต่อจุดต่อคาน-เสา (beam-column joints) ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอยู่เดิมในประเทศไทย โดยจุดประสงค์ของงานวิจัยเพื่อให้วิศวกรใช้เป็นแนวปฏิบัติในการตรวจสอบอาคารที่มีอยู่และต้องรับแรงแผ่นดินไหวโดยใช้ดัชนีชีวิตเป็นอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถ ($DCR_{M \text{ or } V}$), รายละเอียดการเสริมเหล็ก และการตรวจสอบรูปแบบการพัง สำหรับงานวิจัยจะแสดงถึงแผนภูมิขั้นตอนปฏิบัติในการตรวจสอบ (ก) แผนภูมิของแรงมีวัตถุประสงค์ใช้ในการตรวจสอบรูปแบบการพังภายใต้ข้อกำหนดของแรงแผ่นดินไหว และ (ข) แผนภูมิของการครากมีวัตถุประสงค์ใช้สำหรับตรวจสอบรูปแบบการวิบัติเมื่อเกิดการครากในบางชั้นส่วนขององค์อาคาร แต่อย่างไรก็ดีบทความมีข้อเสนอแนะหากตรวจสอบว่าองค์อาคารที่มีอยู่ไม่ผ่านเกณฑ์ ก็เชื่อว่าโครงสร้างจะต้องวิบัติเมื่อเกิดแผ่นดินไหวเพราะโครงสร้างอาจมีความแข็งแรงที่มากกว่าการวิเคราะห์ แต่เป็นเพียงข้อเสนอแนะว่าโครงสร้างดังกล่าวไม่ผ่านตามข้อกำหนดที่เสนอ

ต่อมา Chaimahawan et al [10] ได้มีการนำเสนอการประเมินข้อบกพร่องเมื่อเกิดแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายในกรุงเทพมหานครที่มีความสูงปานกลาง 5-15 ชั้น ไม่ว่าจะเป็นโรงเรียน มหาวิทยาลัย สถานข้าราชการ หรือสำนักงาน การประเมินแผ่นดินไหวประกอบด้วยอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถ การตรวจสอบการเสริมเหล็ก และการตรวจสอบรูปแบบการวิบัติ โดยมีอาคารทั้งหมด 8 อาคารที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งผลของการตรวจสอบทั้ง 8 อาคารไม่ได้มีการเสริมเหล็กเพื่อรองรับแผ่นดินไหว 5 อาคารจาก 8 อาคารมีอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถไม่เป็นที่น่าพอใจ ร้อยละ 44 คานวิบัติด้วยแรงดัด ร้อยละ 15 คานวิบัติด้วยแรงเฉือน

และร้อยละ 41 จุดต่อวินาทีด้วยแรงเฉือน จากผลดังกล่าวเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนมากถึงร้อยละ 66 ส่วนมากจะเกิดการวิบัติที่คาน

ในปี พ.ศ. 2552 Joyklad et al [11] ได้เสนอแนวทางการประเมินผลการวิเคราะห์รูปแบบการวิบัติของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพฯ และปริมณฑลที่มีความสูงอยู่ที่ 6-10 เมตร โดยผลการประเมินพบว่าสะพานทั้ง 9 ตัว มีอัตราส่วนความเหนียว (Ductility Ratio, μ_Δ) ประมาณ 4.0 และยังแสดงให้เห็นว่าเสาที่รับแรงกดมากจะเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนที่ฉับพลันมากกว่าเสาที่มีแรงกดน้อย

ในปี พ.ศ. 2555 Kaewnurachadasorn [12] 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) วิธีเสริมก่อนวางที่ฐานรองรับ โดยมีเพียงวิธีพอกเสาลดความยาวเสาเท่านั้นที่สามารถรองรับความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหวได้เมื่อมีแรงกระทำตามทางยาวของสะพานได้

ในปี พ.ศ. 2559 Kaeoudon et al [13] มีการศึกษาการเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐาน (base shear) จากแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบสะพานในประเทศไทย โดยทำการเปรียบเทียบการออกแบบ 3 วิธี คือ (ก) การออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO 1973 [2] (ข) การออกแบบจากแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของ Warnitchai et al [3] และ (ค) การออกแบบด้วยคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว [5] การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างวิธีที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างมากที่สุดคือวิธี (ข) วิธี (ค) และวิธี (ก) ตามลำดับ แต่เมื่อถึงจุดที่คาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งของโครงสร้างวิธี (ก) จะมีค่ามากกว่าวิธี (ข) และวิธี (ค) และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวในจังหวัดเชียงราย จังหวัดกำแพงเพชร วิธีที่คำนวณได้ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวมากที่สุดคือวิธี (ค) วิธี (ข) และวิธี (ก) ตามลำดับ ในจังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร วิธีที่คำนวณได้ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวมากที่สุดคือ วิธี (ข) วิธี (ค) และวิธี (ก) ตามลำดับ และในทุกพื้นที่เมื่อคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างมากขึ้นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวในวิธี (ก) จะมีค่ามากกว่า วิธี (ข) และวิธี (ค) และหากมีการพิจารณาการเพิ่มขึ้นค่าของคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างอย่างต่อเนื่องแรงเฉือนที่เกิดจากแรงลมตามกฎของกระทรวงอาจจะมีค่ามากกว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวในทุกวิธีการคำนวณ

จากการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าม้งงานวิจัยเกี่ยวกับแผ่นดินไหวที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นงานอาคาร หรืองานสะพาน โดยพบว่ายังไม่ม้งงานวิจัยใดที่ศึกษาอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถ (DCR) ของเสาสะพานที่มีอยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อผลกระทบที่เกิดจากแผ่นดินไหวเมื่อมีการกำหนดคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว [5] ของกรมทางหลวง เพื่อประเมินสมรรถนะของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเสาเดี่ยวในการต้านทานการไหวสะเทือน โดยการคำนวณแรงแผ่นดินไหวที่เกิดจากคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับกำลังต้านทานของหน้าตัดไม่ว่าจะเป็นกำลังต้านทานแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด แล้วนำมาหาอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถของโมเมนต์ DCR_M และอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถของแรงเฉือน DCR_V เป็นดัชนีชี้วัดสมรรถนะของเสาสะพาน เนื่องจาก DCR คืออัตราส่วนของแรงกระทำที่เกิดขึ้นตามคู่มือกำหนดต่อกำลังต้านทานโมเมนต์ดัด และ แรงเฉือน แสดงถึงสมรรถนะที่แท้จริงของโครงสร้างก่อนที่จะเกิดการวิบัติว่ามีสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวได้มากน้อยเพียงใด

3. สะพานที่ใช้ในการตรวจสอบ

โครงสร้างสะพานที่ใช้ในการตรวจสอบ DCR ในงานวิจัยนี้ ถูกรวบรวมจากกรมทางหลวง ซึ่งแบ่งเป็น 2 พื้นที่ (1) บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (2) บริเวณภาคเหนือและตะวันตก ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้ผลกระทบจากคุณสมบัติของชั้นดินที่มีความไม่แข็งแรงอันส่งผลให้แรงแผ่นดินไหวมีการขยายกำลัง รวมถึงบริเวณได้รับผลกระทบจากการปลดปล่อยพลังงานของรอยเลื่อนที่อยู่ภายในพื้นที่หรือบริเวณใกล้เคียง ทำให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้าง โดยประเภทของสะพานที่ได้นำมาศึกษาได้แก่ สะพานทางแยกต่างระดับแบบยกข้าม (overpass bridge, OP), สะพานชุมทางแยกต่างระดับ (interchanges bridge, IC), สะพานกลับรถ (u-turn bridge, UT) และ สะพานทางด่วน (expressway bridge, EW) โดยกำหนดช่วงเวลาที่มีผลกระทบเนื่องจากมาตรการการออกแบบสะพานในประเทศไทย (ก) สะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 จำนวน 5 สะพาน (ข) สะพานที่ออกแบบระหว่างปี พ.ศ. 2542-2559 จำนวน 5 สะพาน รวม 10 สะพาน โดยถือว่าตัวอย่างสะพานที่นำมาวิเคราะห์เป็นตัวแทนของสะพานในช่วงเวลานั้น ดังแสดงจำนวนในแต่ละช่วงตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ทั้งนี้สะพานจะถูกทำการตรวจสอบโดยแบ่งตามลักษณะความสูงของเสานั้นด้วย (ก) ตันเตี้ย (ข) ตันสูง โดยตันเตี้ยคือเสาสะพานตันที่มีความยาวน้อยที่สุดของสะพาน และ ตันสูงคือเสาสะพานที่มีความยาวมากที่สุดของสะพาน

ตารางที่ 1 รายชื่อสะพานและลักษณะของสะพานในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

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

ตารางที่ 2 รายชื่อสะพานและลักษณะของสะพานในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก

ลำดับ	ประเภท	รูปแบบหน้าตัดเสา	ปี พ.ศ. ที่ออกแบบ	ช่วงเวลาออกแบบ
1	IC	วงกลม	2537	ตัวแทนสะพานที่ ออกแบบก่อน พ.ศ. 2541 จำนวน 4 สะพาน
2	IC	วงกลม	2537	
3	OP	วงรี	2540	
4	IC	วงกลม	2540	
5	IC	สี่เหลี่ยม	2542	ตัวแทนสะพานที่ ออกแบบช่วง พ.ศ. 2542-2559 จำนวน 5 สะพาน
6	IC	สี่เหลี่ยม	2542	
7	OP	สี่เหลี่ยม	2543	
8	OP	วงกลม	2548	
9	OP	วงกลม	2551	

4. ข้อกำหนดและวิธีการวิเคราะห์ผล

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณแรงโดยพิจารณารูปแบบแรงพื้นฐาน (Force base) ด้วยคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อหาแรงกระทำด้านข้างจากแผ่นดินไหว โดยไม่ได้พิจารณาถึงกำลังส่วนเกินของวัสดุ นำมาเปรียบเทียบกับกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสองแกน (Biaxial moment) และกำลังต้านทานแรงเฉือน (shear) ออกมาเป็น $DCR_{M \text{ or } V}$

4.1 ข้อกำหนดการออกแบบโดยคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหว

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างสะพานในประเทศไทย สำหรับสะพานของกระทรวงคมนาคม ได้ถูกกำหนดให้ดำเนินการตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหวที่จะต้องคำนวณคาบการสั่นของโครงสร้างดังสมการที่ 1 โดยประยุกต์ใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (S_a) จากมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว [7] ของกรมโยธาธิการและผังเมืองฉบับล่าสุด ร่วมกับ AASHTO LRFD 2010 [8] ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น 0.2 วินาที (S_s) และที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแต่ละพื้นที่ในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑลรวมถึงพื้นที่ต่างจังหวัดได้ถูกกำหนดไว้อย่างชัดเจน สำหรับสะพานเลือกใช้ค่าความหน่วงที่ร้อยละ 5 เนื่องจากเสาคอมของสะพานมีความสูงมากที่สุดไม่เกิน 60 ม. เพื่อหาค่าแรงเฉือน โดยการวิเคราะห์แรงเฉือนในแกนใดๆ ที่เกิดจากแผ่นดินไหว จะต้องนำแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแกนที่ตั้งฉากกันรวมเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 30

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK}} \quad (1)$$

4.2 การรวมผลของแรงแผ่นดินไหวกับแรงอื่น

คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อด้านแผ่นดินไหวกำหนดให้รวมผลของแรงแผ่นดินไหวร่วมกับแรงประเภทอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างในระหว่างเกิดการไหวสะเทือน ดังแสดงในสมการที่ 2-4 โดยมาตรฐาน AASHTO LRFD 2010 [8] กำหนดแรงอัดกระทำตามแนวแกนเป็น N_u แรงเฉือน V_u และโมเมนต์ดัด M_u

$$N_u = 1.25N_{DC} + 1.5N_{DW} + \gamma^{EQ}(N_{LL+IM}) + N_{EQ} \quad (2)$$

$$V_u = 1.25V_{DC} + 1.5V_{DW} + \gamma^{EQ}(V_{LL+IM}) + V_{EQ} \quad (3)$$

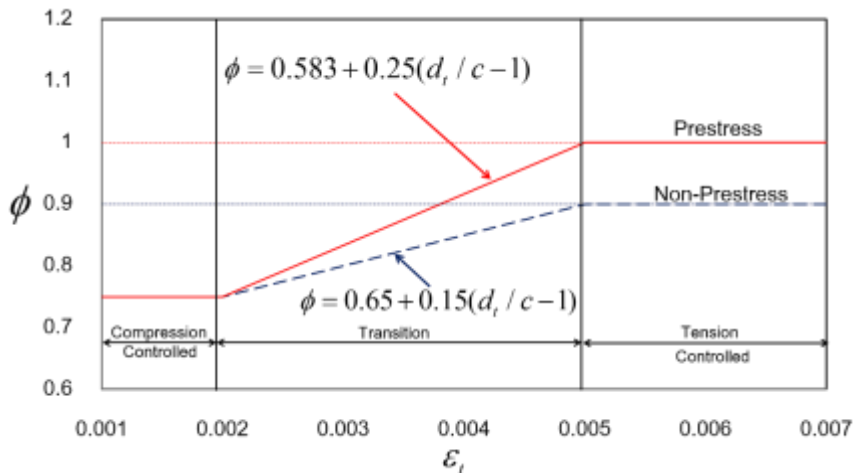
$$M_u = 1.25M_{DC} + 1.5M_{DW} + \gamma^{EQ}(M_{LL+IM}) + M_{EQ} \quad (4)$$

เมื่อค่า DC คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักสะพานและวัสดุ, DW คือแรงเนื่องจากวัสดุปูผิวพื้นและอุปกรณ์ประกอบสะพาน, LL คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักจร, IM คือ แรงเนื่องจากการกระทบ, EQ คือแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว และ γ^{EQ} มีค่าเท่ากับ 0.5 จากคู่มือการออกแบบถนนและสะพานด้านแผ่นดินไหวกำหนดไว้แนะนำให้ใช้ไม่น้อยกว่า 0.5

4.3 การวิเคราะห์กำลังของหน้าตัด

การคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือน (V_n) และกำลังต้านทานโมเมนต์ดัด (M_n) ของหน้าตัดเสาสะพาน ให้เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน AASHTO LRFD 2010 [8] กำหนด โมเมนต์ต้านทานของหน้าตัด (M_n) จะสามารถหาได้จากขนาดของหน้าตัดและการเสริมเหล็กตามแบบรูปการก่อสร้างที่ทางผู้ออกแบบกำหนด โดยค่าแรงตอบสนองที่เกิดขึ้น P_n เมื่อเกิดแรงกระทำ ดังสมการที่ 5 โดยค่า ϕ ที่ใช้จะแปรผันตาม ϵ_t ที่เกิดขึ้นในหน้าตัดดังรูปที่ 1 เมื่อ ϵ_t คือค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงเส้นไกลที่สุดที่วัดจากผิวรับแรงอัด ณ สภาวะประลัย และทำการสร้างแผนผังปฏิสัมพันธ์ (Interaction diagram) เพื่อหากำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัด M_n สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม spColumn [14] ในการสร้างแผนผังปฏิสัมพันธ์โดยการสร้างหน้าตัดเสาในโปรแกรมตามแบบที่วิศวกรได้ออกแบบไว้แล้วคำนวณหา M_{no} จากนั้นใช้ค่าแรงตอบสนอง P_n ที่คำนวณได้เพื่อประเมินกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดแบบแกนเดียว M_{no} ของหน้าตัดตามแนวแกน x และ y ที่ได้จากโปรแกรม spColumn [14]

$$P_n = N_u / \phi \quad (5)$$



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของค่า ϕ ที่แปรผันตามความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2010 [8]

สำหรับการคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนออกแบบของหน้าตัดเสาสะพาน (ϕV_n) ดังสมการที่ 6-11 ใช้แนวคิดของ AASHTO LRFD 2010 [8] ที่มีการคิดผลของกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตในสมการที่ 7 จากแรงอัดตามแนวแกนประลัย (N_u) (ซึ่งจะมีค่าลบเมื่อเป็นแรงอัด และมีค่าบวกเมื่อ

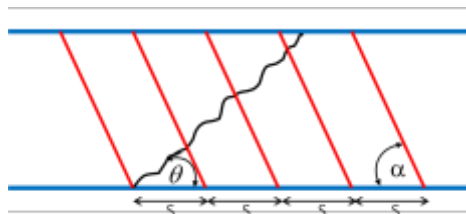
เป็นแรงดึง) โมเมนต์ดัดประลัย (M_u) และแรงเฉือนประลัย (V_u) โดยมาตรฐานแนะนำค่าแฟกเตอร์ต้านทาน (Resistance Factor) ϕ สำหรับแรงเฉือนไว้เท่ากับ 0.9

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + V_p) \quad (6)$$

$$V_c = 0.2560\beta\sqrt{f'_c}b_vd_v \quad (7)$$

$$V_s = A_v f_y d_v (\cot \theta + \cot \alpha) / s \quad (8)$$

โดยที่ V_c คือ กำลังต้านแรงเฉือนของคอนกรีต, V_s คือ กำลังต้านแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, V_p คือ กำลังต้านแรงเฉือนของลวดอัดแรง, โดยที่ β คือ ตัวคูณแสดงความสามารถในการรับแรงดึงในแนวทะแยงของคอนกรีต สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก, θ คือ องศาของแนวอัดทะแยงที่เกิดขึ้น, α คือ องศาของการวางตัวของเหล็กเสริมตามขวาง ดังรูปที่ 2 และ ε_s คือ ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ต้องรับโมเมนต์ดัดประลัย (M_u) แรงเฉือนประลัย (V_u) และแรงอัดตามแนวแกนประลัย (N_u) พร้อมกันดังสมการที่ 11 d_v คือ ความลึกประสิทธิผลของแรงเฉือน, A_{ps} คือพื้นที่ลวดอัดแรง, f_{po} คือกำลังครากของลวดอัดแรง, E_s คือโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม, E_p คือโมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง



รูปที่ 2 การวางเหล็กเสริมรับแรงเฉือน และแนวรอยร้าวจากการเฉือน สำหรับพิจารณา V_s [15]

$$\beta = \frac{4.8}{(1 + 750\varepsilon_s)} \quad (9)$$

$$\theta = 29 + 3500\varepsilon_s \quad (10)$$

$$\varepsilon_s = \left[\frac{\left| \frac{M_u}{d_v} \right| + 0.5N_u + |V_u - V_p| - A_{ps} f_{po}}{E_s A_s + E_p A_{ps}} \right] \quad (11)$$

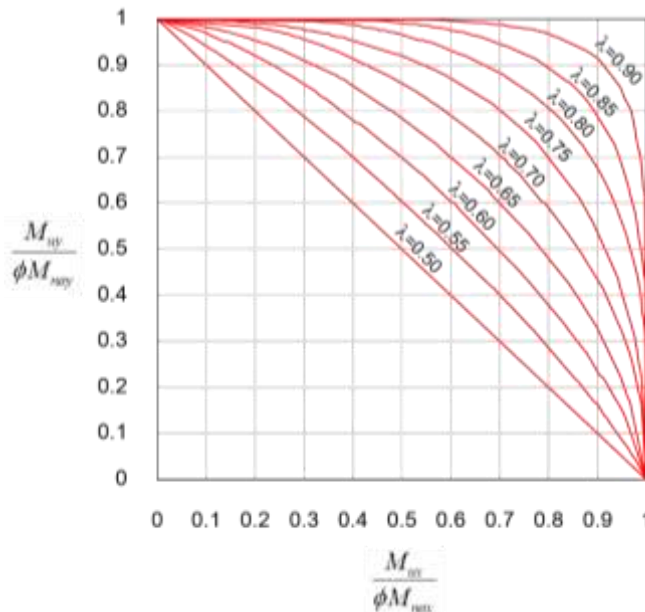
4.4 การประเมินความสามารถของสะพานที่มีอยู่จากมาตรฐานการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว

สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการประเมินอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถ (DCR) ของเสาสะพานที่มีอยู่ถูกออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2559 ว่ามีความสามารถในการต้านทานการไหวสะเทือนตามคู่มือกำหนดมากน้อยเพียงใด เมื่อกรมทางหลวงได้มีการกำหนดคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวในปี พ.ศ. 2559 หลังจากทำการคำนวณแรงอัดประลัยตามแนวแกน (N_u), แรงเฉือนประลัย (V_u) และโมเมนต์ดัดประลัย (M_u) ตามข้อกำหนดของคู่มือดังกล่าวที่ 2-4 แล้ว ต่อมาคำนวณหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดของหน้าตัด สำหรับการตรวจสอบอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถของโมเมนต์ดัด (DCR_M) จะสามารถคำนวณได้หลายวิธี งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี PCA Load Contour Method [16] ที่มีค่าแนะนำดังสมการที่ 12 โดยหาค่า M_n เทียบกับ M_u / ϕ ของแต่ละแนวแกน x, y จากสมการที่ 4 โดยที่ M_{nox} และ M_{noy} ที่ต้องใช้ในการคำนวณค่า DCR_M ในรูปที่ 3 จะได้จากโปรแกรม spColumn [14] ของแต่ละหน้าตัด ในขณะที่ค่าอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถสำหรับแรงเฉือน (DCR_V) จะเป็นไปตามสมการที่ 13 โดยหาค่า V_u จากสมการที่ 3 และ ϕV_n จากสมการที่ 6 โดยอัตราส่วนที่เกิดขึ้นในสมการที่ 12, 13 จากงานวิจัย Kim et al [17] ทำให้ทราบว่าหากเกิดแรงกระทำประมาณ 80% ของแรงต้านทานจะทำให้โครงสร้างเกิดการคราก ดังนั้นหากทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า DCR_M และ DCR_V มีค่ามากกว่า 0.80 แสดงถึงเสาต้นดังกล่าวอาจเกิดความเสียหายได้เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่คาบการสั่นตามที่คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว [5] กำหนด

$$DCR_M = \left(\frac{M_{ux}}{\phi M_{nox}} \right)^{\left(\frac{\log 0.5}{\log \lambda} \right)} + \left(\frac{M_{uy}}{\phi M_{noy}} \right)^{\left(\frac{\log 0.5}{\log \lambda} \right)} \quad (12)$$

$$DCR_V = \frac{V_u}{\phi V_n} \quad (13)$$

โดยที่ค่า λ มีค่าจากอัตราส่วน $\frac{M_u}{\phi M_{no}}$ ของแต่ละแนวแกนดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ความแข็งแรงของเสาที่มีโมเมนต์ดัดสองแกน [16]

5. ผลการประเมินดัชนีโครงสร้างของเสาสะพานประเภทเสาเดี่ยว

จากการวิเคราะห์แรงที่กระทำตามข้อแนะนำของคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวของกรมทางหลวงต่อกำลังของหน้าตัดเสาเดี่ยวทั้งต้นต้ายและต้นสูง 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 ($DCR_M \text{ or } V$) โดยมีข้อมูลทั่วไปของหน้าตัดแบ่งเป็นพื้นที่บริเวณกรุงเทพและปริมณฑลดังตารางที่ 3 และบริเวณภาคเหนือและตะวันตกดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ข้อมูลทั่วไปในการวิเคราะห์เสาบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล

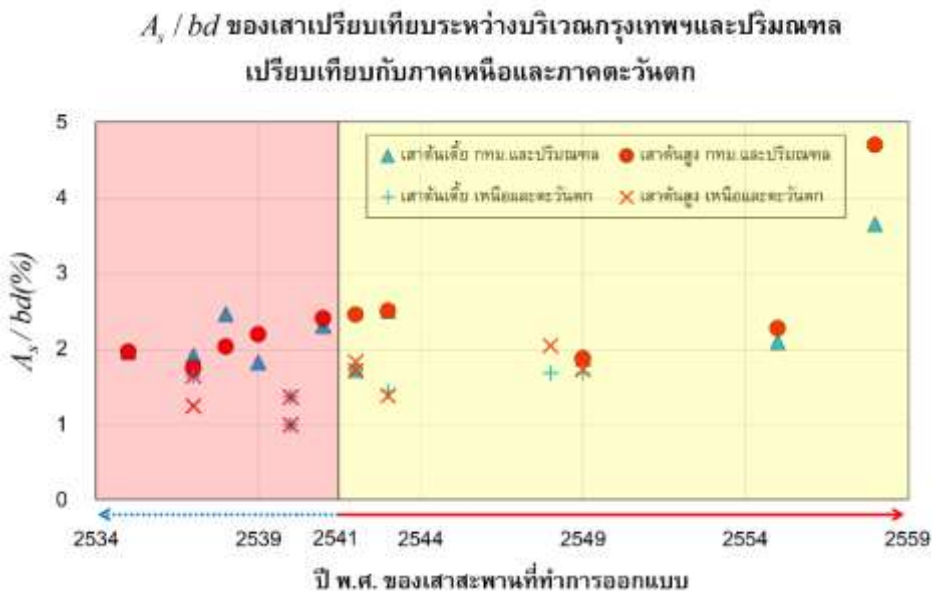
ลำดับ	รหัส	พื้นที่ หน้าตัดเสา (A_g , cm. ²)	พื้นที่หน้าตัด เหล็กยื่น (A_s , cm. ²)	พื้นที่หน้าตัด เหล็กปลอก (A_v , cm. ²)	ระยะเรียง เหล็กปลอก (s, cm)	ความสูง เสา (h, m)
1	1SC	18,800.00	369.60	5.40	30.00	5.10
2	1TC	23,800.00	468.16	5.40	30.00	10.00
3	2SC	49,087.39	936.32	4.52	20.00	7.00
4	2TC	70,685.83	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
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

ตารางที่ 4 ข้อมูลทั่วไปในการวิเคราะห์เสาบบริเวณภาคเหนือและตะวันตก

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
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

จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดของเสา ρ_l พบว่า ρ_l ของเสาบบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล และบริเวณภาคเหนือและตะวันตกในส่วนของต้นตึกกับต้นสูงตั้งแต่อดีตจนถึง พ.ศ. 2555 มีค่าใกล้เคียงกัน มีเพียงสะพานโครงการเดียวที่มี ρ_l แตกต่างจากสะพานทั้งหมด ดังรูปที่ 4 โดยคู่มือกำหนดไว้ให้ค่า ρ_l จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 แต่ไม่เกินร้อยละ 4 ซึ่งพบว่ามีเสาต้นสูง จำนวน 1 ต้นที่มีค่าสูงกว่าข้อกำหนด โดยความเหนียวของโครงสร้างขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการแต่ตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุดคือค่าอัตราส่วนเหล็กเสริม [15] ดังนั้นสะพานต้นสูงดังกล่าวอาจมีความเหนียวของโครงสร้างที่ต่ำกว่าที่คู่มือกำหนด และหากเปรียบเทียบ

ระหว่างเสาทั้ง 2 พื้นที่ จะพบว่าค่า ρ_l ในบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลจะมีค่ามากกว่าบริเวณภาคเหนือและตะวันตกดังตารางที่ 3 ทั้งนี้ค่า ρ_l แสดงถึงการควบคุมการวิบัติของหน้าตัด หากค่า ρ_l มีค่าที่สูงจะส่งผลให้หน้าตัดอาจเกิดการวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลัก เนื่องจากการวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลักหน้าตัดจะมีกำลังที่มากแต่จะมีความเหนียวของโครงสร้างลดลงซึ่งเป็นพฤติกรรมที่อันตราย ดังนั้นคู่มือจึงควบคุมไม่ให้ค่า ρ_l มีค่าเกินกว่าร้อยละ 4 แต่ถ้าหากมีค่าน้อยจะส่งผลให้ขนาดของหน้าตัดมีความใหญ่เกินไป ดังนั้นสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลจะมีความแข็งแรงของหน้าตัดที่สามารถรับกำลังได้มากแต่หากเกิดความเสียหายจะมีความอันตรายมากกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก 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 ซึ่งอยู่ประมาณช่วงกลางของค่าตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวกำหนด [5] อย่างเหมาะสมและแสดงให้เห็นถึงการออกแบบตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการเลือกวิธีการออกแบบหน้าตัดที่ไม่ได้มีการเสริมเหล็กยื่นที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 5

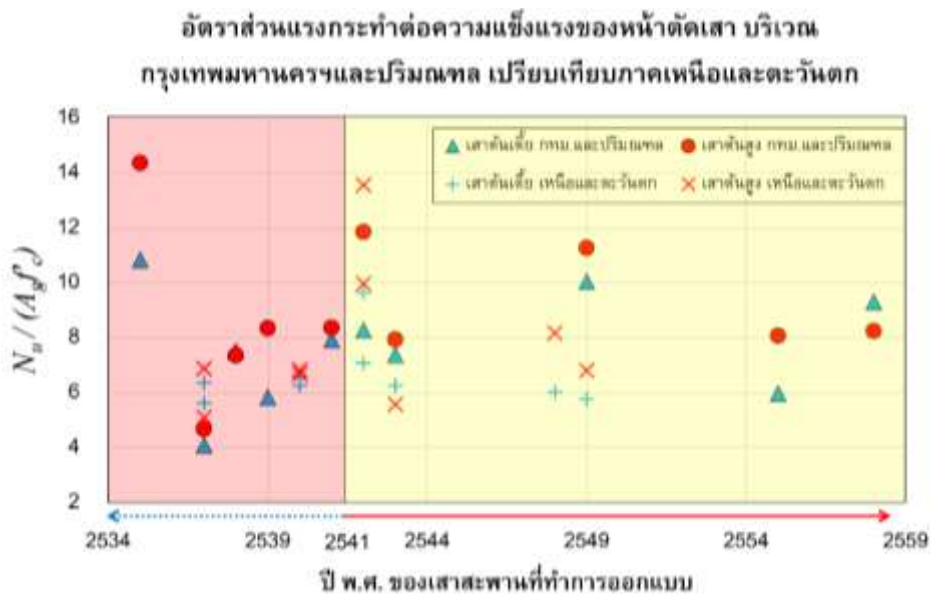


รูปที่ 4 อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อหน้าตัดเสาสะพาน (ρ_l) บริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลกับบริเวณภาคเหนือและตะวันตก

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อหน้าตัดเสาสะพาน (ρ_1)

บริเวณ	ช่วงปีพ.ศ.ออกแบบ	ต้นเตี้ย %	ต้นสูง %	ค่าเฉลี่ย %
กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล	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
เหนือและตะวันตก	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

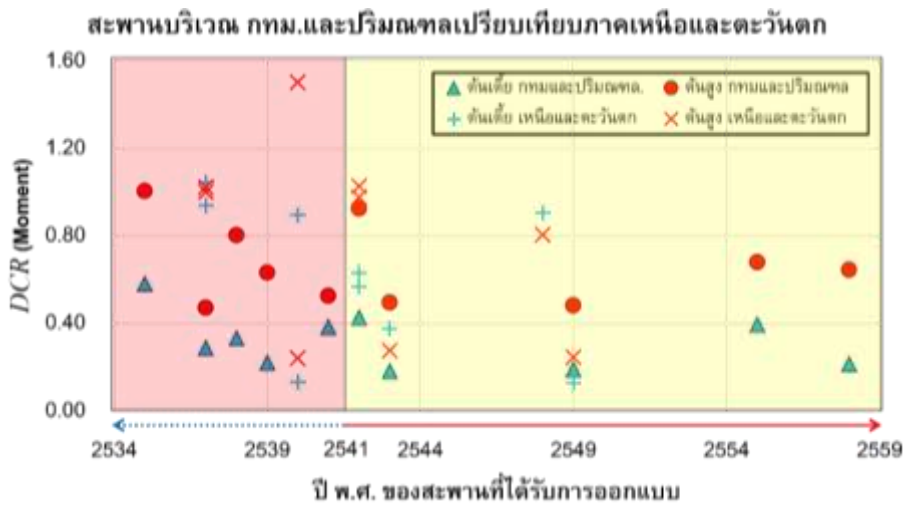
อัตราส่วนแรงอัดกระทำต่อความแข็งแรงของหน้าตัด σ_0 คือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเทียบกับกำลังของหน้าตัด จากผลการวิเคราะห์พบว่าเสาสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล และบริเวณภาคเหนือและตะวันตก ทั้ง 2 บริเวณมีค่า σ_0 ของต้นสูงมากกว่าต้นเตี้ยแสดงถึงการใช้งานกำลังของหน้าตัดในการรับแรงอัดที่สูงกว่าต้นเตี้ยดังรูปที่ 5 หากนำทั้ง 2 บริเวณมาเปรียบเทียบกับกันจะพบว่า σ_0 ของเสาสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลจะมีค่า σ_0 เท่ากับ 8.39 มากกว่าบริเวณภาคเหนือและตะวันตกที่มีค่า 7.19 แสดงว่าเสาสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลมีการใช้งานกำลังของหน้าตัดที่สูงกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกประมาณร้อยละ 1.2 ดังตารางที่ 6 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 หน้าตัด พบว่ามีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าร้อยละ 10 ของกำลังหน้าตัดแสดงให้เห็นถึงองค์อาคารหรือเสาที่นำมาวิเคราะห์มีพฤติกรรมเป็นลักษณะของคานซึ่งหมายถึงองค์อาคารที่รับแรงดัดเป็นหลักและมีแรงอัดกระทำบนหน้าตัดแต่ไม่เกิน $0.1f'_cA_g$ [15]



รูปที่ 5 อัตราส่วนแรงกระทำต่อความแข็งแรงของหน้าตัด (σ_0) บริเวณกรุงเทพและปริมณฑลกับบริเวณภาคเหนือและตะวันตก

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงอัดตามแนวแกนประลัยต่อความแข็งแรงของหน้าตัด σ_0

บริเวณ	ช่วงปีพ.ศ.ออกแบบ	ต้นเตี้ย %	ต้นสูง %	ค่าเฉลี่ย %
กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล	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



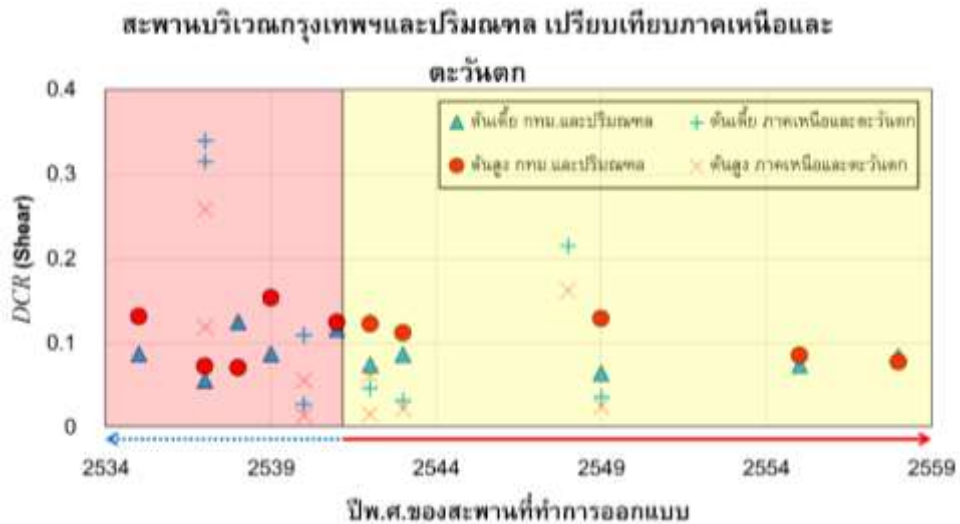
รูปที่ 6 อัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถ (DCR_M) ของโมเมนต์ดัดสองแกน สะพาน บริเวณกรุงเทพฯและปริมาณชลกับบริเวณภาคเหนือและตะวันตก

จากผลการวิเคราะห์ DCR_M สะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมาณชลของต้นสูงจะมีค่าเฉลี่ยมากกว่าต้นเตี้ย เช่นเดียวกับสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก ที่ต้นสูงก็มีค่า DCR_M ของโมเมนต์เฉลี่ย มากกว่าต้นเตี้ยเนื่องจากต้นสูงจะถูกโมเมนต์กระทำเนื่องจากความยาวของเสา โดยค่า DCR_M บริเวณกรุงเทพฯและปริมาณชลจะมีค่าเฉลี่ยที่ต่ำกว่าบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกแสดงถึงสมรรถนะในการต้านทานโมเมนต์ดัดสองแกนของเสาสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมาณชลที่ดีกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก เมื่อคำนึงถึงช่วงเวลาของการออกแบบ สะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 พบว่ามีค่าเฉลี่ย DCR_M มากกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 เช่นเดียวกันกับค่าเฉลี่ย DCR_M ทั้ง 2 บริเวณ พบว่าเสาสะพานต้นเตี้ยและต้นสูงที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 มากกว่าเสาสะพานต้นเตี้ยและต้นสูงที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 จากผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาแสดงถึงค่า DCR_M ของโมเมนต์ดัดสองแกนเสาสะพานต้นสูงที่มีค่าสูงกว่าต้นเตี้ยเสมอ เมื่อนำสะพานทั้ง 2 ช่วงเวลาที่มีการกำหนดแรงกระทำที่แตกต่างกันมาเปรียบเทียบกับกันด้วยคู่มือการออกแบบสะพานและถนนแสดงถึงสมรรถนะในการต้านทานโมเมนต์ดัดของสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 จะดีกว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 ที่มีค่า DCR_M สูงดังรูปที่ 6 และตารางที่ 7 โดยพบว่าสะพานบริเวณภาคเหนือมีค่า DCR_M ของสะพานที่ออกแบบก่อน พ.ศ. 2541 มีค่าเฉลี่ยมากกว่า 0.80 ซึ่งอาจเกิดจากในช่วงเวลาดังกล่าวยังไม่มีข้อบังคับของการกำหนดให้สะพานต้องมีการคำนวณแรงของแผ่นดินไหว จึงส่งผลให้สะพานมีค่าเฉลี่ย DCR_M ที่สูงถึง 0.85 ดังตารางที่ 7 แต่สำหรับการออกแบบสะพานในช่วงปีพ.ศ. 2542 – 2559 จะพบว่ามีค่า DCR_M โดยส่วนมากจะมีค่าน้อยกว่า 0.80 แต่ก็จะมีเพียง

ไม้ที่สะพานที่มีค่า DCR_M มากกว่า 0.80 อาจเป็นผลเนื่องมาจากไม่ได้มีการบังคับใช้มาตรฐานการออกแบบทำให้วิศวกรผู้ออกแบบยังคงใช้มาตรฐานเก่าช่วงการออกแบบก่อน พ.ศ. 2541 ที่ยังคำนึงถึงแรงแผ่นดินไหวไม่มากพอเป็นมาตรฐานในการคำนวณแต่ยังคงมีค่าเฉลี่ยของ DCR_M ในการออกแบบช่วงปี พ.ศ.2542-2559 เท่ากับ 0.60 ซึ่งมีสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวได้ เพราะฉะนั้นจากผลการวิเคราะห์พบว่าสะพานในประเทศไทยส่วนใหญ่มีความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดสองแกนที่เกิดจากแผ่นดินไหวได้ แต่จะมีสะพานต้นสูงบริเวณภาคเหนือของไทย และสะพานต้นสูงบางตัวของกรุงเทพฯและปริมณฑล ที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 ที่ควรต้องมีการเฝ้าระวังหรือเสริมกำลังเพื่อให้มีสมรรถนะที่เพียงพอต่อการต้านทานแผ่นดินไหว เมื่อใช้เกณฑ์ข้อแนะนำตามของคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวปี พ.ศ. 2559 เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบสะพาน

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสมารถ (DCR_M) ของโมเมนต์ดัดสองแกน

บริเวณ	ช่วงปีพ.ศ.ออกแบบ	ต้นเตี้ย	ต้นสูง	ค่าเฉลี่ย
กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล	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



รูปที่ 7 เปรียบเทียบอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถ (DCR_v) ของแรงเฉือนเสาสะพาน บริเวณกรุงเทพและปริมณฑลกับบริเวณภาคเหนือและตะวันออก

ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถ (DCR_v) ของแรงเฉือน

บริเวณ	ช่วงปีพ.ศ.ออกแบบ	ตื้นเตี้ย	ตื้นสูง	ค่าเฉลี่ย
กรุงเทพมหานครและปริมณฑล	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
เหนือและตะวันออก	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 สำหรับสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลพบว่าตื้นสูงมีค่าเฉลี่ย DCR_v มากกว่าตื้นเตี้ย ตรงข้ามกับกับสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันออกที่ตื้นสูงมีค่าเฉลี่ย DCR_v ของแรงเฉือนน้อยกว่าตื้นเตี้ยดังรูปที่ 7 แต่สำหรับทั้ง 2 บริเวณ แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย DCR_v แล้วจะมีค่าเท่ากันที่ 0.10 ดังตารางที่ 8 เมื่อพิจารณาค่า DCR_v ของสะพานตามช่วงเวลา

การออกแบบจะพบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 มีสมรรถนะในการต้านทานแรงเฉือนที่ต่ำกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 และเมื่อพิจารณาสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลก่อนปี พ.ศ. 2541 จะพบว่ามีสมรรถนะในการต้านทานแรงเฉือนได้ต่ำกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกก่อนปี พ.ศ. 2541 แต่สะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตกที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 จะมีสมรรถนะในการต้านทานแรงเฉือนที่ดีกว่าสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล 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 ผู้วิจัยจึงถือว่าสะพานที่ก่อสร้างในประเทศไทยเพื่อต้านแผ่นดินไหวจึงไม่มีความน่าเชื่อถือต่อการเสียหายจากการเฉือนพัง



รูปที่ 8 ที่ตั้งและอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถ (DCR) ของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด เสาสะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล

รูปที่ 8 แสดงถึงตำแหน่งที่ตั้งของสะพานที่ถูกประเมินทั้ง 10 สะพานบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล โดย V คือค่า DCR_V , M คือค่า DCR_M , SC คือเสาต้นเดี่ยว และ LC คือเสาต้นสูง จะเห็นว่าเสาสะพานที่อยู่ในจังหวัดกรุงเทพและปทุมธานีจะมีค่า DCR_M ที่สูงกว่าจังหวัดปริมณฑลอื่นๆ ที่มีข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งจังหวัดที่อยู่ไกลออกไปจากจังหวัดกรุงเทพ อย่างจังหวัดสมุทรสาครและสมุทรสงครามจะมีค่า DCR_M ที่น้อยกว่าจังหวัดอื่นๆ ซึ่งถือว่าไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว รูปที่ 9 แสดงถึงตำแหน่งที่ตั้งของสะพาน

ที่ถูกประเมินทั้ง 9 สะพานบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกจะเห็นว่าเสาสะพานที่อยู่ในบริเวณตั้งแต่จังหวัดลำปางขึ้นไปทางเหนือของประเทศจะมี DCR_M ของเสาต้นสูงมีค่ามากกว่า 0.80 ซึ่งแสดงถึงสมรรถนะของเสาเมื่อเกิดแผ่นดินไหวขนาดคาบการสั่นตามคู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว [5] เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทตอม่อเสาเดี่ยวอาจได้รับความเสียหายบ้าง แต่สะพานที่ตั้งอยู่ถัดลงมาทางใต้ของจังหวัดลำปางจะพบว่าสะพานยังคงมีความปลอดภัยและมีค่า DCR ของโมเมนต์ดัดสองแกนและแรงเฉือนที่ต่ำซึ่งแสดงถึงสมรรถนะที่ดีในการต้านเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว



รูปที่ 9 ที่ตั้งและอัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยสามารถ (DCR) ของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด เสาสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก

6. สรุป

จากการวิเคราะห์เสาสะพานต้นเดี่ยวและต้นสูงของสะพานนั้นๆ จำนวน 19 สะพาน หรือ 38 เสา แบ่งเป็นบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลจำนวน 20 เสา และบริเวณภาคเหนือและตะวันตกจำนวน 18 เสา จากผลการวิเคราะห์จะพบว่าเสาสะพานในบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล และบริเวณภาคเหนือและตะวันตกมีอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด (ρ_l) เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.96 ซึ่งถือว่ามีความสามารถและเหมาะสมในการต้านทานการวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลักได้ตามที่คู่มือกำหนด ในเรื่องอัตราส่วนแรงอัดกระทำตามแนวแกนที่เกิดขึ้นต่อกำลังของหน้าตัด (σ_o) เสาสะพานจำนวน 38 เสาทั้ง 2 บริเวณ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 7.82 โดยสะพานบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลจะมีอัตราส่วนแรงอัดกระทำตามแนวแกนบนหน้าตัดเสาที่สูงกว่าสะพานบริเวณ

ภาคเหนือและตะวันตก และเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาของการออกแบบสะพานจะพบว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 มีอัตราส่วนแรงอัดกระทำตามแนวแกนบนหน้าตัดเสาที่ต่ำกว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 และการที่แรงอัดกระทำตามแนวแกนบนหน้าตัดทั้งหมด 38 หน้าตัดมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าร้อยละ 10 ของกำลังหน้าตัดบ่งบอกถึงองค์อาคารหรือเสาที่นำมาวิเคราะห์ที่มีพฤติกรรมเป็นลักษณะของคาน

สำหรับ DCR_M ของเสาสะพาน 38 เสา พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.60 ซึ่งถือว่ามีความสมรรถนะในการต้านแผ่นดินไหวที่ดี จากผลการวิเคราะห์ DCR_M ของสะพานบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล ที่น้อยกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก ส่งผลให้สะพานบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล มีสมรรถนะที่ดีกว่าสะพานบริเวณภาคเหนือและตะวันตก ซึ่งเข้าใจได้ว่าพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑลเป็นจุดยุทธศาสตร์สำคัญของประเทศทำให้วิศวกรผู้ออกแบบมีความจำเป็นในการออกแบบความสามารถให้สามารถใช้งานได้หากเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ขึ้นและขนาดของแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นยังไม่รุนแรงเหมือนกับภาคเหนือที่มีค่า DCR_M ของเสาต้นสูงที่มีค่าสูงมากกว่า 0.80 เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาในการออกแบบจะพบว่าสะพานที่ออกแบบช่วงปี พ.ศ. 2542-2559 มีสมรรถนะในการต้านแผ่นดินไหวที่ดีกว่าสะพานที่ออกแบบก่อนปี พ.ศ. 2541 ซึ่งจะเห็นว่าเสาสะพานตั้งแต่อดีตจนถึงปี พ.ศ. 2559 มีแนวโน้มของสมรรถนะที่ดีขึ้น เมื่อใช้คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวเป็นเกณฑ์การตรวจสอบ ซึ่งอาจเกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นทั่วโลกและเกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก ทำให้ผู้ออกแบบ และเกณฑ์ข้อกำหนดต่างๆ กำหนดการออกแบบหน้าตัดให้มีความสมรรถนะที่เพียงพอสามารถใช้งานอยู่ได้หากเกิดเหตุแผ่นดินไหวตามสถานที่ต่างๆ ขึ้น และจากการวิเคราะห์สำหรับเสาที่มีค่า DCR_M สูงกว่า 0.80 เพื่อให้การวิเคราะห์มีความใกล้เคียงมากขึ้น อาจจะต้องนำเสาในต้นนั้นๆ ไปทำการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear analysis) เพื่อทำการวิเคราะห์ DCR_M ให้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้นเพื่อทำการเสริมกำลังที่เพียงพอต่อไป และยังพบว่าเสาสะพานตั้งแต่จังหวัดลำปางลงมาทางใต้ของบริเวณภาคเหนือและตะวันตกมีค่า DCR_M ต่ำดังนั้นสามารถลดปริมาณวัสดุก่อสร้างลงได้ แต่เสาสะพานยังคงมีสมรรถนะที่เพียงพอเมื่อเกิดแผ่นดินไหว สำหรับ DCR_V จากเสาสะพาน 38 เสา พบว่ามีค่าเฉลี่ยเพียง 0.10 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับค่า DCR_M ที่มีค่าเฉลี่ยถึง 0.60 ดังนั้นจะถือว่าสะพานทั้งหมดภายในประเทศไทยไม่มีความเสี่ยงต่อการวิบัติด้วยแรงเฉือนเมื่อใช้คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหวเป็นเกณฑ์เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการสำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง ดร.สุกิจ ยินดีสุข นายสุรเชษฐ์ เลขาจารกุล และนายอินศวร มณีธร เจ้าหน้าที่กรมทางหลวงที่ได้ให้การสนับสนุนในการ

ค้นหาแบบก่อสร้างของสะพานประเภทเสาเดี่ยวยกคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบและก่อสร้างตั้งแต่อดีตจนถึงปี พ.ศ.2559 ซึ่งอยู่ในความดูแลของกรมทางหลวงบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ภาคเหนือ และภาคตะวันตก

References

- [1] Ministerial regulations. Determine the weight, resistance, durability of buildings and ground that supports buildings to resist the vibration of earthquakes; 1997. (In Thai)
- [2] AASHTO. Standard specification for highway bridges. Washington, DC: American association of state highway and transportation officials; 1973.
- [3] Warnitchai P, Lisantono A. Seismic risk analysis for Thailand. Engineering journal of research and development 1994;5(1):69-91. (In Thai)
- [4] AASHTO. Standard specification for highway bridges. Washington, D.C.: American association of state highway and transportation officials; 2002.
- [5] Department of highways. Manual of bridge and load designs for seismic resistant. Bangkok: Department of highways, Ministry of transport; 2016. (In Thai)
- [6] Department of public works and town and country planning. Earthquake resistant building design standards, (มยผ. 1302-52). Bangkok: S.P.M. Printing; 2009. (In Thai)
- [7] Department of public works and town and country planning. Earthquake resistant building design standards, (มยผ.1301/1302-61). Bangkok: S.P.M. Printing; 2018. (In Thai)
- [8] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications. Washington, D.C.: American association of state highway and transportation officials; 2010.
- [9] Chaimahawan P, Pimanmas A. Simple seismic evaluation methodology for gravity-designed reinforced concrete building. Engineering journal of research and development 2007;18(1):35-45.
- [10] 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.
- [11] Joyklad P, Pimanmas A. Assessment of seismic performance of existing bridge piers in bangkok. Proceedings of the sixth regional symposium on infrastructure development (RSID6); 2009 January 12-13; Bangkok, Thailand.
- [12] Kaewnurachadasorn T. Seismic evaluation and retrofit of a bridge [thesis]. Bangkok: Chulalongkorn university; 2012. (In Thai)

- [13] Kaeoudon M, Thepchai P, Ritthisart S. A comparative study of seismic base shears for designing of bridges in Thailand [Senior project]. Nakhonnayok: Srinakharinwirot university; 2016. (In Thai)
- [14] Structurepoint. spColumn. Skokie, IL: Structurepoint LLC; 2019.
- [15] Joyklad P. Reinforced concrete design [Teaching documents]. Nakhonnayok: Department of civil engineering; Faculty of engineering, Srinakharinwirot University; 2015. (In Thai)
- [16] Mahmoud E. Kamara and Lawrence C. Novak, editors. Notes on ACI 318-11 building code requirement for structure concrete. Portland cement association; 2013.
- [17] Kim I, Okamura H, Maekawa K. Method for checking seismic performance of concrete structures and its effectiveness. Journal of Structural Engineering 1998;44A:871-76.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ปกรณ์ภัทร บุดชา นิสิตปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ 63 หมู่ 7 ถนน รังสิต-นครนายก ต.องครักษ์ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120
E-Mail: pagornphat.bud@g.swu.ac.th



ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 63 หมู่ 7 ถนน รังสิต-นครนายก ต.องครักษ์ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120
Email: panuwatj@g.swu.ac.th

Article History:

Received: April 26, 2020

Revised: June 19, 2020

Accepted: July 29, 2020