

การปรับปรุงสะพานทางหลวงจากผลกระทบแผ่นดินไหวด้วยระบบแยกฐานและการเสริมค่าความหน่วงโดยใช้เหล็กดัด SEISMIC IMPROVEMENT OF HIGHWAY BRIDGES USING BASE ISOLATION AND SUPPLEMENTARY DAMPING BY STEEL DOWEL BARS

ยงศักดิ์ จิระตระกูลธรรม^{1,*} และ อาณัติ เรืองรัมย์²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

Corresponding author address: yongsak.jie@gmail.com^{1,}, anat.r@chula.ac.th²

บทคัดย่อ

การออกแบบโครงสร้างสะพานภายใต้แรงแผ่นดินไหวด้วยระบบแยกฐาน (Isolated bridge system) สามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากแรงกระทำได้เป็นอย่างดี แต่ในขณะเดียวกันกลับทำให้โครงสร้างสะพานส่วนบนเกิดการเคลื่อนตัวที่มากขึ้นเป็นผลให้เกิดการชนกันระหว่างชิ้นส่วน และเกิดการวิบัติจากระยะรองรับช่วงสะพานที่ไม่เพียงพอ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลตอบสนองของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานที่ถูกออกแบบด้วยระบบดังกล่าว โดยมีการปรับปรุงโครงสร้างสะพานด้วยการติดตั้งเหล็กดัดเป็นอุปกรณ์ยึดตรึงเพื่อป้องกันการชนกันของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานส่วนบน ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม SAP2000 การศึกษาเลือกพิจารณาสะพานตัวอย่างจากแบบมาตรฐานโครงสร้างสะพานของกรมทางหลวง ซึ่งเป็นสะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ มีความยาวช่วงเสา 20 เมตร ทั้งหมด 5 ช่วง มีการติดตั้งแผ่นยางรองคานสะพาน (Elastomeric bearing) เป็นอุปกรณ์แยกฐาน และสมมติว่าเป็นสะพานที่ตั้งอยู่ในจังหวัดเชียงใหม่ของประเทศไทย นอกจากนี้จะทำการคัดเลือกคลื่นแผ่นดินไหวจากฐานข้อมูลของศูนย์วิจัยด้านแผ่นดินไหวแห่งแปซิฟิก โดยชุดคลื่นแผ่นดินไหวจะมีขนาด 5.7 ถึง 6.5 และมีระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัดไม่เกิน 30 กิโลเมตร หลังจากทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงพลศาสตร์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลาเพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของโครงสร้างระหว่างโครงสร้างสะพานเดิม กับโครงสร้างสะพานที่ถูกปรับปรุง จากผลการวิเคราะห์พบว่าเหล็กดัดช่วยลดระยะการเคลื่อนตัวและแรงกระแทกระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพานส่วนบนมีค่าน้อยลง แต่ในทางกลับกันผลตอบสนองและแรงปฏิกิริยาบริเวณฐานเสาต่อมามีค่าสูงมากขึ้น

คำสำคัญ: ระบบสะพานแบบแยกฐาน, ผลกระทบจากการชนกันของชิ้นส่วนโครงสร้าง, แผ่นยางรองคานสะพาน, เหล็กดัด, การวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา

Abstract

Isolated bridge systems under earthquake excitation can minimize certain effects, but the superstructure induces greater displacement, posing the risk of pounding effect and failure in an unseating situation. This research aimed to learn about the seismic behavior of bridge elements designed using the isolated bridge system under earthquake excitation and improved the bridge by adding dowel bars as restrainers to prevent the pounding effect. The structural responses were obtained using the finite element analysis method, which used the SAP2000 software. The study considered bridge examples from the standard bridge plan from the Department of Highway (DOH). The bridge was a prestressed concrete I-girder bridge with a span length of 20 m for 5 spans and installed Elastomeric bearings as isolating devices. The bridge was assumed to establish in Chiang-Mai (Thailand). The earthquake waves were selected from the database of the Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). The ground motion sets had a magnitude of 5.7 to 6.5, and the distance from the source to the measuring station was less than 30 kilometers. After the bridge structure model was constructed, the structural analysis was performed by a dynamic method with Nonlinear response time history analysis (NLRHA). This analytical method was set up to compare the response between the original structure and the retrofitted structure with restrainer by using dowel bars. The results show that the dowel bars can reduce the superstructure displacement and pounding force, but the piers have the increase in the reaction.

Keywords: Isolated bridge system, Pounding effect, Elastomeric bearing, Dowel bar, Nonlinear response time history analysis

1. บทนำ

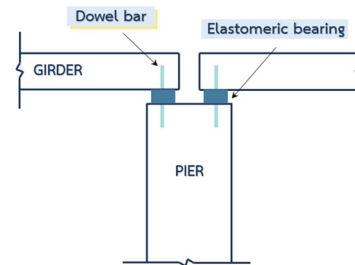
เหตุการณ์แผ่นดินไหวในอดีตที่รุนแรง เช่น แผ่นดินไหว San Fernando (1971), Northridge (1994) ในประเทศสหรัฐอเมริกา แผ่นดินไหว Kobe (1995) ในญี่ปุ่น และแผ่นดินไหว Chi-Chi ในสาธารณรัฐจีน (ไต้หวัน) ได้สร้างความเสียหายต่อโครงสร้างสะพาน ส่งผลให้เกิดการวิบัติของชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในโครงสร้างจนถึงการวิบัติของโครงสร้างสะพานทั้งหมด [1] จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าในอดีตมีงานวิจัยจำนวนมากถูกคิดค้นและพัฒนาเพื่อนำเสนอวิธีการต่าง ๆ ในการบรรเทาผลกระทบจากแผ่นดินไหว เช่น งานวิจัยของ Li and Conte [2]; Priestley et al. [3] ได้นำเสนอผลการตอบสนองของโครงสร้างสะพานที่ถูกออกแบบด้วยระบบแยกฐาน (Isolated bridge system) โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์แยกฐาน (Isolator) ซึ่งผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าระบบดังกล่าวทำให้ค่าคาบการสั่นธรรมชาติมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความเร่งตอบสนองจากแรงแผ่นดินไหวลดลง ผลดังกล่าวสามารถช่วยลดผลการตอบสนองอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหว ณ บริเวณเสาตอม่อของโครงสร้างสะพานส่วนล่างได้เป็นอย่างดี เช่น ค่าแรงเฉือนและค่าโมเมนต์ดัดที่ฐานของเสาตอม่อ ซึ่งจะทำให้การวิบัติของโครงสร้างสะพานส่วนล่างเป็นไปได้ยากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการติดตั้งอุปกรณ์ Isolator กลับส่งผลกระทบต่อทำให้โครงสร้างสะพานส่วนบนมีระยะการเคลื่อนตัวมากขึ้น ทำให้เกิดการกระแทกกระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพานส่วนบน โดย Jankowski and Mahmoud [4] ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานที่ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากการกระแทก ซึ่งจะพบว่าผลของการกระแทกจะทำให้ค่า Relative displacement ของโครงสร้างสะพานส่วนบนเพิ่มสูงขึ้น และการเคลื่อนที่ของโครงสร้างส่วนบนอาจทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น คานสะพาน, พื้นสะพาน เคลื่อนตัวออกจากจุดรองรับซึ่งจะทำให้โครงสร้างดังกล่าวพังถล่มลงมา [3]

การเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพานส่วนบนนำมาซึ่งการวิบัติจากระยะรองรับช่วงสะพานที่ไม่เพียงพอ การวิบัติดังกล่าวทำให้มีงานวิจัยได้ศึกษาค้นคว้าเพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น เช่น งานวิจัยของ Abdel Raheem [5]; Liu and Gao [6] ได้ทำการศึกษาสะพานที่ถูกติดตั้งอุปกรณ์ยึดรั้งเพิ่มเติมเพื่อลดระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพานส่วนบน โดย

Liu และ Gao [6] ได้นำแท่งเหล็กมาใช้เป็นอุปกรณ์ยึดรั้งระหว่างคานสะพานและเสาตอม่อ ซึ่งวัสดุประเภทเหล็กมีความเหนียวสามารถช่วยต้านทานไม่ให้คานสะพานเกิดการเคลื่อนตัวที่มากเกินไปและพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของแท่งเหล็กยังสามารถช่วยสลายพลังงานที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวได้อีกด้วย

ปัญหาการวิบัติจากระยะรองรับช่วงสะพานที่ไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นผลจากการตอบสนองของโครงสร้างสะพานที่ถูกออกแบบด้วยระบบแยกฐาน เป็นส่วนสำคัญของปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพาน

และเป็นที่มาในการศึกษาวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำแนวคิดการเสริมเหล็กเส้นรับแรงเฉือนหรือเหล็กเดือย มาใช้ติดตั้งเป็นอุปกรณ์ยึดรั้ง โดยจะเลือกใช้เหล็กข้ออ้อย ขนาด 25 มิลลิเมตร ติดตั้งควบคู่ไปกับอุปกรณ์แยกฐาน ซึ่งเป็นแผ่นรองคานสะพานประเภท Elastomeric bearing เพื่อช่วยลดผลการตอบสนองจากแรงแผ่นดินไหว และป้องกันการเกิดการวิบัติแบบ Unseating เนื่องจากเหล็กเดือยเป็นชิ้นส่วนในงานก่อสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย พฤติกรรมของเหล็กเดือยมีลักษณะคล้ายคลึงกับแท่งเหล็กที่เคยถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ Restrainer โดยการติดตั้งเหล็กเดือยจะติดตั้งในลักษณะคล้ายคลึงกับการติดตั้งแท่งเหล็กจากงานวิจัยของ Liu and Gao [6] ซึ่งถูกติดตั้งบนโครงสร้างสะพานยึดระหว่างคานสะพานและเสาตอม่อ ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ยึดรั้งร่วมกับแผ่นยางรองคานสะพานจะมีลักษณะดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แบบจำลองแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ยึดรั้ง (Restrainer) โดยใช้เหล็กเดือย

2. การจำลองโครงสร้างสะพาน

การจำลองโครงสร้างสะพานจะเลือกใช้การจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะจำลองเป็นโครงสร้างสามมิติผ่านโปรแกรม SAP2000 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.1. โครงสร้างสะพานที่ใช้ในการศึกษา

โครงสร้างสะพานที่เลือกศึกษาเป็นโครงสร้างสะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ เลือกใช้แบบมาตรฐานโครงสร้างสะพานของกรมทางหลวง (2558) ลักษณะของโครงสร้างสะพานโดยรวมจะมีความยาวช่วงเสา 20 เมตร กว้าง 8 เมตร มีช่วงสะพานทั้งหมด 5 ช่วง โครงสร้างสะพานดังกล่าวจะไม่มีคานวางตัวแบบเฉียง โดย Skew angle จะมีค่าเท่ากับ 0 องศา ชิ้นส่วนของโครงสร้างย่อย ๆ จะประกอบไปด้วย โครงสร้างสะพานส่วนบน ได้แก่ คานสะพาน, พื้นสะพาน โครงสร้างสะพานส่วนล่าง ได้แก่ คานรัดเสาตอม่อ และเสาตอม่อ สูง 10 เมตร สำหรับส่วนเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่าง จะมีแผ่นรองคานสะพาน โดยได้เลือกใช้เป็น Elastomeric bearing สำหรับส่วนปลายทั้งสองฝั่งของโครงสร้างสะพานจะมีตอม่อริม ซึ่งเป็นโครงสร้างตอม่อริมแบบ Seat-type abutment โดยรายละเอียดของโครงสร้างจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1

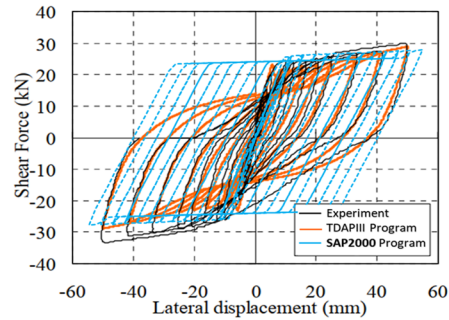
2.2. การสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานส่วนบนและล่าง

โครงสร้างสะพานส่วนบน จะประกอบไปด้วยแผ่นพื้นสะพานและคานรองรับแผ่นพื้น ซึ่งจะพิจารณาน้ำหนักแผ่นพื้นผ่านแรงกระทำแบบสม่ำเสมอกระทำคานด้านล่าง โดยคานดังกล่าวจะเลือกใช้เป็นอีลิเมนต์ประเภท Linear-elastic beam-column สำหรับคานรัดเสาตอม่อ จะถูกพิจารณาให้เป็นชิ้นส่วนที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น โดยเลือกใช้อีลิเมนต์เช่นเดียวกับคานรองรับแผ่นพื้น สำหรับการจำลองเสาตอม่อจะเลือกใช้ Fiber element โดยในบริเวณจุดหมุนพลาสติกจะพิจารณาเป็นพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น ในขณะที่บริเวณทั่วไปของเสาตอม่อนอกเหนือจุดหมุนพลาสติก จะถูกจำลองด้วย Elastic frame element สำหรับระยะของจุดหมุนพลาสติก จะอ้างอิงสูตรการคำนวณจากมาตรฐาน Caltrans (2013) [7] ดังสมการที่ (1)

$$L_p = 0.08L + 0.022f_{yc}d_{bl}, L_p \geq 0.044f_{yc}d_{bl} \quad (1)$$

เมื่อ L_p คือระยะจุดหมุนพลาสติก, f_{yc} คือ กำลังจุดครากของเหล็กเสริมที่คานค้ำ และ d_{bl} คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาว

สำหรับการจำลองโครงสร้างสะพานส่วนล่างได้มีการเปรียบเทียบแบบจำลองเพื่อเช็คความถูกต้องและความเหมาะสมในการใช้งานแบบจำลองส่วนของโครงสร้างดังกล่าวโดยทำการจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP2000 โดยทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของโครงข้อแข็งกับผลการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบวิถัจจรจากงานวิจัยของ Anil and Altin [8] จากการเปรียบเทียบพบว่าผลการตอบสนองของโครงข้อแข็งมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดสอบ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.2 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของแบบจำลอง เมื่อพิจารณาจากกราฟฮิสเทอรีซิสจะพบว่าการสลายพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าความเป็นจริง



รูปที่ 2.2 ผลการตอบสนองของโครงข้อแข็งภายใต้แรงกระทำแบบวิถัจจร [8, 9]

2.1. การสร้างแบบจำลองรอยต่อระหว่างชิ้นส่วน

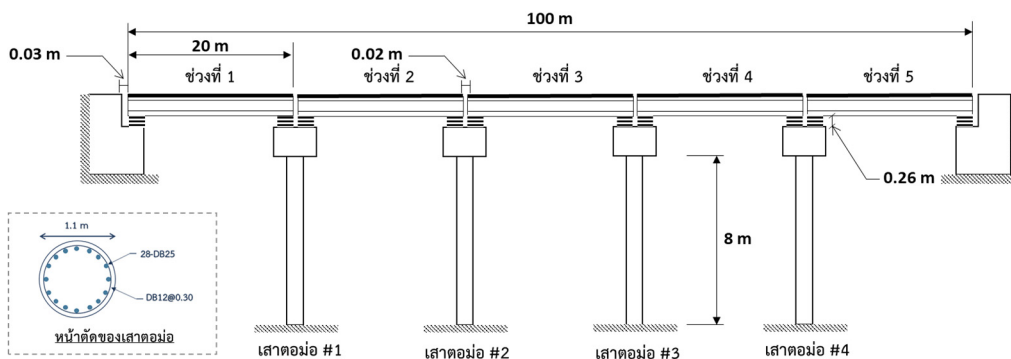
งานวิจัยนี้เลือกจำลองรอยต่อระหว่างชิ้นส่วน (Gap element) ด้วย แบบจำลอง Linear spring ดังรูปที่ 2.3 a.) แบบจำลองดังกล่าวจะเกิดแรงกระทำเมื่ออีลิเมนต์หดตัวเกินกว่าระยะช่องว่างที่กำหนด (d_0) โดยแรงกระทำนี้เปรียบเสมือนแรงกระทำระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้างซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัวของอีลิเมนต์ ดังสมการที่ (2)

$$f = \begin{cases} k(d + d_0) & \text{if } d + d_0 < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

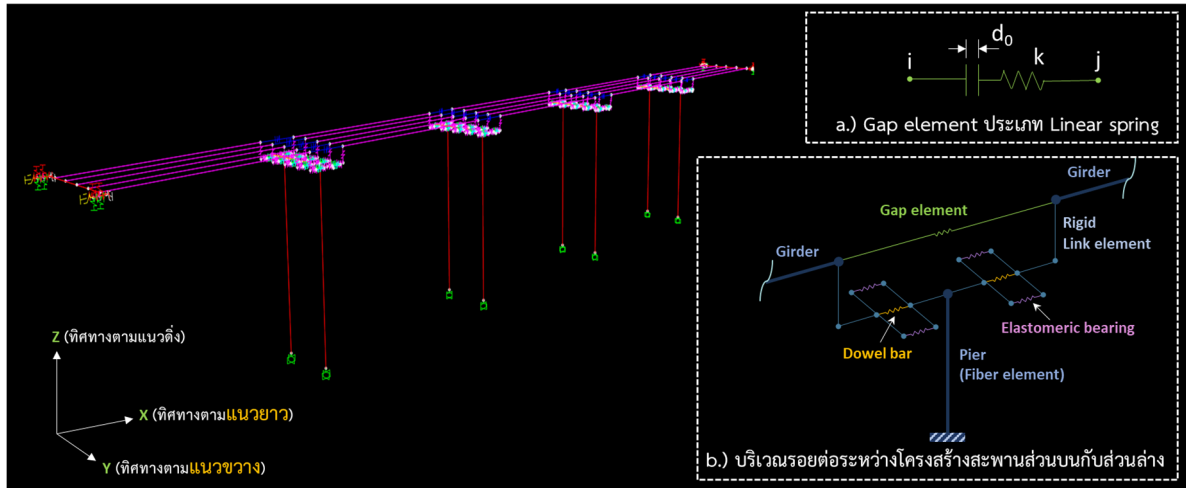
$$k = n \frac{EA}{L} \quad (3)$$

เมื่อ d คือ การเคลื่อนตัวของอีลิเมนต์, d_0 คือ ระยะช่องว่าง, E , A , L คือ ค่าคุณสมบัติของวัสดุและหน้าตัดของชิ้นส่วนที่อยู่บริเวณรอยต่อช่องว่าง และ n คือ ค่าอัตราส่วนของสติฟเนสของ Gap element [10]

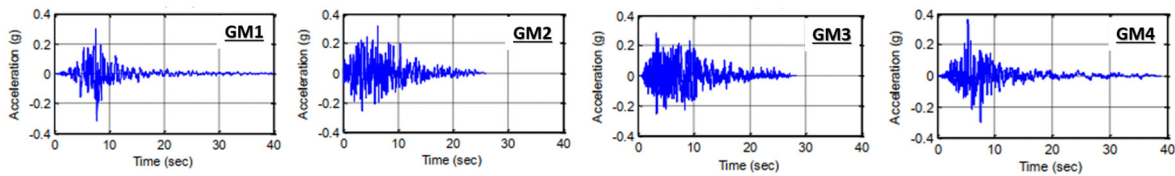
สำหรับค่าสติฟเนสของ Gap element จะพิจารณาจากผลของแรงตามแนวแกนซึ่งจะสอดคล้องไปกับค่าสติฟเนสตามแนวแกน (Axial stiffness) ของชิ้นส่วนโครงสร้างที่อยู่บริเวณรอยต่อ ดังสมการที่ (3) โดยค่าอัตราส่วน n Huo and Zhang [11] ได้แนะนำให้ใช้ค่า n เท่ากับ 16 และ 10 สำหรับช่วงรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนคานสะพาน และรอยต่อระหว่างคานสะพานกับตอม่อริมประเภท Seating ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างสะพานที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 2.2 แบบจำลองโครงสร้างสะพาน



รูปที่ 2.3 ประวัติเวลาความเร่งของพื้นดิน สำหรับใช้ในการวิเคราะห์แผ่นดินไหวในจังหวัดเชียงใหม่

2.2. การสร้างแบบจำลองแผ่นรองคานสะพาน

การจำลองแผ่นรองคานสะพาน จะเลือกพิจารณาในช่วงที่แผ่นรองมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) โดยจะเลือกใช้แผ่นยางที่มีค่า โมดูลัสของแรงเฉือน เท่ากับ 0.64 MPa โดยจะพิจารณาคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ค่าสติฟเนสในแนวตั้ง (K_v) และแนวราบ (K_h) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ [12]

$$K_v = \frac{E_c A}{t_r} \quad (4)$$

$$K_h = \frac{GA}{t_r} \quad (5)$$

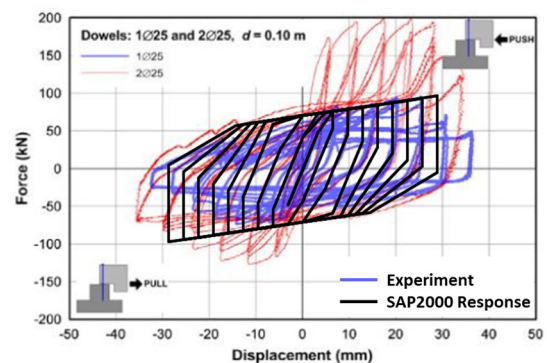
เมื่อ E_c คือ ค่าโมดูลัสจากผลของแรงอัด, A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นรอง, t_r คือ ความหนาของแผ่นยางทั้งหมดที่อยู่ในแผ่นรอง และ G คือ ค่าโมดูลัสความเฉือนของแผ่นยาง

2.3. การสร้างแบบจำลองของเหล็กเดือย

การจำลองเหล็กเดือยจะพิจารณาพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น โดยกำหนดให้ใช้แบบจำลองพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสแบบ Kinematic แบบจำลองประเภทนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความเหนียวและคำนึงถึงการสลายพลังงานจากการครากของชิ้นส่วน [10] ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวในแนวราบที่นำไปใช้ในการจำลอง จะเลือกใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์แบบ Bilinear ของเหล็กข้ออ้อยขนาด 25 mm ซึ่งอ้างอิงมาจากการทดสอบการตอบสนองของเหล็กที่ติดตั้งระหว่างชิ้นส่วนจำลองคานกับเสา

โดยมีแผนยารองรับภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรดังรูปที่ 2.4 [13]

นอกจากนี้ยังทำการสอบเทียบแบบจำลองซึ่งจะตรวจสอบพฤติกรรมของแบบจำลองเหล็กเดือย โดยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวในแนวราบมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่นำมาอ้างอิงโดยพิจารณาได้จากกราฟเส้นสีดำในรูปที่ 2.4 และกราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเหล็กเดือยมีความสามารถในการเสียรูปอย่างแบบพลาสติกซึ่งเป็นผลให้คานด้านบนสามารถที่จะยับยั้งเคลื่อนตัวได้



รูปที่ 2.4 พฤติกรรมฮิสเทอรีซิสของเหล็กเดือยจากการทดสอบแบบวัฏจักร [13]

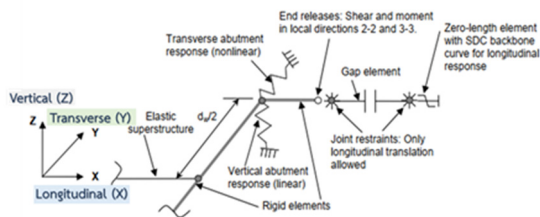
2.4. การสร้างแบบจำลองของตอม่อริม

การจำลองตอม่อริมจะเลือกแบบจำลองประเภท Simplified abutment โดยจะมีส่วนประกอบดังรูปที่ 2.6 แบบจำลองดังกล่าวจะมีการกำหนดการตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นใน 2 ทิศทาง คือ แนวยาว และแนวขวาง สำหรับแนวตั้งจะพิจารณาเฉพาะค่าสติเฟนส (K_v) ของแผ่นรองคานสะพาน โดยในแนวยาวและแนวขวางจะมีการจำลองพฤติกรรมของดินถมที่กระทำต่อตอม่อริม ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะอ้างอิงการคำนวณจากมาตรฐาน Caltrans (2013) [7] ดังสมการที่ (6) และ (7) นอกจากนี้ผลการตอบสนองในแนวยาวจะพิจารณาถึงผลของช่องว่าง และจะไม่ได้คำนึงถึงผลของการต้านทานแรงเฉือนของแผ่นรองคานสะพาน

$$K_{abutment} = K_i \times W \times \left(\frac{h}{1.7}\right) \quad (6)$$

$$P_{bw} = A_e \times 239 \times \left(\frac{h}{1.7}\right) \quad (7)$$

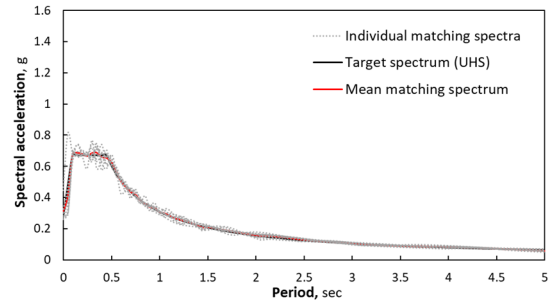
เมื่อ K_i คือ ค่าสติเฟนสเริ่มต้น โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 28.7 kN/mm/1m, W คือ ความกว้างของกำแพงกันดิน, h คือ ความสูงของกำแพงกันดิน, A_e คือ พื้นที่ประสิทธิผลของกำแพงกันดิน



รูปที่ 2.6 แบบจำลองตอม่อริมแบบ Simplified abutment [14]

3. คลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกใช้ในการศึกษา

ประวัติเวลาความเร่งของพื้นดินจะถูกนำไปปรับแก้ก่อนใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อให้สอดคล้องกับการสั่นไหวของพื้นดินที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้าง โดยจะทำการแปลงคลื่นแผ่นดินไหวให้เป็นกราฟผลการตอบสนองเชิงสเปกตรัมและนำไปเทียบเคียงหรือจับคู่ (Match) กับสเปกตรัมความเสี่ยงสม่ำเสมอ (Uniform hazard spectrum, UHS) สำหรับสเปกตรัมความเสี่ยงสม่ำเสมอ เป็นสเปกตรัมที่ได้มาจากการวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในเชิงความน่าจะเป็นตามมาตรฐาน ASCE 7-10 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.1 จะพบว่าค่าสเปกตรัมของประวัติเวลาที่ถูกปรับแก้ (Matching spectrum) มีค่าใกล้เคียงกับสเปกตรัมเป้าหมาย สำหรับงานวิจัยฉบับนี้จะเลือกพิจารณาคลิ้นแผ่นดินไหวเพียง 4 คู่ โดยจะถูกแทนชื่อเรียกด้วย GM1, GM2, GM3 และ GM4 ตามลำดับ โดยกราฟแสดงประวัติเวลาความเร่งของพื้นดิน ทั้ง 4 คลื่น สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.4 [15]



รูปที่ 3.1 การเปรียบเทียบ สเปกตรัมปรับแก้ กับ สเปกตรัมเป้าหมาย [15]

4. วิธีการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างสะพาน

หลักจากดำเนินการสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานในโปรแกรม SAP2000 เรียบร้อยแล้ว จะทำการวิเคราะห์โครงสร้างโดยพิจารณาวิธีการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ 2 วิธีการ ดังนี้

4.1. การวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างแบบโหมด (MODAL ANALYSIS)

การวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างแบบโหมด สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะเชิงพลวัตของโครงสร้างสะพาน เช่น ค่าคาบการสั่นธรรมชาติ และรูปร่างการสั่นไหวในแต่ละโหมด โดยรูปร่างการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานที่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ จะเลือกพิจารณารูปร่างการสั่นไหวของโครงสร้างในทิศทางตามแนวยาว (Longitudinal translation) เป็นหลัก

สำหรับการวิเคราะห์แบบโหมดจะเลือกใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical method) ด้วยวิธีการของ Rayleigh-Ritz หรือ Ritz Vector เพื่อลดทรัพยากรและระยะเวลาในการคำนวณ ซึ่งการคำนวณด้วยวิธีการดังกล่าวมีผลลัพธ์ไม่แตกต่างจากการคำนวณด้วย Eigen Vector [10] และจะพิจารณา Mode participation ratio ในแต่ละทิศทางการสั่นมีค่า 90% ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบโหมดโดยเฉพาะค่าคาบการสั่นธรรมชาติ จะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างแบบประวัติเวลา

4.2. การวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างแบบประวัติเวลา (RESPONSE HISTORY ANALYSIS)

สำหรับการวิเคราะห์แบบประวัติเวลาจะพิจารณาเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น โดยได้เลือกใช้วิธีการคำนวณสำหรับ RHA ด้วยวิธีการ Direct integration และพิจารณาค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Newmark constant acceleration ถ้าการคำนวณเกิดปัญหาการลู่เข้าของคำตอบ (Convergence problem) ให้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของ Hilber-Hughes-Taylor (HHT) แทน [14] สำหรับค่าความหน่วง

ของโครงสร้างจะเลือกพิจารณาที่ค่าความหน่วง 5% และพิจารณาเลือกค่าความหน่วงแบบ Rayleigh damping มาใช้ในการคำนวณเพื่อลดทอนทรัพยากรในการคำนวณให้เหมาะสม [10]

5. ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างสะพาน

ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างแบบโหมคพบว่า โครงสร้างสะพานก่อนการติดตั้งเหล็กเดือยจะมีค่าคาบการสั่นธรรมชาติในทิศทางตามแนวยาว 1.0140 วินาที และทิศทางตามแนวขวาง 0.6096 วินาที หลังทำการติดตั้งเหล็กเดือยจะมีค่าคาบการสั่นในทิศทางตามแนวยาวและแนวขวาง 0.8734 และ 0.4607 วินาที โดยจะสังเกตเห็นว่าค่าคาบการสั่นหลังการติดตั้งเหล็กเดือยมีค่าน้อยลง เป็นผลมาจากค่าสติเฟนของทั้งโครงสร้างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น สำหรับผลการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างแบบประวัติเวลาจะพิจารณาผลการตอบสนองในทิศทางตามแนวยาวเป็นหลัก ซึ่งพบว่าหลังทำการติดตั้งเหล็กเดือยทำให้ผลการตอบสนองของโครงสร้างสะพานมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากการปรับลดของค่าคาบการสั่นธรรมชาติแล้ว ยังมีผลอื่น ๆ เกิดขึ้น โดยตัวอย่างผลการตอบสนองจะมาจากคลื่นแผ่นดินไหว GM2 ที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานในทิศทางตามแนวยาว

เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองของโครงสร้างสะพานในทิศทางตามยาวจะพบว่า การเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพานส่วนบนบริเวณช่วงกลางหรือช่วงที่ 3 ของสะพาน จะมีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดทั้งก่อนและหลังทำการติดตั้งเหล็กเดือยอยู่ที่ 64.00 และ 55.68 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยมีการปรับลดลง 12.99% สำหรับค่าการเคลื่อนตัวดังกล่าวในแต่ละช่วงเวลา สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.5 a.) และเมื่อพิจารณาคลิ้นแผ่นดินไหวทั้ง 4 คลื่น จะพบแนวโน้มการลดลงทั้งหมด ดังรูปที่ 5.5 d.)

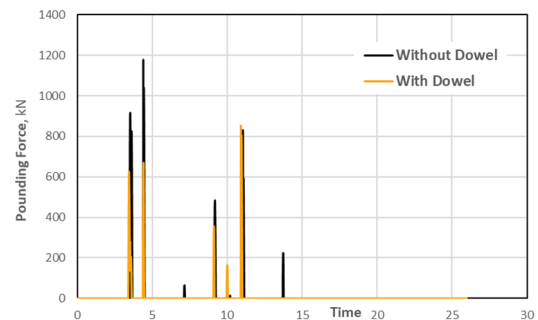
การเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพานส่วนบนเป็นผลทำให้เกิดการชนกันระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้าง โดยการชนกันดังกล่าวทำให้เกิดแรงกระแทก เมื่อทำการติดตั้งเหล็กเดือยจะช่วยลดแรงกระแทกที่เกิดขึ้นหรืออาจจะช่วยให้ไม่เกิดการชนกัน โดยพิจารณาแรงกระแทกทั้งก่อนและหลังการติดตั้งเหล็กเดือยได้จากตารางที่ 5.1 สำหรับตัวอย่างการเกิดแรงกระแทกในแต่ละช่วงเวลาสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.1 และเมื่อพิจารณาคลิ้นแผ่นดินไหวทั้ง 4 คลื่น ดังรูปที่ 5.2 จะแสดงให้เห็นถึงการลดลงของแรงกระแทกสูงสุดที่พิจารณาทั้งโครงสร้างหลังการติดตั้งเหล็กเดือย

ตารางที่ 5.1 แรงกระแทกระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งก่อนและหลังการติดตั้งเหล็กเดือย (GM2), kN

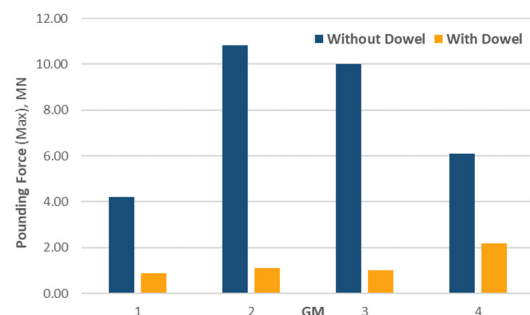
ตำแหน่ง	ก่อนการติดตั้ง	หลังการติดตั้ง
ตอม่อตบริม (ฝั่งซ้าย)	1,072.93	1,115.14
ตอม่อ #1	1,510.72	128.04
ตอม่อ #2	1,980.45	0.00
ตอม่อ #3	0.00	0.00
ตอม่อ #4	10,827.37	0.00
ตอม่อตบริม (ฝั่งขวา)	1,155.91	841.56

ถึงแม้หลังการติดตั้งเหล็กเดือยจะช่วยลดระยะเวลาการเคลื่อนตัวของโครงสร้างส่วนบน แต่ผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของเสาตอม่อกลับมีค่าสูงมากขึ้น โดยสามารถพิจารณาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และมุมความโค้งของจุดหมุนพลาสติกบริเวณด้านล่างเสาตอม่อหมายเลข 1 มีผลตอบสนองที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 5.5 c.)

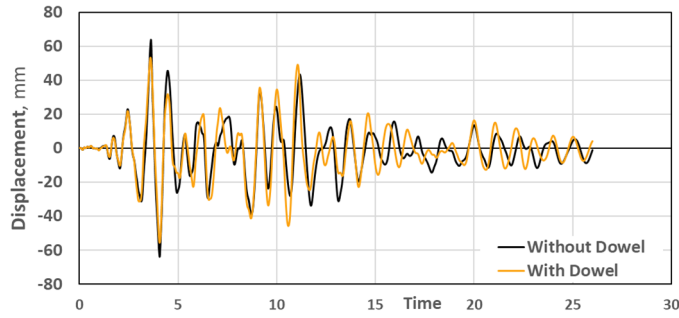
นอกจากนี้ยังมีผลทำให้แรงปฏิกิริยา (Reaction) บริเวณฐานของเสาตอม่อมีค่าสูงมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งเสาตอม่อหมายเลข 1 มีแรงปฏิกิริยาสูงสุดทั้งก่อนและหลังติดตั้งเหล็กเดือย คือ 300.55 และ 558.91 kN ตามลำดับ โดยมีค่าสูงขึ้นทั้งสิ้น 19.42% โดยแรงปฏิกิริยาในแต่ละช่วงเวลา สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.5 b.) และเมื่อพิจารณาคลิ้นแผ่นดินไหวทั้ง 4 คลื่น จะพบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของแรงปฏิกิริยาทุกคลิ้นแผ่นดินไหว สำหรับทิศทางตามแนวยาว ดังรูปที่ 5.5 e.)



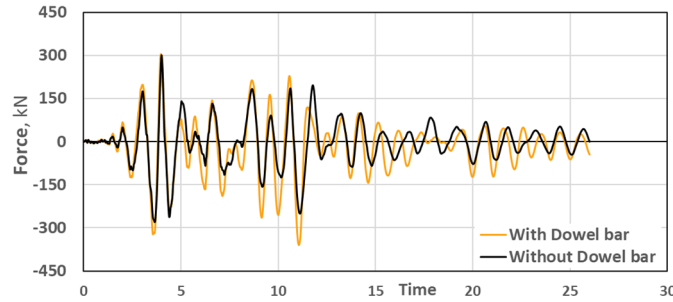
รูปที่ 5.1 การเกิดแรงกระแทกในแต่ละช่วงเวลา บริเวณตอม่อริม



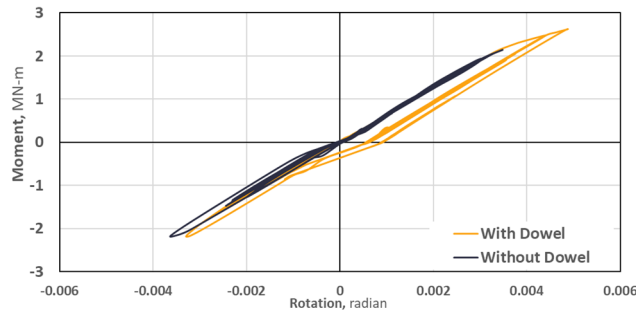
รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบแรงกระแทกสูงสุดหลังจากติดตั้งเหล็กเดือย โดยพิจารณาทุกคลิ้นแผ่นดินไหว



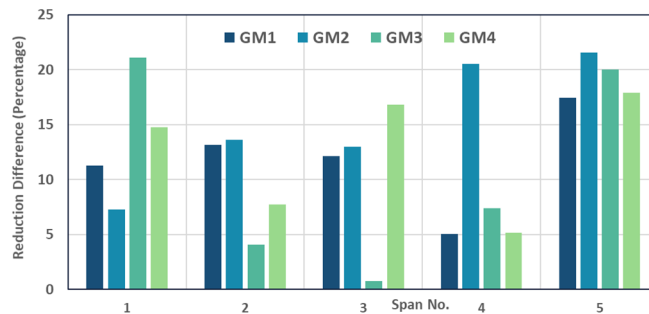
a.) การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพานส่วนบนบริเวณช่วงที่ 3 ของสะพาน หลังติดตั้งเหล็กเดือย



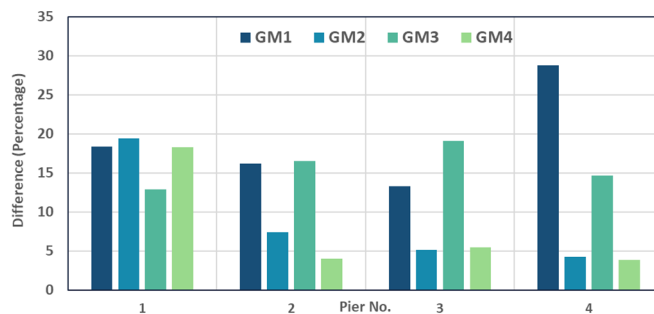
b.) การเปรียบเทียบค่าแรงปฏิกิริยา (Reaction) บริเวณฐานรากของเสาตอม่อ #1 หลังติดตั้งเหล็กเดือย



c.) การเปรียบเทียบผลการตอบสนองของจุดหมุนพลาสติก (Plastic hinge) บริเวณเสาตอม่อ #1 หลังติดตั้งเหล็กเดือย



d.) เปรียบเทียบความแตกต่างของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพานส่วนบนที่ลดลง หลังการติดตั้งเหล็กเดือย



e.) เปรียบเทียบความแตกต่างของแรงปฏิกิริยา หลังการติดตั้งเหล็กเดือย
รูปที่ 5.5 ผลการตอบสนองของโครงสร้างสะพานในทิศทางตามแนวยาว

6. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานที่ถูกออกแบบด้วยระบบแยกฐานภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว โดยโครงสร้างสะพานส่วนบนอาจเกิดการเคลื่อนตัวที่มากจนเกินไปเป็นผลให้เกิดความเสี่ยงที่จะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างเคลื่อนตัวกระทบกัน ในงานวิจัยนี้จึงเลือกปรับปรุงโครงสร้างสะพานโดยติดตั้งเหล็กเดือย ขนาด 25 mm เป็นอุปกรณ์ยึดรั้งควบคู่ไปกับแผ่นยางรองคานสะพาน โดยมีการสร้างแบบจำลองไฟในดอลิไมนัมและทำการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงพลศาสตร์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลาด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000

ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งเหล็กเดือยสามารถช่วยลดผลกระทบจากโครงสร้างสะพานที่ถูกออกแบบด้วยระบบแยกฐานโดยเหล็กเดือยช่วยให้การเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพานส่วนบนมีค่าน้อยลง เป็นผลทำให้แรงกระทำระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างมีค่าน้อยลงตามไปด้วย แต่ในทางกลับกันผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของเสาตอม่อกลับมีค่าสูงมากขึ้นจึงมีผลทำให้แรงปฏิกิริยา (Reaction) บริเวณฐานของเสาตอม่อ มีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นการปรับปรุงสะพานควรมีการตรวจสอบผลการตอบสนองของเสาตอม่อและฐานรากควบคู่ไปด้วย เพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติบริเวณนั้นแทน

อย่างไรก็ตามผลการศึกษานี้ไม่ได้ครอบคลุมไปถึงการพิจารณาตำแหน่งและรูปแบบการติดตั้งเหล็กเดือยแบบอื่น ๆ และเพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ควรมีการทำการทดสอบเพื่อนำผลการวิเคราะห์มาเทียบเคียงเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจาก บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ ๗๒ พรรษา

8. การอ้างอิง

[1] Avşar, Ö. (2009). *Fragility Based Seismic Vulnerability Assessment of Ordinary Highway Bridges in Turkey*. Ph.D. Dissertation of Middle East Technical University.

[2] Li Y. and J. Conte (2016). Effects of seismic isolation on the seismic response of a California high-speed rail prototype bridge with soil-structure and track-structure interactions: Effects of Seismic Isolation on a High-speed Rail Prototype Bridge. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45.

[3] Priestley, M.N., F. Seible, and G.M. Calvi (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. John Wiley & Sons.

[4] Jankowski, R. and S. Mahmoud (2015). *Earthquake-induced structural pounding*. Springer.

[5] Abdel Raheem, S. (2010). Pounding mitigation and unseating prevention at expansion joints of isolated multi-span bridges. *Engineering Structures*.

[6] Liu, C. and R. Gao (2018). Design method for steel restrainer bars on railway bridges subjected to spatially varying earthquakes. *Engineering Structures*.

[7] C.D.o.T. (2013). *Caltrans Seismic Design Criteria Version 1.7*. Sacramento, California.

[8] Anil, Ö. and S. Altin. (2007). An experimental study on reinforced concrete partially infilled frames. *Engineering Structures*. 29(3): p. 449-460.

[9] Foytong, P. (2012). *Fragility Curves of Reinforced-Concrete Building Under Tsunami Loadings*. Ph.D. Dissertation of Chulalongkorn University, Thailand.

[10] Computers Structures Inc. (2017). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSI Bridge*. Berkeley.

[11] Huo, Y. and J. Zhang (2013). Effects of Pounding and Skewness on Seismic Responses of Typical Multispan Highway Bridges Using the Fragility Function Method. *Journal of Bridge Engineering*. 18: p. 499-515.

[12] Kelly, J.M. and D. Konstantinidis (2011). *Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation*. John Wiley & Sons.

[13] Psycharis, I.N. and H.P. Mouzakis (2012). Shear resistance of pinned connections of precast members to monotonic and cyclic loading. *Engineering Structures*. 41: p. 413-427.

[14] Aviram, A., K.R. Mackie, and B. Stojadinović (2008). *Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California*, in Technical Report 2008/03, PEER Center: Berkeley.

[15] Khy, K. (2018). *Improved Response Spectrum Analysis Procedure for Design of Reinforced Concrete Tall Buildings*. Ph.D. Dissertation of Chulalongkorn University, Thailand.