

## พฤติกรรมต้านแผ่นดินไหวของอาคารคู่ที่มีสะพานทางเชื่อม

### Seismic Behavior of Twin Towers with Interconnected Corridor Bridge

ชาลิสสา วงศ์ทวีทอง<sup>1</sup> ณัฐนิชวิทย์ เขาวงกิตเจริญ<sup>2</sup> ศิวกร อ่อนแดง<sup>3</sup> ทศพล ปิ่นแก้ว<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

#### บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้จัดทำเพื่อศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการต้านแผ่นดินไหวของอาคารคู่ที่มีสะพานทางเชื่อมและทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมอาคารทั้งสองจากกรณีที่มีรูปแบบฐานรองรับของสะพานทางเชื่อมที่แตกต่างกัน โดยอาคารนี้ได้ก่อสร้างอยู่ในกรุงเทพมหานคร อีกทั้งยังทราบถึงวิธีการติดตั้งสะพานทางเชื่อมในโครงการครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบ พฤติกรรมที่เกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่ออาคารคู่ที่มีสะพานทางเชื่อม ได้แก่ ค่าการเคลื่อนตัวของอาคาร ค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น แรงเฉือนของชั้นอาคาร โมเมนต์ของชั้นอาคาร การเคลื่อนตัวของฐานรองรับ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่ฐานรองรับ และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของชิ้นส่วนสะพานทางเชื่อม เพื่อใช้ในการสนับสนุนการตัดสินใจ วางแผน และวิเคราะห์การก่อสร้างอาคารคู่ที่มีสะพานทางเชื่อมที่มีประสิทธิภาพ ทั้งข้อมูลที่ได้จากการศึกษา ยังเป็นประโยชน์ในการพิจารณาออกแบบอาคารคู่ที่มีสะพานทางเชื่อมในอนาคตด้วย

**คำสำคัญ:** ฐานรองรับ, Fixed Fixed, Fixed Free, Truss

#### Abstract

This project was designed to study the anti-seismic behavior of a pair of buildings with a connecting bridge and to compare the behavior of the two buildings in the case of different foundation designs for the connecting bridge. This building was constructed in Bangkok. They also know how to install the connecting bridge in this project and have made a comparison. Behaviors that occur and affect pairs of buildings with connecting bridges include building movement values. Value of

relative movement between floors, Shear resistance, Moment resistance, Movement of the support base, The shear force that occurs at the base of the support and the safety ratio of the connecting bridge components To be used to support decision making, planning, and analysis of the construction of twin buildings with efficient connecting bridges. The information obtained from the study is also useful in considering the design of twin buildings with connecting bridges in the future.

Keywords: Support base, Fixed Fixed, Fixed Free, Truss

#### 1. คำนำ

ทุกวันนี้เมืองที่มีประชากรหนาแน่นและมีที่ดินจำกัดส่งผลทำให้จำนวนชั้นของตึกนั้นเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ทำให้อาคารสมัยใหม่ที่มีความสูงมากนั้นไวต่อแรงลมและแรงแผ่นดินไหวมากกว่าอาคารในอดีต ลักษณะไดนามิกที่เกี่ยวข้องมากที่สุดของอาคารสูงคือ คาบการแกว่งตามธรรมชาติ มวล stiffness และสัมประสิทธิ์การหน่วง ในปัจจุบันมีการศึกษาว่าการมีทางเชื่อมอาคารทำให้อาคารมีพฤติกรรมเปลี่ยนอย่างไร มีงานวิจัย ที่ดำเนินการส่วนใหญ่พิจารณาเฉพาะการตอบสนองแบบไดนามิกของอาคารสูงแยกจากกันโดยไม่พิจารณาทางเชื่อมหรือสะพาน และมีการศึกษาเพื่อตรวจสอบการตอบสนองแผ่นดินไหวของโครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน โดย พิจารณาจากอาคาร twin tower ที่เชื่อมต่อกันด้วยตัว podium หรือสะพาน โดยปัจจัยส่วนใหญ่ นั้น เป็นเรื่องของลมนอกจากนี้ยังมีงานการวิจัยที่พิจารณาผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวแบบไดนามิกต่อพฤติกรรมของอาคารสูงที่เชื่อมต่อกัน เพื่อหากรณีที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดของโครงสร้างอย่างแม่นยำ

ซึ่งอาคารที่จะใช้อ้างอิงในการวิเคราะห์เรื่องปัจจัยของทางเชื่อมนั้นคือ หมอชิต คอมเพล็กซ์ (Mochit Complex) โครงการ Mixed – Use จาก หมอชิตแลนด์ เป็นอีกหนึ่งโครงการที่ช่วยเพิ่มความคึกคักและพัฒนาทำเล ย่านจตุจักรให้เป็นแหล่งธุรกิจ ซึ่งอาคาร Mochit Land เป็นอาคาร สำนักงาน 2 อาคาร 36 ชั้น โดยมีการเชื่อมกันที่ชั้นใต้ดินถึงชั้น 11 (Podium) และโครงถักเหล็ก (Steel truss) ชั้น33และ36 โดยมีบริษัท Palmer&Turner เป็นผู้ออกแบบโครงสร้าง

## 2. ทบทวนวรรณกรรม

### 2.1 การวิเคราะห์แบบประวัติเวลา

การวิเคราะห์ประวัติเวลาจะคำนวณการตอบสนองเชิงโครงสร้างของ โครงสร้างภายใต้การโหลดฟังก์ชันเวลาในขั้นตอนเวลาต่างๆ การคิดแบบ เต็มประวัติเวลาให้การประเมินเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นของโครงสร้างการ ตอบสนองของโครงสร้างระหว่างและหลังการใช้โหลด การคิดแบบเต็ม ประวัติเวลาได้มาจากการแก้ปัญหาโครงสร้างแบบค่อยเป็นค่อยไปตาม สมการของการเคลื่อนไหว เมื่อแก้สมการโดยตรง ผลการตอบสนองมีความ ละเอียดอ่อนสูงไปสู่ขั้นตอนตามเวลาที่กำหนด โดยต้องระมัดระวังในการ เลือกเวลา ในทางกลับกัน เทคโนโลยีบูรณาการโดยตรงแบบไม่เชิงเส้น ต้อง มีฮิลเบอร์-ฮิวจ์-เทย์เลอร์ (HHT) ค่าอัลฟาที่เป็นลบเล็กน้อยเพื่อรองรับ โหมดความถี่ที่สูงขึ้น และเพื่อส่งเสริมการบรรจบกันของอายุวัสดุและความ ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต รวมถึงที่เคลด้าและผลกระทบจากการกระจัด ขนาดใหญ่ อาจถูกจำลองในรูปแบบประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้นโดยตรง ใน ทางเลือกอื่นคือสมการการเคลื่อนที่แบบไดนามิกสามารถแก้ไขได้ทั้งเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น การวิเคราะห์ที่ริยาช่วย (FNA) เป็นที่น่าสังเกตว่าใน FNA วัตถุที่เชื่อมโยงจะจับพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น ปัจจุบันการศึกษามักจะ ดำเนินการวิเคราะห์ประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้น ที่เป็นการจำลองพฤติกรรม ของโครงสร้างระหว่างเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรงกว่าซึ่งดีกว่าวิธีการอื่นๆ การบูรณาการโดยตรงดำเนินการโดยวิธีการHHT และการตอบสนองนั้นอยู่ ภายใต้การหน่วงของ Rayleigh ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดโดยคาบ ธรรมชาติของโครงสร้าง การวิเคราะห์จะคิดรวมถึงผลกระทบ P-Δ แบบไม่ เชิงเส้นด้วย การวิเคราะห์จะเริ่มต้นหลังจากการโหลดโครงสร้างคงที่แล้ว (DL) โดยการแก้สมการการเคลื่อนที่แบบไดนามิก ดังสมการที่ 1 การ วิเคราะห์จะกำหนดการกระจัดที่ขึ้นกับเวลา แรงเฉือนช่วงเวลา พลังงาน และแรงฟื้นฟูภายใต้การประยุกต์โหลดแผ่นดินไหวแบบไดนามิกซึ่งแสดงไว้ ในตารางที่ 1

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU(t) = -M\ddot{U}_g(t) \quad (1)$$

Table 1  
Ground-motion records input to the linked model structures.

Earthquake (record)	Date	Station	PGA (g)	$M_w$	$D_s$ (km)	Soil class
Whitier Narrows	1987	Clemencia-N. Oukbank	0.11	6.0	9.0	A, A
El Centro	1940	117 El Centro	0.34	7.2	8.9	B, C
Kocaeli (Izmit)	1999	Sakarya	0.37	7.4	13	B, B
Loma Prieta	1989	Corralitos	0.48	7.1	5.1	B, B
Kobe	1995	KJMA	0.82	6.9	0.6	B, B
Norridge RRS	1994	77 Rinaldi Receiving Sta	0.84	6.7	7.3	C, C
Duzce	1999	379 Lamons Station	0.97	7.1	17.6	D, C
Cape Mendocino	1992	Petrolia	1.04	7.1	8.5	A, A

PGA = Peak Ground Acceleration;  $M_w$  = Magnitude;  $D_s$  = Site-source distance.

โดยที่ M, C และ K คือ มวล(Mass), การหน่วง(Damping) และความแข็ง (Stiffness) ตามลำดับ ซึ่งสัญลักษณ์ U,  $\dot{U}$  และ  $\ddot{U}$  แสดงถึง การกระจัด, ความเร็ว และความเร่ง ตามลำดับ ในส่วนของค่า ( $U_g$ ) คือเวกเตอร์ของ ความเร่งภาคพื้นดิน เวกเตอร์และเมทริกซ์เหล่านี้สามารถคำนวณได้เป็น

องค์ประกอบหนึ่งมิติโดยการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างกันให้เป็นฟังก์ชัน ที่เหมาะสม สมการที่ 1 จะกลายเป็น สมการที่ 2

$$M\Delta\ddot{U}(t) + C(t)\Delta\dot{U}(t) + K(t)\Delta U(t) = \Delta P(t) \quad (2)$$

โดยที่  $\Delta U(t)$ ,  $\Delta\dot{U}(t)$  และ  $\Delta\ddot{U}(t)$  ตามลำดับแสดงถึงการเพิ่มขึ้น เวกเตอร์การกระจัด, ความเร็ว และความเร่ง  $\Delta P(t)$  คือเวกเตอร์ส่วนที่เพิ่ม ของภาระแผ่นดินไหวภายนอก

### 2.2 การวิเคราะห์โดยใช้การสั่นไหวของพื้นดิน

ในการใช้ชุดข้อมูลการสั่นไหว CMS ให้พิจารณาใช้ข้อมูลอย่างน้อย 3 กลุ่ม ซึ่งสองกลุ่มแรกสอดคล้องกับคาบ Conditioned Period ที่ 0.2 และ 3 วินาที กลุ่มที่เหลือสอดคล้องกับคาบ Conditioned Period ที่คาดว่า จะทำให้โครงสร้างมีการตอบสนองที่วิกฤตที่สุด ในแต่ละกลุ่มให้ประกอบด้วย ข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดิน 3 ชุดเป็นอย่างน้อย ซึ่งแต่ละชุดประกอบด้วย คู่ของความเร่งของพื้นดินในแนวราบสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน ซึ่งบันทึกได้ จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเดียวกันที่สถานีเดียวกัน แต่ละชุดข้อมูลการสั่นไหว ถูกคูณปรับค่าให้ค่าสเปกตรัมการตอบสนองที่คาบที่กำลังพิจารณา (Conditioned Period) มีค่าเท่ากับสเปกตรัมการตอบสนองสำหรับการ ออกแบบ ที่คาบ Conditioned Period นั้น ๆ ในการนำค่าการตอบสนอง ไปใช้ในการออกแบบหรือตรวจสอบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมให้

การวิเคราะห์โดยใช้การสั่นไหวของพื้นดินควรใช้ไม่น้อยกว่า 7 ชุด อนุญาตให้ใช้ค่าเฉลี่ยของแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้าง เนื่องจากการสั่นไหว ของพื้นดินทุกชุด ในการออกแบบตามการรวมผลของแรง และอนุญาตให้ใช้ ค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น เนื่องจากการสั่นไหวของ พื้นดินทุกชุด ในการตรวจสอบหากใช้การสั่นไหวของพื้นดินตามหัวข้อ ซึ่ง กำหนดให้ใช้ข้อมูลการสั่นไหวอย่างน้อย 3 กลุ่มของชุดข้อมูล ให้ทำการ คำนวณค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองในแต่ละกลุ่ม CMS ก่อน แล้วจึงนำ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ให้ค่าเฉลี่ยสูงสุดไปใช้ในการออกแบบหรือตรวจสอบถ้า ทำการวิเคราะห์โดยใช้การสั่นไหวของพื้นดินน้อยกว่า 7 ชุด ต้องใช้ค่าสูงสุด ของแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้าง เนื่องจากการสั่นไหวของพื้นดินชุดต่าง ๆ ในการออกแบบตามการรวมผลของแรงในหัวข้อ 2.5 และให้ใช้ค่าสูงสุดของ การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น

การใช้การสั่นไหวของพื้นดินสำหรับการออกแบบ เป็นการตรวจสอบ สมรรถนะของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (Design Basis Earthquake, DBE) โดยสมรรถนะของโครงสร้างมุ่งเน้นให้มีความ ปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Performance Level, LS) ตามนิยามใน มาตรฐาน มยผ.1303 ซึ่งเกณฑ์ที่ยอมให้ของการโก่งตัวและการเคลื่อนที่ สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ระบุในมาตรฐาน มยผ.1302 ฉบับนี้สอดคล้องกับระดับ สมรรถนะปลอดภัยต่อชีวิต (LS) ซึ่งเป็นที่คาดหวังภายใต้แผ่นดินไหวระดับ DBE

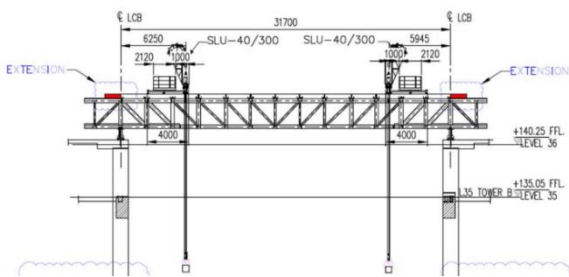
การวิเคราะห์เพื่อตรวจพิสูจน์สมรรถนะของโครงสร้างด้วยวิธีแบบ ประวัติเวลาไม่เชิงเส้น (NLRHA) ควรทำการตรวจสอบสมรรถนะของ โครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (Maximum Considered Earthquake, MCE) เพิ่มเติมอีกหนึ่งระดับด้วย ซึ่งแผ่นดินไหว MCE มีความถี่ 2475 ปีและมีมีความรุนแรงเป็น 1.5 เท่าของแผ่นดินไหว DBE ซึ่งเป็นพื้นฐานของสเปกตรัมสำหรับการออกแบบและการสั่นไหวของพื้นดิน

ตาม มยผ.1301/1302-61 มีการปรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบซึ่งเป็นการปรับค่าความรุนแรงระดับ MCE ให้เป็นระดับ DBE โดยการคูณด้วย 2/3

### 2.3 การติดตั้งสะพานทางเชื่อม

#### 2.3.1 การติดตั้งเครื่องมือยกชิ้นส่วน

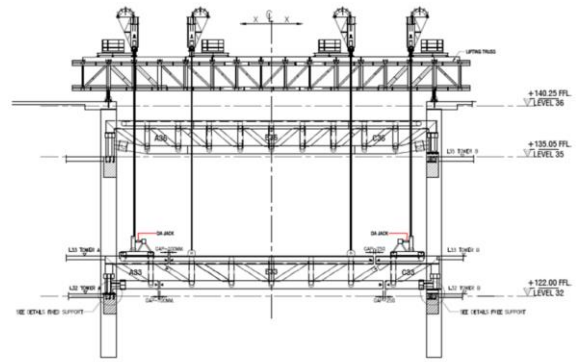
1. ติดตั้งชุดยก ชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยการยึดตั้งชุดยกโดย tie down bars บนชั้น 36 ของตึก A และ B
2. ติดตั้งชุดยก ชั้นที่ 3 และ 4 ตามลำดับ
3. ทำการติดตั้งรางเลื่อนบนชุดยก และทำการดึงเพิ่มแรงของ Tie down bar ตามที่ได้ออกแบบไว้ และทำการประกอบชุดยกที่เหลือนบน temporary support บน permanent truss
4. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่จะทำการยก ตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ตาม ITP และทำการยก LT2 ทั้งชุดขึ้นไป จนถึงตำแหน่งที่ออกแบบไว้
5. ทำการเชื่อมต่อ lifting truss ทั้ง 3 ส่วนเข้าด้วยกันด้วยการขันนอต และตรวจสอบความเรียบร้อย



รูปที่ 1 ชุดยกที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว

#### 2.3.1 การติดตั้งเครื่องมือยกชิ้นส่วน

1. ทำการยก truss A36 และ A33 จนถึงชั้นที่กำหนด โดยเลื่อนออกจากตำแหน่ง 5-10 เซนติเมตร
2. ทำการยก truss C36 และ C33 จนถึงชั้นที่กำหนด โดยเลื่อนออกจากตำแหน่ง 20-30 เซนติเมตร
3. ทำการเลื่อนและหย่อนชุดยกไปที่ตำแหน่ง ที่จะทำการยก truss B36
4. ทำการยก truss B36 เข้าสู่ตำแหน่ง โดยรักษาระยะห่างจาก truss A36 และ C36 ประมาณ 5 เซนติเมตร
5. เลื่อน A36 เข้าหา B36 แล้วทำการปรับ level และ alignment ตามแบบทำการยึดตั้งชั่วคราว ระหว่าง C36 และ B36 จากนั้น การเชื่อมตามแบบ
6. เลื่อน C36 เข้าหา B36 แล้วทำการปรับ level และ alignment ตามแบบทำการยึดตั้งชั่วคราว ระหว่าง C36 และ B36 จากนั้น การเชื่อมตามแบบ
7. ทำการเคลื่อน truss ชั้น 36 เข้าสู่ตำแหน่ง และทำการเชื่อมต่อเข้ากับ bearing
8. ทำตามขั้นตอนที่ 4-6 อีกครั้ง ในชั้น 33



รูปที่ 2 การติดตั้งสะพานทางเชื่อมเสร็จสมบูรณ์

### 2.4 Fluid Lock-Up Devices

อุปกรณ์ล๊อคระบบของไหล (Fluid Lock-Up Devices) เพิ่งได้รับความนิยมอย่างมากในการควบคุมสิ่งปลูกสร้างที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวหรือพายุลม ซึ่งเป็นอุปกรณ์ล๊อคข้อพุ่มแบบหนึ่งของ Fluid Viscous Damper ช่วยให้สามารถเคลื่อนไหวได้อย่างไม่จำกัดที่ความเร็วต่ำ แต่เมื่อเกิดการกระชากรุนแรง อุปกรณ์ล๊อคข้อพุ่มจะเปิดการใช้งาน โดยจะก่อตัวแบบไดนามิกและมีผลอย่างแข็งขัน เพื่อป้องกันการเชื่อมต่อระหว่างมวลไว้ หลังจากการสั่นกระชากสิ้นสุดลง อุปกรณ์ล๊อคข้อพุ่มจะกลับสู่สภาพเดิม ส่วนโครงสร้างสามารถขยายหรือหดตัวตามอุณหภูมิได้โดยไม่ต้องเพิ่มความเค้น อีกทั้งการทำงานของอุปกรณ์ยังเป็นแบบพาสซีฟโดยสมบูรณ์ แต่ยังสามารถเปิดการใช้งานได้หลายมวลโครงสร้างเพื่อที่จะค้ำยันแบบไดนามิก โดยไม่ต้องอาศัยต้นทุนและความซับซ้อนของใช้งานระบบตัวกระตุ้น

อุปกรณ์ล๊อคข้อพุ่มเป็นส่วนประกอบจากฐานเทคโนโลยีโดยทั่วไปของ Fluid Damper ต่างกันตรงที่ อุปกรณ์ล๊อคข้อพุ่มจะไม่กระจายพลังงาน แต่จะทำหน้าที่เป็นปีกแบบไดนามิกให้กับมวลจำนวนมากอย่างมีประสิทธิภาพร่วมกันภายใต้แผ่นดินไหวหรือพายุ เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ล๊อคข้อพุ่มแล้ว มวลโครงสร้างจะทำหน้าที่เหมือนกับมวลเสาหินเดี่ยวเมื่อมีเหตุการณ์กระชากรุนแรง

อุปกรณ์ล๊อคข้อพุ่มจะช่วยให้มวลที่เชื่อมต่ออย่างยืดหยุ่นทำหน้าที่เหมือนอุปกรณ์ที่มีความแข็งมวลเดี่ยวในระหว่างเหตุการณ์สั่นกระชาก แต่อนุญาตให้มวลเดียวกันเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในระหว่างสภาวะโหมดปกติ

การใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ สะพานทุกประเภท โครงสร้างที่แยกฐานในพื้นที่ที่เกิดแผ่นดินไหวสูง และอาคารที่มีการยึดฐานที่ได้รับพายุลมหรือแผ่นดินไหวชั่วคราวในระดับต่ำ



รูปที่ 3 Fluid Lock-Up Devices

### 3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

คณะผู้วิจัยดำเนินงานวิจัยโดยใช้โปรแกรม ETABS21 ผ่านการอ้างอิงมาตรฐานการออกแบบภายใต้แรงแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61 โดยจะมุ่งเน้นไปที่แรงและการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นกับองค์อาคารคู่ที่มีสะพานเชื่อมที่ชั้น 33 และ 36 เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลลัพธ์ในกรณีพื้นฐานรองรับของปลายสะพานเชื่อมทั้งสองฝั่งเป็นรูปแบบ Fixed Fixed และ Fixed Free

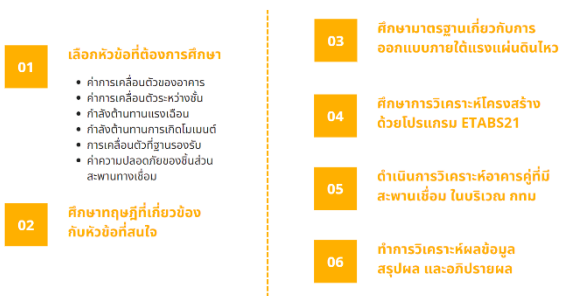
#### 3.1 ศึกษาลักษณะข้อมูลที่ต้องการจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

ETABS21

คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์หัวข้อที่ต้องการทำการศึกษากับโปรแกรม ETABS21 และวางแผนเก็บค่าที่เกิดขึ้นจากโมเดลของอาคารไว้ทั้งหมด 7 หัวข้อ โดยมีหัวข้อดังนี้ ค่าการเคลื่อนตัวของอาคาร ค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้น กำลังต้านทานแรงเฉือน กำลังต้านทานการเกิดโมเมนต์ การเคลื่อนตัวที่ฐานรองรับ แรงที่กระทำที่ฐานรองรับ และค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนสะพานทานเชื่อม

#### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 4 แผนภาพการดำเนินโครงการ

#### 3.2.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกรณีอาคารคู่ที่มีทางเชื่อมภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ค้นคว้าเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อที่จะได้สังเกตถึงแนวทางการปฏิบัติงานในปัจจุบัน เกี่ยวกับการวิเคราะห์แรงและการเคลื่อนตัวของอาคารและทางเชื่อมภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัย

#### 3.2.2 ศึกษามาตรฐานการออกแบบอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ศึกษาถึงมาตรฐานการออกแบบภายใต้แรงแผ่นดินไหว หรือ มยผ.1301/1302-61 เพื่อนำมาเป็นเกณฑ์การดำเนินงานและการตัดสินใจผลการวิเคราะห์ว่าผลที่ได้มานั้นมีเหตุผลรองรับ

#### 3.2.3 ศึกษาวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม ETABS21

ศึกษาถึงวิธีการและขั้นตอนในการใช้โปรแกรมตั้งแต่การอ่านโมเดลจากโครงการก่อสร้าง การกำหนดหลักเกณฑ์ในการวิเคราะห์ การวิเคราะห์ด้วยกรณีที่แตกต่างกัน รวมไปถึงการอ่านข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อทำการดำเนินงานวิจัยนั้นดำเนินไปได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง

#### 3.2.4 ดำเนินการวิเคราะห์

ดำเนินการวิเคราะห์อาคารคู่ที่มีสะพานทางเชื่อมที่ชั้น 33 และ 36 ภายใต้มาตรฐานที่กำหนดสำหรับออกแบบภายใต้แรงแผ่นดินไหว

#### 3.2.5 พิจารณาข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์

วิเคราะห์ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม ETABS21 ว่ามีความถูกต้องผ่านมาตรฐานและมีเหตุผลรองรับในทุกประการ ก่อนนำข้อมูลไปศึกษาหาแนวโน้มและวิเคราะห์ผลสรุป

#### 3.2.6 สรุปผลและอภิปรายผลการวิเคราะห์

จากข้อมูลผลการวิเคราะห์พบว่าอาคารที่มีฐานรองรับที่จุดปลายของสะพานทางเชื่อมเป็นรูปแบบ Fixed Free และ Fixed Fixed สามารถใช้งานได้ตามทฤษฎี โดยจะพบว่าแรงที่กระทำภายในอาคารของกรณี Fixed Fixed จะมีค่าที่มากกว่า ซึ่งการติดตั้ง Fluid Lock-Up ให้กับอาคารก็จะเป็นทางเลือกที่จะช่วยให้อาคารรับแรงขณะเกิดแรงแผ่นดินไหวได้ ดังนั้นจึงอาจเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับวิศวกรที่ต้องการจะออกแบบอาคารคู่ที่มีสะพานทางเชื่อมในอนาคตต่อไป

### 4. ผลการวิจัย

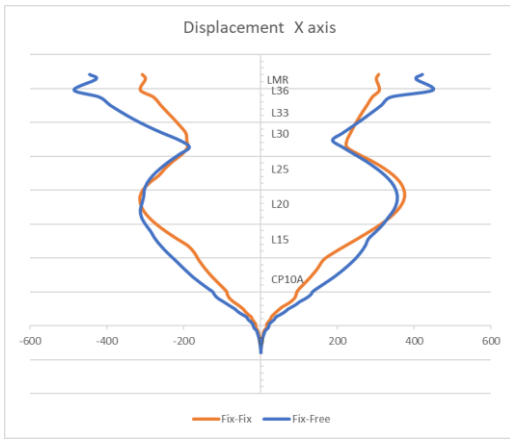
งานวิจัยในครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบพฤติกรรมของอาคารคู่ที่มีสะพานทางเชื่อมที่มีฐานรองรับที่แตกต่างกัน โดยมีผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม ETABS ทั้งหมด 7 อย่าง ประกอบไปด้วย

1. ค่าการเคลื่อนตัวของอาคาร
2. ค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น
3. แรงเฉือนของชั้นอาคาร
4. โมเมนต์ของชั้นอาคาร
5. การเคลื่อนตัวที่ฐานรองรับ
6. แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่ฐานรองรับ
7. ค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนสะพานทางเชื่อม

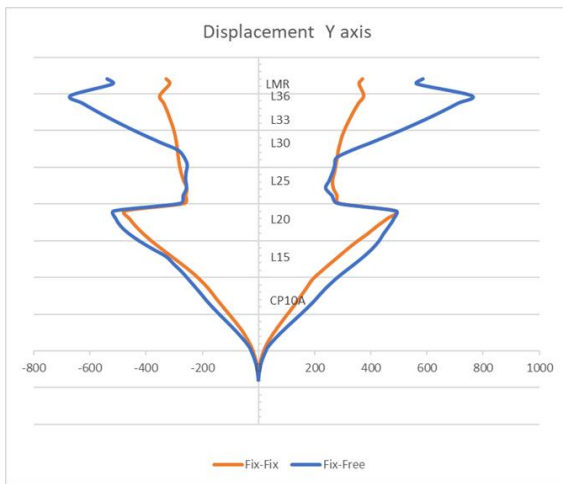
#### 4.1 ผลลัพธ์การวิเคราะห์

##### 4.1.1 ค่าการเคลื่อนตัวของอาคาร

ค่าการเคลื่อนตัวของอาคารที่มีฐานรองรับเป็น Fixed Free นั้นจะมีค่าการเคลื่อนตัวที่มากกว่าฐานรองรับแบบ Fixed ทั้งคู่ถึง 47.88%



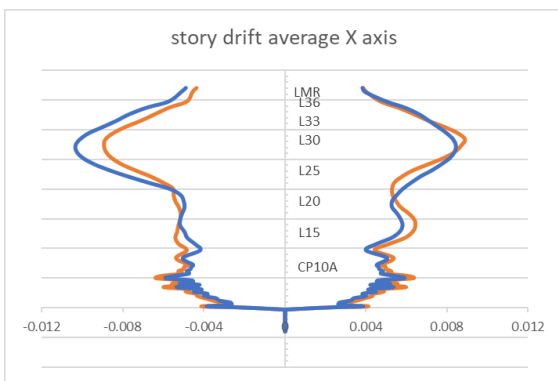
รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบทั้ง 2 กรณีด้วยคลื่น 2SEQ12 ในแกน X



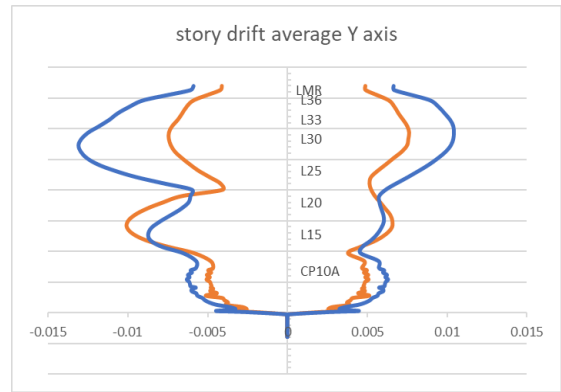
รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบทั้ง 2 กรณีด้วยคลื่น 2SEQ12 ในแกน Y

#### 4.1.2 ค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น

ค่าการเคลื่อนตัวของอาคารที่มีฐานรองรับเป็น Fixed Free นั้นจะมีค่าการเคลื่อนตัวที่มากกว่าฐานรองรับแบบ Fixed ทั้งคู่ถึง 36.84%



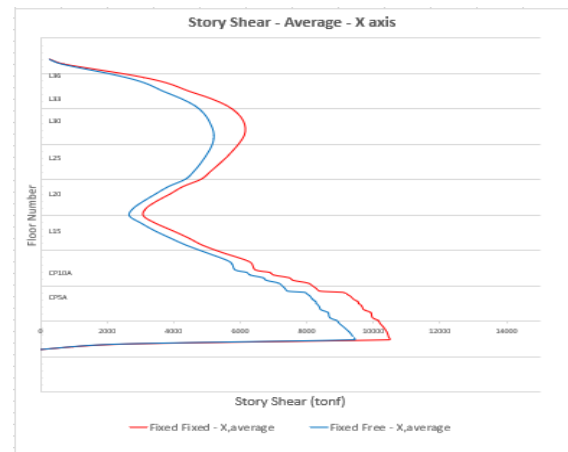
รูปที่ 7 กราฟ Average Story Drift ในแนวแกน X



รูปที่ 8 กราฟ Average Story Drift ในแนวแกน Y

#### 4.1.3 แรงเฉือนของชั้นอาคาร

จากผลลัพธ์ที่ได้ในกรณีที่มีฐานรองรับแบบ Fixed Free นั้นจะมีกำลังในแนวแกน Y มากกว่ากรณีฐานรองรับแบบ Fixed ทั้งคู่ถึง 13.50% แต่ก็มีกำลังน้อยกว่าในแนวแกน X 13.76%



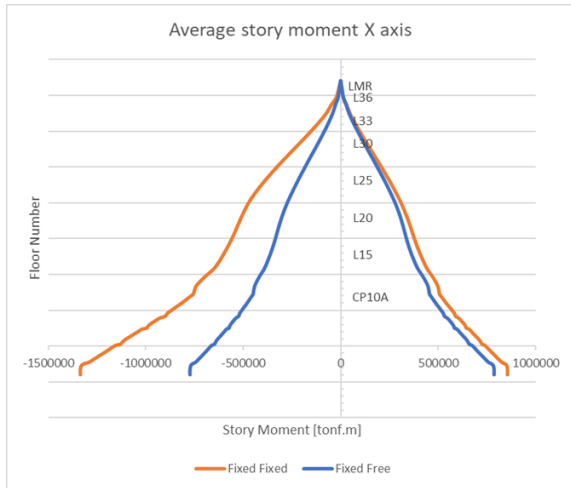
รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Story Shear ทั้ง 2 กรณีในแนวแกน X



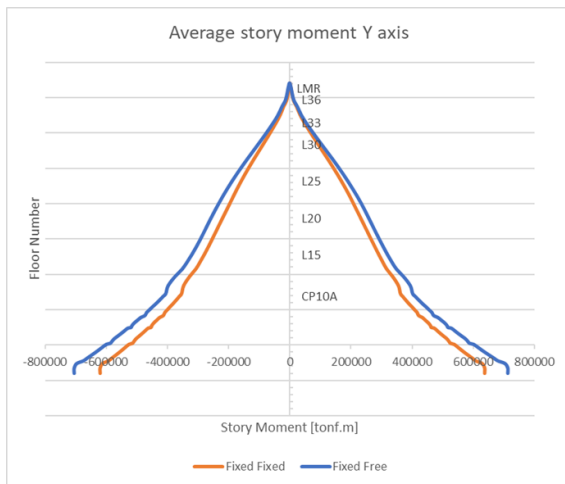
รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Story Shear ทั้ง 2 กรณีในแนวแกน Y

#### 4.1.4 โมเมนต์ของชั้นอาคาร

จากผลลัพธ์ที่ได้นั้นในกรณีที่มีฐานรองรับแบบ Fixed Free นั้นจะมีกำลังในแนวแกน Y มากกว่ากรณีฐานรองรับแบบ Fixed ทั้งคู่ถึง 11.78% แต่ก็มีกำลังน้อยกว่าในแนวแกน X 8.79%



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบ Average Story Moment ระหว่าง 2 กรณีในแนวแกน X



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบ Average Story Moment ระหว่าง 2 กรณีในแนวแกน Y

#### 4.1.5 การเคลื่อนตัวของฐานรองรับ

อาคารคู่ที่ใช้ฐานรองรับเป็นแบบ Fixed ทั้งคู่่นั้นมีค่าการเคลื่อนตัวที่เข้าใกล้ 0 แต่ในขณะที่อาคารคู่ที่ใช้ฐานรองรับเป็นแบบ Fixed Free นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น โดยที่ชั้น 36 จะมีค่ามากกว่าที่ชั้น 33 ถึง 37.45%

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความต่างของการเคลื่อนตัวในทุกคู่คลื่น เฉพาะกรณี Fixed Free ที่ชั้น 36 K73

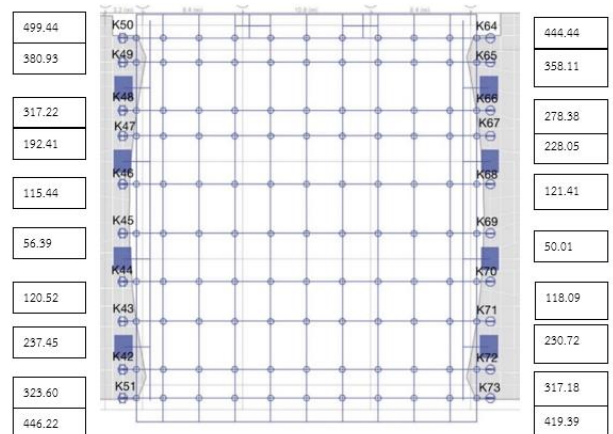
Average, L36 K73						
Fixed Free						
	Ux(mm)	Uy(mm)	Uz(mm)	Rx(rad)	Ry(rad)	Rz(rad)
$\Delta_{max}(t-b)$	100.85	233.07	0.00	0.00	0.00	0.00
$\Delta_{min}(t-b)$	-68.87	-263.15	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความต่างของการเคลื่อนตัวในทุกคู่คลื่น เฉพาะกรณี Fixed Free ที่ชั้น 33 K58

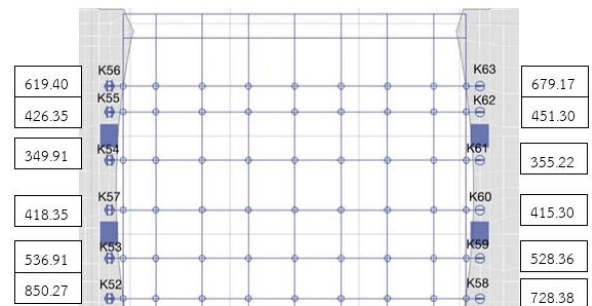
Average, L33 K58						
Fixed Free						
	Ux(mm)	Uy(mm)	Uz(mm)	Rx(rad)	Ry(rad)	Rz(rad)
$\Delta_{max}(t-b)$	63.08	222.36	0.00	0.00	0.01	0.00
$\Delta_{min}(t-b)$	-46.41	-226.03	0.00	0.00	-0.01	0.00

#### 4.1.6 แรงเฉือนที่เกิดจึ้นที่ฐานรองรับ

แรงเฉือนที่เกิดจึ้นที่ฐานรองรับที่ชั้น 33 และ 36 ในแนวแกน X จากคลื่น 8 คู่คลื่นในกรณีที่มีฐานรองรับเป็น Fixed Fixed จะเกิดแรงสูงสุดที่คู่คลื่น 2SEQ12 และยังทราบอีกว่าจะเกิดแรงที่ชั้น 33 มากกว่าชั้น 36 นอกจากนี้แล้วจะสังเกตได้ว่าแรงเฉือนสูงสุดนั้นมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยยะ แต่อย่างไรก็ตามมาตรฐานหากมีการใช้คู่คลื่นมากกว่า 7 คลื่นสามารถนำค่าเฉลี่ยมาใช้ในการออกแบบได้



รูปที่ 13 แรงเฉือนเข้าที่ฐานรองรับเฉลี่ย ชั้น 36 ในหน่วย Ton



รูปที่ 16 แรงเฉือนเข้าที่ฐานรองรับเฉลี่ย ชั้น 33 ในหน่วย Ton

#### 4.1.7 ค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนสะพานทางเชื่อม

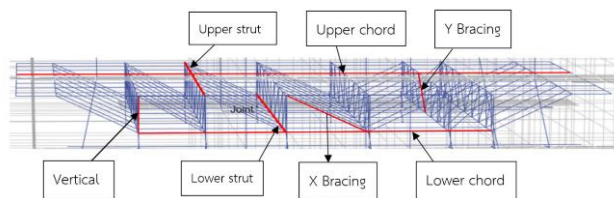
ค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนสะพานทางเชื่อมจากทั้ง 2 กรณีของชั้น 33 และ 36 นั้นมีค่าไม่เกิน 1 หรือก็คือผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดที่ชิ้นส่วน Upper chord และ Lower chord นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเปลี่ยนฐานรองรับจาก Fixed Free เป็น Fixed ทั้งคู่จะส่งผลให้ค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนสะพานทางเชื่อมนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับแรงเฉือนที่ฐานรองรับและกำลังต้านแรงเฉือน

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าความปลอดภัยของสะพานทางเชื่อม ชั้น 36

ชั้นส่วนของtruss	Max D/C ratio Fixed Free	Max D/C ratio Fixed Fixed	เปรียบเทียบ ระหว่าง 2 กรณี
Upper chord	0.771	0.78	เพิ่มขึ้น 1.2%
Lower chord	0.805	0.855	เพิ่มขึ้น 6.2%
Upper strut	0.456	0.454	ลดลง 0.4%
Lower strut	0.453	0.462	เพิ่มขึ้น 2.0%
Vertical	0.553	0.586	เพิ่มขึ้น 6%
Y Bracing	0.407	0.42	เพิ่มขึ้น 3.2%
X Bracing	0.454	0.46	เพิ่มขึ้น 1.3%

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าความปลอดภัยของสะพานทางเชื่อม ชั้น 33

ชั้นส่วนของtruss	Max D/C ratio Fixed Free	Max D/C ratio Fixed Fixed	เปรียบเทียบ ระหว่าง 2 กรณี
Upper chord	0.814	0.94	เพิ่มขึ้น 15.5%
Lower chord	0.79	0.964	เพิ่มขึ้น 22.0%
Upper strut	0.467	0.472	เพิ่มขึ้น 1.1%
Lower strut	0.402	0.395	ลดลง 1.7%
Vertical	0.658	0.721	เพิ่มขึ้น 9.6%
Y Bracing	0.507	0.575	เพิ่มขึ้น 13.4%
X Bracing	0.574	0.523	ลดลง 8.9%



รูปที่ 14 ส่วนประกอบของ Truss

## 5. บทสรุป

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลรับที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารคู่ที่มีสะพานเชื่อมภายใต้แรงแผ่นดินไหวในกรณีฐานรองรับที่ปลายสะพานเชื่อมเป็นแบบ Fixed Free และ Fixed Fixed ด้วยโปรแกรม ETABS21 โดยงานวิจัยนี้จะอ้างอิงถึงมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการประเมินผลการออกแบบ และการวิเคราะห์ในครั้งนี้จะพิจารณาเพียงแค่แรงแผ่นดินไหวอย่างเดียวเท่านั้นด้วยหลักการวิเคราะห์แบบ Time History Analysis

จากข้อมูลวิเคราะห์และกล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่า ในการก่อสร้างหรือออกแบบอาคารคู่ที่มีทางเชื่อมนั้นสามารถออกแบบให้ฐานรองรับของสะพานทางเชื่อมเป็น Fixed ทั้งสองอาคารได้ โดยอ้างอิงเชิงทฤษฎีจากโมเดลจำลองของโครงการก่อสร้างจริงของตัวอย่างที่พิจารณา ที่ผ่านการวิเคราะห์จากโปรแกรม ETABS21 และมีผลการวิเคราะห์ที่ยอมรับได้ อีกทั้งการติดตั้งอุปกรณ์ Fluid Lock-Up ให้กับอาคารก็จะช่วยเสริมความแข็งแรงเมื่อเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งผลการศึกษาข้างต้นบ่งชี้ว่าการออกแบบให้ฐานรองรับของทางเชื่อมอาคารคู่เป็นแบบ Fixed ทั้งคู่อาจเป็นอีกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและความคุ้มค่าที่วิศวกรอาจเลือกใช้สำหรับอาคารคู่ที่มีทางเชื่อมในอนาคตต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ในระดับบัณฑิตศึกษาสามารถลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับกรุณาอย่างสูงจาก ศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่มีความกรุณาให้คำแนะนำและความช่วยเหลือตลอดจนปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ อีกทั้งขอขอบคุณผู้พิงค์เจริญสุข ที่ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม ETABS ตลอดการดำเนินวิทยานิพนธ์ และคุณสมชาย บุญธรรม เจ้าหน้าที่บริการการศึกษาด้านคอมพิวเตอร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในจัดหาพื้นที่และอุปกรณ์เพื่อการศึกษาวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับแหล่งข้อมูลและแหล่งการเรียนรู้สำหรับการศึกษาข้อมูลดำเนินงานวิจัยเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่คณะผู้จัดทำตั้งไว้ทุกประการ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม, มยผ.1301/1302-61. ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด. 2564.
- [2] Ain Shams University, **Horizontally connected high-rise buildings under earthquake loadings**. [Online] Available : [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) (15 May 2024).
- [3] Boyuan Deng, **The Structural Design and Analysis of a Symmetrical Twin-tower Conjoined Building with Vibration Absorber**. [Online] Available : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2287/1/012026> (15 May 2024).
- [4] Chen Yongqi, Ma Liangzhe, Cao Tiezhu, Robert Schneider, Craig Winters, **SHOCK CONTROL OF BRIDGES IN CHINA USING TAYLOR DEVICES' FLUID VISCOUS DEVICES**. [Online] Available : <https://www.taylordevices.com/wp-content/uploads/100-Shock-Control-of-Bridges-in-China.pdf> (15 May 2014).
- [5] Douglas P. Taylor, **FLUID LOCK-UP DEVICES B A ROBUST MEANS TO CONTROL MULTIPLE MASS STRUCTURAL SYSTEMS SUBJECTED TO SEISMIC OR WIND INPUTS**. [Online] Available : <https://www.taylordevices.com/wp-content/uploads/60-Fluid-Lockup-Dev.pdf> (15 May 2014)
- [6] สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, **โครงการปรับปรุงและแก้ไขมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://sites.google.com/view/dpt1302/download?authuser=0> (15 พฤษภาคม 2567)