การศึกษาเปรียบเทียบค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือนสำหรับอาคารในประเทศไทย

Comparison Study of Response Modification Factor for RC Structures with Shear Wall of Building in Thailand

ธนภัทร แสนซื่อ[1,*] ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์[2] และ ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์[3]

[1,2] ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพฯ

[3] ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

**Corresponding author; E-mail address: [1] s6301081810013@email.kmutnb.ac.th, [2] nuttawut.t@eng.kmutnb.ac.th, [3] passagorn.c@psu.ac.th*

บทคัดย่อ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือน ถือเป็นระบบโครงสร้างที่นิยมสำหรับอาคารสูงในประเทศไทย เพื่อใช้ต้านแรงกระทำด้านข้างโดยเฉพาะแรงแผ่นดินไหว สำหรับมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301/1302-61) ได้อ้างอิงค่าตัวประกอบต่างๆ จากมาตรฐานของต่างประเทศเป็นแม่แบบในการจัดทำมาตรฐานฉบับนี้ โดยเฉพาะค่าตัวประกอบผลตอบสนอง (R) ที่เป็นตัวแปรสำคัญในการหาค่าแรงเฉือนที่ฐานและแรงภายในชิ้นส่วนที่ใช้ออกแบบ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดาตามที่มีกำหนดในมาตรฐาน (R = 5) เปรียบเทียบกับการหาค่า R ตามวิธีการของ Uang จากผลการศึกษาได้ค่า R เท่ากับ 5.54 และ 4.15 ในทิศทางตามแกน X และแกน Y ของอาคารตามลำดับ โดยค่า R ที่จากการศึกษามีค่าที่ต่ำกว่าที่กำหนดในมาตรฐานสำหรับในทิศทางแกน Y

คำสำคัญ: กำแพงรับแรงเฉือน, ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง, วิธีการวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้น

Abstract

Reinforced concrete (RC) structures with shear wall are popular structural system on high-rise buildings in Thailand. Shear wall is a structural member used to resist lateral forces, especially seismic load. The Seismic resistant building design standard (DPT 1301/1302-61) has referenced any factor from foreign standards as a template for the preparation of this standard. In particular, the response modification factor (R) is an important factor in determining the base shear and internal forces of the design components. This research presents comparison study of response modification factor (R) for ordinary reinforced concrete shear wall in standard. The R value in design standard (R = 5) is compared with the R value based on Uang's method. From the study, the R values are 5.54 and 4.15 in X and Y-directions of building, respectively. The study of R value is lower than specified in the standard in Y-direction.

Keywords: shear wall, response modification factor, pushover analysis

1. คำนำ

ในปัจจุบันโลกได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับภัยพิบัติต่างๆ มากมาย การเกิดแผ่นดินไหวก็เป็นอีกหนึ่งของภัยพิบัติที่อันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินมนุษย์มากที่สุด นั่นคือการก่อให้เกิดการพังทลายของอาคารที่พักอาศัยและสิ่งก่อสร้าง ด้วยเหตุนี้ทำให้นักวิจัยได้มีการศึกษาโดยมีแนวความคิดเพื่อลดความสูญเสียจากภัยแผ่นดินไหว ด้วยการเพิ่มศักยภาพในการวิเคราะห์หาสาเหตุและวิธีการออกแบบอาคารที่เหมาะสม เพื่อทำให้โครงสร้างอาคารมีความแข็งแรงและสามารถต้านทานแรงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวได้

โดยทั่วไป การออกแบบอาคารเพื่อให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวนั้น วิศวกรผู้ออกแบบต้องทราบถึงค่าตัวประกอบที่สำคัญต่าง ๆ ซึ่งค่าตัวประกอบเหล่านั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะที่ตั้งอาคาร ประเภทของอาคาร โดยหนึ่งในค่าตัวประกอบที่มีความสัมพันธ์กับประเภทของอาคารโดยตรงที่มาตรฐานต่าง ๆ กำหนดไว้คือ ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) ซึ่งมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301/1302-61) ที่ถูกกำหนดโดยกรมโยธาธิการและผังเมืองได้อ้างอิงจากมาตรฐานของต่างประเทศเป็นแม่แบบในการจัดทำมาตรฐานฉบับนี้ขึ้น ทำให้การเลือกใช้ค่าตัวประกอบผลตอบสนอง (R) ดังกล่าวอาจจะมีความเหมาะสมหรือไม่เหมาะสมสำหรับรูปแบบอาคารในประเทศไทยจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าตัวประกอบปรับ

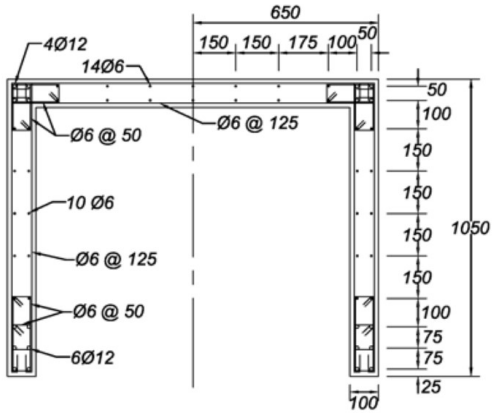
ผลตอบสนองของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือนสำหรับอาคารในประเทศไทย

2. การสอบเทียบแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ

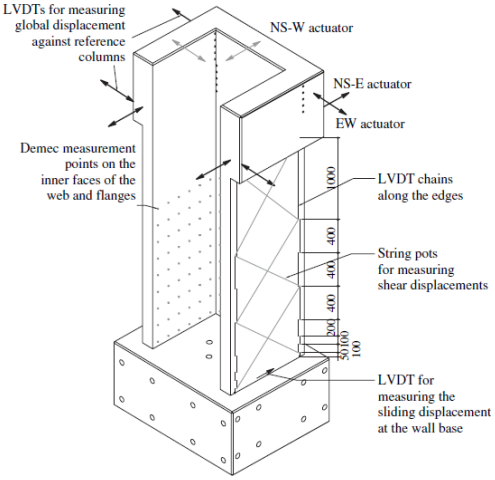
เนื่องด้วยการจำลองพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นค่อนข้างซับซ้อน เพราะฉะนั้นจึงได้มีการสอบเทียบแบบจำลองที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมเทียบกับผลทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ โดยเลือกใช้งานวิจัยของ Katrin, B. et al. [1] ที่ศึกษาพฤติกรรมของผนังคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีส่วนตัดขวางเป็นรูปตัวยู (TUB) โดยที่แบบผนังคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสูงเท่ากับ 3,490 มิลลิเมตร ขนาดมิติต่าง ๆ และการจัดวางเหล็กเสริมแสดงดังรูปที่ 1 ในการเปรียบเทียบและศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลอง ได้ใช้แบบจำลองและคุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากงานวิจัยของ Lu, Y. and Panagiotou, M. [2] แสดงดังรูปที่ 2 เพื่อให้แบบจำลองกำแพงรับแรงเฉือนที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้มีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ครบถ้วน โดยกำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับแผ่นเปลือกบาง (Shell element) แบบชิ้นส่วน Nonlinear Shell layer ซึ่งเป็นฟังก์ชันหนึ่งในโปรแกรม ETABS ที่ใช้ในการศึกษานี้

2.1 การกำหนดพฤติกรรมในช่วงไม่เชิงเส้น (Non-linear Behavior) โดยใช้ชิ้นส่วนแผ่นเปลือกบางแบบเป็นชั้น ๆ (Shell Layer Element)

สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กได้เลือกใช้ชิ้นส่วนแผ่นเปลือกบางแบบเป็นชั้น ๆ (Shell Layer Element) ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้าง ซึ่งชิ้นส่วนดังกล่าวสามารถจำลองพฤติกรรมการรับแรงได้ทั้งแรงในแนวระนาบและตั้งฉากกับแนวระนาบรวมถึงโมเมนต์ดัด และสามารถพิจารณาพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นโดยการจำลองพฤติกรรมของหน้าตัดเชิงประกอบระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมได้ โดยการกำหนดคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมแสดงดังตารางที่ 1 และมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมแสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดความหนาของวัสดุที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น (Multi-Layer Shell Element) แสดงดังรูปที่ 5(a) และการกระจายของชั้นเหล็กเสริม (Distribution of the bar layers) แสดงดังรูปที่ 5(b) โดยคุณสมบัติของชิ้นส่วนแผ่นเปลือกบางแบบเป็นชั้น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถจำลองพฤติกรรมในช่วงไม่เชิงเส้น (Non-linear Behavior) ของชิ้นส่วนกำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็ก [3]



(a)



(b)

รูปที่ 1 (a) ขนาดมิติต่าง ๆ การจัดวางเหล็กเสริมกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก และ (b) แบบจำลองตัวอย่างที่ถูกทดสอบในห้องปฏิบัติการ [1]

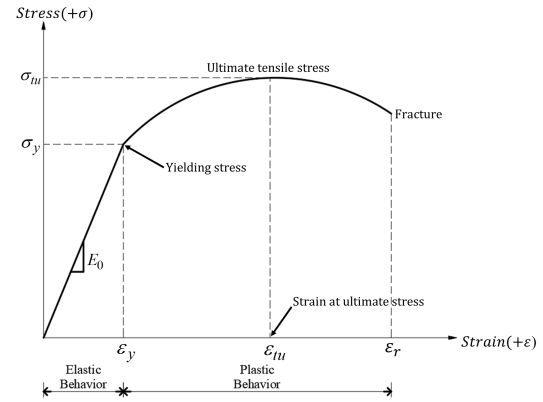
Material Properties:

Reinforcing Steel:	Ø6	Ø12
f_y (MPa)	518	471
f_u (MPa)	681	574
ε_{sh}	-	2.9%
ε_{su}	8.4%	12.7%
B_s	2.5%	1%

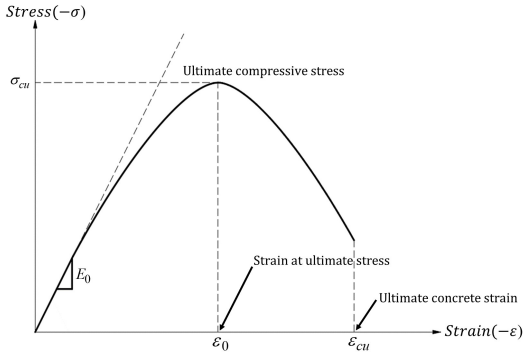
Concrete:	
f_c' (MPa)	54.7
ε_o	0.2%
f_t (MPa)	2.46

Confined concrete:	C1	C2W & E
f_{cc} (MPa)	76.6	76.6
ε_{co}	0.6%	0.6%
ε_{cs}	1.5%	1.62%

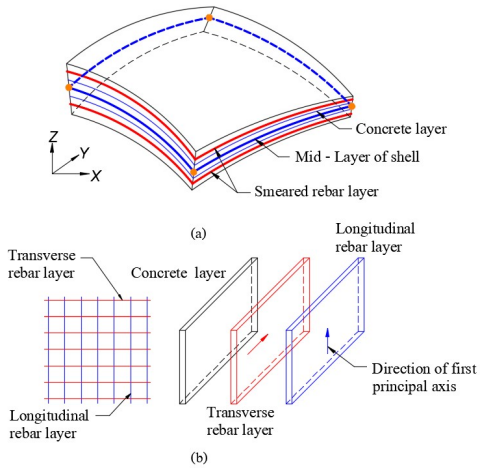
รูปที่ 2 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมในการสร้างแบบจำลองผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก [2]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม



รูปที่ 5 (a) องค์ประกอบของ Multi-Layer Shell Element และ (b) การกระจายของชั้นเหล็กเสริม Distribution of the Bar Layers [3]

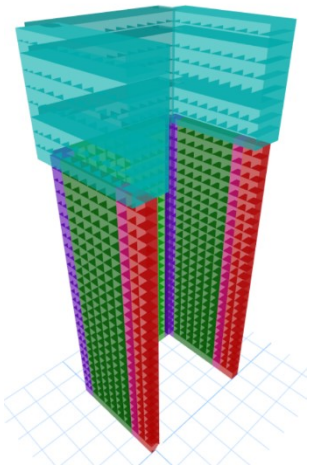
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลอง

วัสดุ	ตัวแปร	หน่วย	อาคารสูง 8 ชั้น
Concrete in compression	σ_{cu}	MPa	31.38
	E_0	MPa	26,664.87
	ε_0	-	0.0022
	ε_{cu}	-	0.0060
Reinforcement bar in tension	σ_y	MPa	392.27
	σ_{tu}	MPa	558.98
	E_0	MPa	200,000
	ε_y	-	0.0020
	ε_{tu}	-	0.09
	ε_r	-	0.108

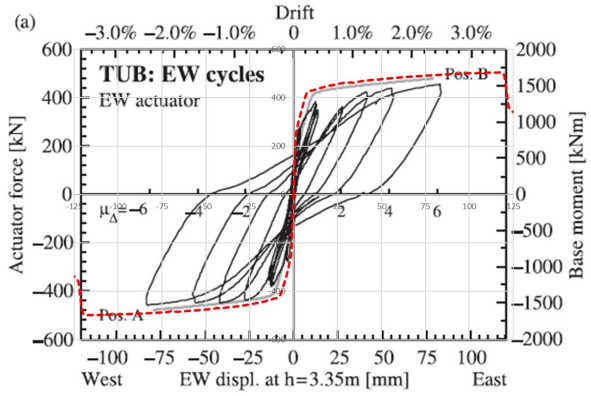
**หมายเหตุ เนื่องจากความต้านทานแรงดึงในคอนกรีตนั้นต่ำ ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ค่ากำลังรับแรงดึงในคอนกรีตเท่ากับ 0*

2.2 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง

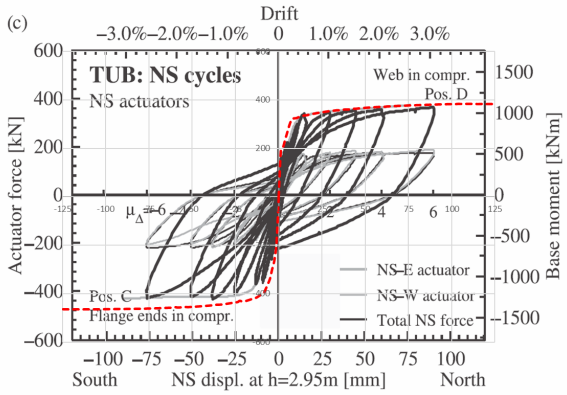
จากแบบจำลองผนังคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม ETABS แสดงดังรูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัว ณ จุดสูงสุดของโครงสร้าง (Top Displacement) กับ แรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) หรือเรียกว่า Pushover Curve จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการผลักในแต่ละทิศทางได้แก่ทิศทาง EW และ NS ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการของ Katrin, B. et al. แสดงดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 6 การสร้างแบบจำลองผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก (TUB) ด้วยโปรแกรม ETABS



รูปที่ 7 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง (TUB) ในทิศทาง EW ระหว่างการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ETABS (เส้นประ)

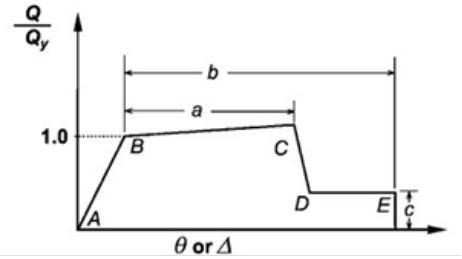


รูปที่ 8 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง (TUB) ในทิศทาง NS ระหว่างการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการของและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ETABS (เส้นประ)

จากผลการสอบเทียบแบบจำลองของโครงสร้างผนังคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม ETABS โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุและเงื่อนไขต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจริงพบว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งระยะการเคลื่อนตัว ณ จุดสูงสุดของโครงสร้างและแรงเฉือนที่ฐาน ได้ผลที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกับผลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการของ Katrin, B. et al. ในระดับที่ยอมรับได้

3. การจำลองและการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือน

การสร้างแบบจำลองอาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) จะกำหนดพฤติกรรมในช่วงไม่เชิงเส้น (Non-linear Behavior) โดยใช้ชิ้นส่วนแผ่นเปลือกบางแบบเป็นชั้น ๆ (Shell Layer Element) สำหรับกำแพงรับแรงเฉือนและการจำลองคุณสมบัติไม่เชิงเส้นของเสาจะกำหนดความสัมพันธ์ของแรงและการเสียรูปในเสา ในรูปของจุดหมุนพลาสติกที่ปลายเสา เป็นการวิบัติที่ควบคุมโดยการดัด โดยอ้างอิงความสัมพันธ์ของแรงและการเสียรูปตาม มยผ. 1303-57 [4] ซึ่งกำหนดลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป ดังแสดงในรูปที่ 9

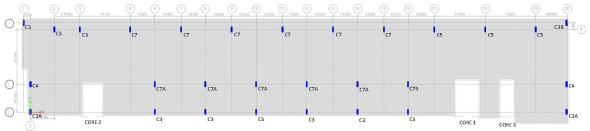


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป มยผ. 1303-57 [4]

เนื่องจากแบบจำลองมีความซับซ้อนมาก ทำให้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Rigid Floor Diaphragm โดยสมมุติว่าพื้นมีความแข็งมากจนไม่มีการเสียรูปทรงในระนาบ (in-plane) มีแต่การเคลื่อนที่ไปพร้อมกันทั้งแผ่นแทนการสร้างแบบจำลองพื้นแบบแผ่นเปลือกบาง (Shell element) หลังจากนั้นทำการกระจายน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ลงสู่เสาและกำแพงรับแรงเฉือนด้วยวิธีพื้นที่รับน้ำหนัก (Tributary area method)

3.1 แบบอาคารตัวอย่าง

อาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือนที่มีความสูง 8 ชั้น (22.8 เมตร) โดยมีแปลนพื้นอาคาร ขนาดของเสาและความหนาของกำแพงรับแรงเฉือนแสดงดังรูปที่ 10



(a)

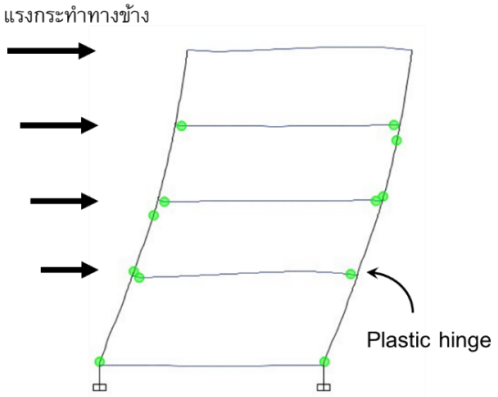
Floor	ขนาดเสา (เมตรxเมตร)								ความหนาของกำแพงรับแรงเฉือน (เมตร)
	C3	C3A	C3B	C4	C5	C7	C7A	C7B	
6th-Roof	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.20
4th-6th	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.32 x 0.87	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.27 x 0.87	0.20
1st-3nd	0.32 x 0.92	0.32 x 0.92	0.32 x 0.92	0.32 x 0.92	0.42 x 0.92	0.32 x 0.92	0.32 x 0.92	0.32 x 0.92	0.20

(b)

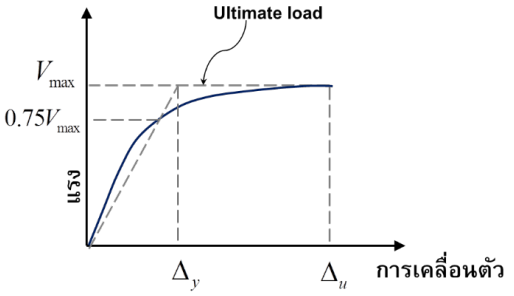
รูปที่ 10 (a) แปลนพื้น (b) ขนาดของเสาและความหนาของกำแพงรับแรงเฉือนของอาคารตัวอย่างที่มีความสูง 8 ชั้นที่ใช้ในงานวิจัย

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหว

การวิเคราะห์พฤติกรรมพลศาสตร์โครงสร้างอาคารเพื่อประเมินกำลังต้านทานแผ่นดินไหวสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Analysis) โดยวิธีดังกล่าวจะสมมติให้แรงแผ่นดินไหวเป็นแรงกระจายแบบสถิตกระทำที่ด้านข้างของโครงสร้างอาคาร และพิจารณาพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นแบบไม่เชิงเส้น จากนั้นเพิ่มขนาดของแรงกระทำทางด้านข้างในทิศทางเดียวจนชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนของโครงสร้างมีการเสียรูปจนเกิดการครากในชิ้นส่วน ทำให้เป็นจุดต่อพลาสติกขึ้น ซึ่งหากโครงสร้างอาคารมีจำนวนจุดต่อพลาสติกมากขึ้นจะส่งผลให้โครงสร้างมีกำลังลดลงและสูญเสียเสถียรภาพตามรูปที่ 11 จากนั้นสามารถหาผลตอบสนองได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) กับการเคลื่อนตัวที่จุดบนสุดของโครงสร้างอาคาร (Roof Displacement) ซึ่งสามารถหาสถานะที่จุดครากของโครงสร้าง (Yield Point) ได้ตามวิธีของ Park [5] ตามรูปที่ 12



รูปที่ 11 วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น



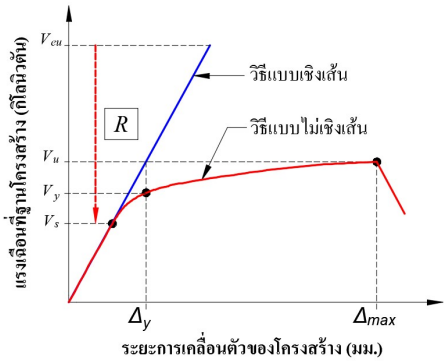
รูปที่ 12 การคำนวณหาสถานะที่จุดครากของโครงสร้างตามวิธีของ Park [5]

3.3 การกำหนดรูปแบบของแรงที่กระทำ (Load Pattern)

การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสามารถกำหนดรูปแบบของแรงที่กระทำได้เพียงแบบเดียว ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้เลือกใช้รูปแบบของแรงที่กระทำแบบโหมด (Modal Load Pattern) โดยเลือกใช้โหมดที่มีผลของมวลประสิทธิผลเชิงโหมด (Modal Mass Participation) ที่มีค่ามากที่สุดของแต่ละทิศทางซึ่งกำหนดให้เป็นโหมดที่ 1 ของทิศทางนั้นๆ นอกจากนี้ในโหมดการสั่นสูง ๆ ของโครงสร้างจะมีการสลายพลังงานหรือมีความหน่วงที่มากขึ้น ส่งผลทำให้การสั่นไหวในโหมดที่สูงจะมีขนาดน้อยกว่า จึงใช้การสั่นไหวในโหมดที่ 1 ในการกำหนดรูปแบบของแรงที่กระทำสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารทีละหนึ่งทิศทาง

4. การคำนวณค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R)

หลักการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหวในปัจจุบัน ได้พิจารณายอมให้ใช้พฤติกรรมของโครงสร้างจนถึงช่วงไม่เชิงเส้น แต่การวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับพฤติกรรมโครงสร้างแบบไม่เชิงเส้นมีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นในมาตรฐานต่าง ๆ จึงยอมให้ใช้การวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับพฤติกรรมโครงสร้างแบบเชิงเส้นได้ แต่กำหนดให้มีค่าปรับแก้ในส่วนนี้ด้วยค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R) ที่แปรผันตามค่าความเหนียวของระบบโครงสร้าง ทั้งนี้การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารแบบเชิงเส้นจะให้ค่าแรงเฉือนที่ฐานของอาคารที่สูงเนื่องจากโครงสร้างไม่เกิดความเสียหายตลอดช่วงที่พิจารณา ซึ่งค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองนั้นขึ้นอยู่กับความเหนียวของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 การปรับค่าแรงเฉือนที่ฐานด้วยค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง

จากรูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นได้ว่าค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าแรงเฉือนที่กระทำสูงสุดที่เกิดจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีแบบเชิงเส้น (V_{eu}) กับค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างอาคารในสภาวะที่โครงสร้างเกิดจุดครากจุดแรก (First Yield, V_s) ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (1)

$$R = \frac{V_{eu}}{V_s} \quad (1)$$

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) ที่ผ่านมาพบว่ามีงานวิจัยเพื่อศึกษาค่า R เฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [6-7] ตามวิธีการของ ATC-19 [8] และตามวิธีการของ Uang [9] สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการหาค่า R ตามวิธีการของ Uang เนื่องจากวิธี ATC-19 มีข้อจำกัดในการหาค่าตัวแปรบางตัวทำให้มีโอกาสที่จะเกิดข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้มาก

การวิเคราะห์หาค่า R ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือนสำหรับอาคารในประเทศไทย โดยการหาค่า R ตามวิธีการของ Uang [9] สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2)

$$R = R_\mu \Omega \tag{2}$$

โดยที่ R_μ คือค่าตัวประกอบเนื่องจากความเหนียวของโครงสร้าง (Ductility Response Factor) และ Ω คือค่าตัวประกอบเนื่องจากกำลังส่วนเกินของโครงสร้าง (Over strength Factor)

4.1 ค่าตัวประกอบเนื่องจากความเหนียวของโครงสร้าง (R_μ)

โครงสร้างอาคารเมื่อได้รับแรงกระทำทางด้านข้าง จะเกิดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างซึ่งจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่กระทำและสติฟเนส (Stiffness) ของโครงสร้าง เมื่อมีการเคลื่อนตัวของโครงสร้างจนไปถึงสถานะที่โครงสร้างถึงจุดคราก (Yield Displacement, Δ_y) ไปจนกระทั่งโครงสร้างเกิดการวิบัติ (Ultimate Displacement, Δ_u) ความสัมพันธ์ของระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดและการเคลื่อนตัว ณ จุดครากของโครงสร้างที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เรียกว่าสัดส่วนการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (Ductility Factor, μ) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (3)

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{3}$$

เมื่อได้ค่าสัดส่วนของการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (μ) แล้วก็สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรเนื่องจากความเหนียวของโครงสร้าง (R_μ) ได้ ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยถึงแนวทางของวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างไว้หลายวิธี เช่น วิธีการคำนวณหาค่าตัวแปรเนื่องจากความเหนียว (R_μ) จากพฤติกรรมของโครงสร้างที่วางอยู่บนดิน 3 ประเภท [10] และสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้นำวิธีการของ Newmark [11] มาใช้ในการหาค่า R_μ โดยพิจารณาจากคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้าง (T) กับค่าสัดส่วนการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (μ) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ตามสมการที่ (4) ถึง (6)

- เมื่อ T < 0.03 วินาที

$$R_\mu = 1 \tag{4}$$

- เมื่อ 0.12 < T < 0.5 วินาที

$$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \tag{5}$$

- เมื่อ T > 1.0 วินาที

$$R_\mu = \mu \tag{6}$$

4.2 ค่าตัวประกอบเนื่องจากกำลังส่วนเกินของโครงสร้าง (Ω)

ค่าตัวประกอบเนื่องจากกำลังส่วนเกินของโครงสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างขณะที่ชิ้นส่วนของโครงสร้างถึงจุดครากจุดแรก (First Yield, V_s) กับค่าแรงเฉือนที่ฐานในสภาวะที่โครงสร้างถึงจุดคราก (V_y) สามารถเขียนในความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (7)

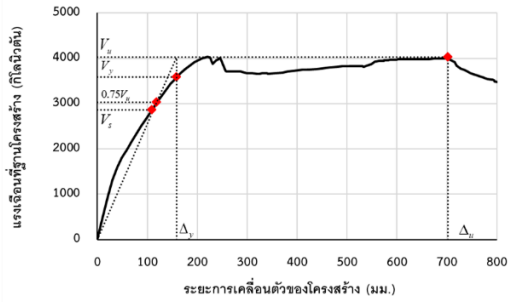
$$\Omega = \frac{V_y}{V_s} \tag{7}$$

5. ผลการวิเคราะห์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือน

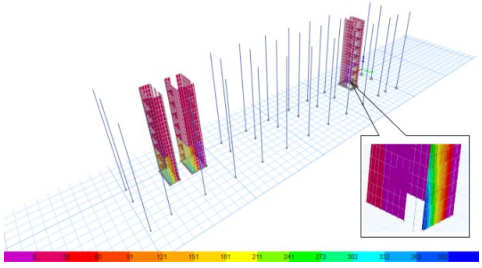
ผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือน โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือน ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบสถิตโดยโครงสร้างมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น และผลการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบปรับผลการตอบสนองด้วยวิธีการหาค่า R ตามสมการที่กล่าวมาข้างต้น

5.1 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือน

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือนที่มีความสูง 8 ชั้น ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกับค่าแรงเฉือนที่ฐานในทิศทาง X และ Y แสดงในรูปที่ 14 และ 16 ตามลำดับ โดยแสดงสภาวะที่โครงสร้างอาคารเกิด First Yield ในทิศทาง X และ Y ตามลำดับ ไว้ดังรูปที่ 15 และ 17 และได้นำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปวิเคราะห์ผลของค่าตัวประกอบต่าง ๆ ที่นำมาใช้วิเคราะห์หาค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) สามารถแสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



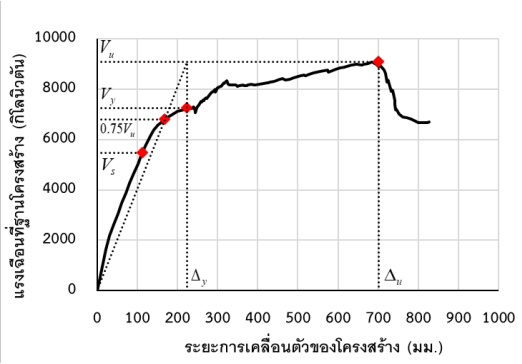
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกับค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือนในทิศทาง X



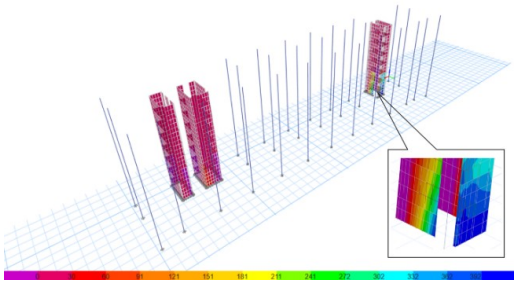
รูปที่ 15 ผลการตอบสนองและค่าความเค้นตามแนวดิ่งของโครงสร้าง ณ สภาวะที่โครงสร้างเกิดจุดครากจุดแรก ในทิศทาง X

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของอาคารที่มีความสูง 8 ชั้นในแนวแกน X

ตัวแปร	หน่วย	ขนาด
V_u	กิโลนิวตัน	4,032
$0.75V_u$	กิโลนิวตัน	3,024
V_y	กิโลนิวตัน	3,584
V_s	กิโลนิวตัน	2,866
Δ_y	มิลลิเมตร	159
Δ_u	มิลลิเมตร	702



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกับค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือนในทิศทาง Y



รูปที่ 17 ผลการตอบสนองและค่าความเค้นตามแนวดิ่งของโครงสร้าง ณ สภาวะที่โครงสร้างเกิดจุดครากจุดแรก ในทิศทาง Y

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของอาคารที่มีความสูง 8 ชั้นในแนวแกน Y

ตัวแปร	หน่วย	ขนาด
V_u	กิโลนิวตัน	9,075
$0.75V_u$	กิโลนิวตัน	6,806
V_y	กิโลนิวตัน	7,247
V_s	กิโลนิวตัน	5,473
Δ_y	มิลลิเมตร	224
Δ_u	มิลลิเมตร	701

5.2 ผลของค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R)

การวิเคราะห์ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือนตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างในหัวข้อ 5.1 มาคำนวณต่อตามวิธีการที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 3 พบว่าค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือนในทิศทาง X มีค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) เท่ากับ 5.54 และในทิศทาง Y เท่ากับ 4.15 สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 4 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301/1302-61) สำหรับระบบโครงสร้างแบบกำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดาซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 ทำให้ค่า R ที่จากการศึกษานี้มีค่าที่ต่ำกว่าสำหรับในทิศทางแกน Y อาจจะเนื่องมาจากการจัดวางรูปแบบกำแพง สำหรับแรงผลักในทิศทาง Y ทำให้กำแพงแต่ละตัวแบ่งกันต้านทานแรง แต่เนื่องจากความไม่สมมาตร อาคารจึงมีการบิดตัว ส่งผลให้กำแพงตัวขวาสุด (รูปที่ 17) จะรับไปมากที่สุด ส่งผลให้การเสียรูปโดยรวมของอาคารมีค่าลดลงและค่าความเหนียวลดลง ทำให้ค่า R ที่ได้มีค่าต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบกับแรงผลักในทิศทาง X พบว่ากำแพงแต่ละตัวจะช่วยกันต้านทานแรงไปด้วยกัน โดยสังเกตได้จากค่าความเค้นตามแนวดิ่งจะมีค่าสูงที่ทุกกำแพงดังรูปที่ 15 ทำให้อาคารสามารถเสียรูปได้มากและมีค่าความเหนียวที่มากกว่า

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) ของอาคารที่มีความสูง 8 ชั้น

ตัวแปร	ทิศทางที่ใช้ในการวิเคราะห์อาคารที่มีความสูง 8 ชั้น	
	X	Y
T ในโหมดที่ 1 (วินาที)	1.92	1.04
μ	4.43	3.13
R_μ	4.43	3.13
Ω	1.25	1.32
R	5.54	4.15

6. สรุปผลการศึกษา

ผลการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) ของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือนทั้งสองทิศทาง มีค่าเท่ากับ 5.54 และ 4.15 สำหรับทิศทางตามแกน X และ แกน Y ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301/1302-61) สำหรับระบบโครงสร้างแบบกำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดาซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 ทำให้ค่า R ที่จากการศึกษามีค่าที่สูงกว่าสำหรับในทิศทางแกน X และมีค่าต่ำกว่าสำหรับในทิศทาง Y ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงรูปแบบของกำแพงบนแปลนโครงสร้าง ทำให้อาคารเกิดการบิดตัว ส่งผลให้การต้านทานแรงของกำแพงแต่ละตัวไม่ร่วมกันต้านไปด้วยกัน ทำให้ค่า R ที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าต่ำ

กว่าในมาตรฐานสำหรับในทิศทางตามแกน Y จึงเป็นข้อควรระวังในการใช้ค่า R ที่ได้สำหรับนำมาใช้ออกแบบอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำแพงรับแรงเฉือน

7. ข้อเสนอแนะ

การเลือกใช้ค่า R ที่นำมาออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวนั้น ควรคำนึงถึงการจัดเรียงรูปแบบของกำแพงรับแรงเฉือน เนื่องจากรูปแบบการจัดเรียงนั้นส่งผลต่อการบิดตัวของอาคาร ทำให้ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าที่ระบุในมาตรฐานการออกแบบ เนื่องจากค่า R ที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ระบุในมาตรฐานเมื่ออาคารนั้นเกิดการบิดตัว ซึ่งเป็นข้อควรระวังในการใช้ค่า R ที่ได้สำหรับนำมาใช้ออกแบบอาคาร

เอกสารอ้างอิง

[1] Katrin, B. et al. (2008). Quasi-Static Cyclic Tests of Two U Shaped Reinforced Concrete Walls. Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.

[2] Lu, Y. and Panagiotou, M. (2014). Three-Dimensional Cyclic Beam-Truss Model for Nonplanar Reinforced Concrete Walls. Journal of Structural Engineering 140(3):04013071, University of California, Berkeley

[3] K. Bathe and E. Dvorkin (1986). A formulation of general shell elements-the use of mixed interpolation of tensorial components. Engineering International Journal for Numerical Methods in Engineering

[4] มยผ.1303-57 (2557). มาตรฐานการประเมินและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวกรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย

[5] Park, R. (1988). Ductility evaluation from laboratory and analytical testing. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, 2-9 August 1988, pp. 605-616.

[6] Toopchi-Nezhad, H. and Sharifi, S. (2017). Seismic Response Modification Factor of RC-Frame Structures Based on Limit State Design. International Journal of Civil Engineering, 16.

[7] Talaeitaba, S. B., Tahvilian, H. and Saeedi, B. (2014). The Effect of the Arrangement and Length of the Concrete Shear Walls on the Response Modification Factor (R) for RC Building Structures. *Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE)*, 10.

[8] ATC-19 (1995). Structural response modification factors. ATC Applied Technology Council.

[9] Chia-Ming Uang. (1991). Establishing R (or Rw) and Cd factors for Building Seismic Provisions. Journal of Structural Engineering, 117, pp. 19-28.

[10] Miranda, E. and Bertero, V. (1994). Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake – Resistant Design. *Earthquake Spectra, 10*, pp. 357-379.

[11] Newmark, N.M. and Hall, W.J. (1982), *Earthquake spectra* and design. EERI Monograph Series, EERI, Oakland.

[12] มยผ.1301/1302-61 (2561). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวกรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย