

การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองกำลังรับแรงเฉือนของกำแพงเดี่ยคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้แรงแผ่นดินไหว

Shear Strength Models for Reinforced Concrete Squat Walls Under Seismic Loading: A Comparative Study

วีระพงษ์ ขมชายผล¹ ปณัสนัยชัย เชษฐโชติศักดิ์^{2,*} และ จารึก ธีระวงษ์³

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น จ.ขอนแก่น

³ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น

*Corresponding author; E-mail address: panatchai.ch@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้รวบรวมและทำการประเมินวิธีการคำนวณออกแบบแรงเฉือนของกำแพงเดี่ยคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลผลการทดสอบ 657 ข้อมูล ซึ่งครอบคลุมตัวแปรสำคัญ วิธีการคำนวณออกแบบแรงเฉือนประกอบไปด้วยวิธีการตาม ACI 318-19 [8] Sánchez-Alejandre และ Alcocer [12] Gulec และ Whittaker [13] Kassem [14] Ning และ Lee [15] Hwang และคณะ [16] Baghi และคณะ [17] ผลการศึกษาพบว่า วิธีการของ Gulec และ Whittaker สามารถทำนายกำลังรับแรงเฉือนของกำแพงเดี่ยคอนกรีตเสริมเหล็กได้ถูกต้องกว่าวิธีการอื่น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนและค่าเฉลี่ยร้อยละของความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด ในขณะที่วิธีการตาม ACI 318-19 มีความไม่แน่นอนสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า วิธีการคำนวณทั้งหมดนี้ ให้ผลการทำนายที่ต่ำกว่าผลการทดสอบ เมื่อกำแพงมีค่ากำลังอัดคอนกรีตต่ำ

คำสำคัญ: กำแพงเดี่ย, กำลังเฉือน, แผ่นดินไหว, คอนกรีตเสริมเหล็ก

Abstract

Seven state-of-the-art shear strength models for reinforced concrete squat walls available in the literature were reviewed and assessed against a large database of 657 test results covering a wide range of important parameters. The selected shear strength models compared in this study consist of ACI 318-19, Sánchez-Alejandre and Alcocer, Gulec and Whittaker, Kassem, Ning and Lee, Hwang et al., Baghi et al. The comparative results indicated that the approach of Gulec and Whittaker predicted the shear strength of squat walls more precisely than the other models with the lowest coefficient of variation and mean absolute error, while the ACI 318-19 method showed the largest error and uncertainty. It was also

found that most of methods considered herein gave the relatively conservative predictions for the members with low concrete strength.

Keywords: squat wall, shear strength, earthquake, reinforced concrete

1. บทนำ

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งประกอบด้วยกำแพงรับแรงเฉือนนั้น มีประสิทธิภาพในการต้านทานแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี ดังจะเห็นได้จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในอดีต ซึ่งอาคารประเภทนี้ เกิดความเสียหายน้อยกว่าอาคารประเภทอื่น [1] กำแพงรับแรงเฉือนที่มีสัดส่วนความสูงต่อความยาวน้อยกว่า 2 นั้นเรียกว่า กำแพงเดี่ยรับแรงเฉือน (squat shear wall) นั้น นิยมใช้กันในอาคารเตี้ยไปจนถึงอาคารสูงปานกลางและโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยทางนิวเคลียร์เป็นต้น ทั้งนี้กำแพงเดี่ยนั้น มีพฤติกรรมเด่นชัดไปในลักษณะแรงเฉือนมากกว่าแรงดัด ดังนั้นจึงมีการศึกษาพฤติกรรมทางด้านแรงเฉือนของกำแพงเดี่ยกันอย่างแพร่หลาย [2-7] ในอดีตมาตรฐาน ACI 318-83 ได้กำหนดวิธีการคำนวณออกแบบกำแพงเดี่ยไว้และยังคงปรากฏอยู่ใน ACI 318-19 [8] ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม Wood [9] และ Gulec และคณะ [10-11] ได้สรุปว่า การคำนวณออกแบบแรงเฉือนของกำแพงเดี่ยตาม ACI 318 นั้นให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ ดังนั้นวิธีการคำนวณออกแบบที่ถูกต้องกว่าจึงยังคงเป็นที่ต้องการ

บทความนี้ได้รวบรวมวิธีการคำนวณออกแบบแรงเฉือนของกำแพงเดี่ยคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ ACI 318-19 [8] Sánchez-Alejandre และ Alcocer [12] Gulec และ Whittaker [13] Kassem [14] Ning และ Lee [15] Hwang และคณะ [16] Baghi และคณะ [17] จากนั้นนำวิธีการดังกล่าวมาคำนวณแรงเฉือนเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ ซึ่งรวบรวมไว้โดย Gulec [18] Adorno-Bonilla [19] และ Usta [20] และโดยผู้เขียน

2. แบบจำลองกำลังต้านทานแรงเฉือนของกำแพงเตี้ย

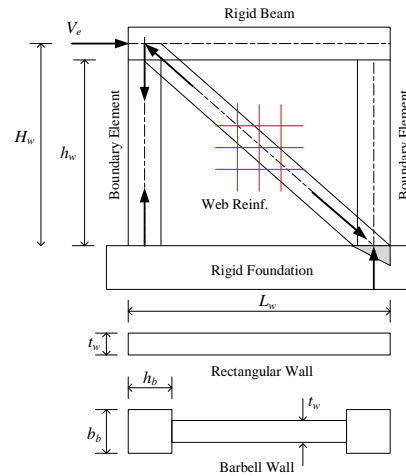
รายละเอียดของวิธีการคำนวณออกแบบแรงเฉือนของกำแพงเตี้ยคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้นำมาแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองสำหรับการคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนของกำแพงเตี้ยคอนกรีตเสริมเหล็ก

แบบจำลอง	รายละเอียด
ACI 318-19	$V_n = (\alpha_c \lambda \sqrt{f'_c} + \rho_t f_{yt}) A_{cv}$ $\alpha_c = 0.25 \text{ for } H_w/L_w \leq 1.5,$ $\alpha_c = 0.17 \text{ for } H_w/L_w \geq 2.0$ <p>For $1.5 < H_w/L_w < 2.0$, linear interpolation of α_c is permit.</p>
Sánchez-Alejandro และ Alcocer [12]	$V_n = (\gamma \eta_v + 0.04 P/A_w) \sqrt{f'_c} + \eta_h \rho_h f_{yh} A_w$ $\gamma = 0.42 - 0.08 M/VL_w,$ $\eta_v = 0.75 + 0.05 \rho_v f_{yv},$ $\eta_h = 1 - 0.16 \rho_h f_{yh} \geq 0.20 \text{ MPa.}$
Gulec และ Whittaker [13]	$V_{nrec} = \frac{1.5 \sqrt{f'_c} A_w + 0.25 F_{vw} + 0.20 F_{vbe} + 0.40 P}{\sqrt{h_w/L_w}} \leq 10 \sqrt{f'_c} A_w$ $V_{nbe} = \frac{0.04 f'_c A_w + 0.40 F_{vw} + 0.15 F_{vbe} + 0.35 P}{\sqrt{h_w/L_w}} \leq 15 \sqrt{f'_c} A_w$ <p>where F_{vw} และ F_{vbe} are the forces developed in vertical web และ vertical boundary element reinforcement, respectively;</p>
Kassem [14]	$V_{nrec} = 0.27 f'_c (\psi k_s \sin(2\alpha) + 0.1 \omega_h H_w/L_w + 0.30 \omega_h \cot \alpha) d_w t_w \leq 0.83 \sqrt{f'_c} d_w t_w$ $V_{nbe} = 0.47 f'_c (\psi k_s \sin(2\alpha) + 0.15 \omega_h H_w/L_w + 1.76 \omega_h \cot \alpha) d_w t_w \leq 1.25 \sqrt{f'_c} d_w t_w$ $\psi = 0.95 - f'_c/250, k_s = \frac{a_s}{d_w}, \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{H_w}{d_w} \right)$ $a_s = \left(0.25 + 0.85 \frac{N}{A_w f'_c} \right) L_w, \omega_h = \frac{\rho_h f_{yh}}{f'_c},$ $\omega_v = \frac{\rho_v f_{yv}}{f'_c}$
Ning และ Lee [15]	$V_n = \left(0.31 \rho_{vbe} f_{ybe} t_f h_f + 0.27 \rho_v f_{yv} t_w z_w + \frac{P}{2} \right) \frac{d_w}{h_w} + 0.46 \rho_h f_{yh} t_w h_w$ $d_w = L_w - \frac{1}{2} \left(\frac{0.31 \rho_{vbe} f_{ybe} t_f h_f + P}{0.49 f'_c h_f} \right) - \frac{t_f}{2}$
Hwang และคณะ [16]	$V_n = K v f'_c A_{str} \sin \theta_s, K \text{ is the strut-and-tie index based on the orthogonal web reinforcement } v = 3.35/\sqrt{f'_c} \leq 0.52,$ $A_{str} = \left(0.25 + 0.85 \frac{N}{A_w f'_c} \right) L_w t_w$
Baghi และคณะ [17]	$V_n = 2\beta f'_c{}^{0.65} b_f t_f + \beta f'_c{}^{0.65} t_w L_w + 2\beta f'_c{}^{0.65} + \rho_h f_{yh} \cot \theta t_w L_w$ $\beta = \alpha (0.2x^{0.02} - 0.1y^{1.5}), \theta = 0.6\beta^{-0.8} + 60$ $x = \left(\frac{\rho_f f_{yf}}{f'_c} + \frac{\rho_v f_{yv}}{f'_c} \right) \frac{H_w}{L_w}, y = \left(\frac{\rho_h f_{yh}}{f'_c} + \frac{N}{A_w f'_c} \right)$

ทุกแบบจำลองใช้หน่วย SI ยกเว้น Gulec และ Whittaker [13] ใช้หน่วย ฟุต-ปอนด์

โดยทั่วไปวิธีการคำนวณจะแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ 1) วิธีการสำหรับกำแพงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และ 2) วิธีการสำหรับกำแพงรูปท่อนเหล็กยกน้ำหนัก (barbell wall) ทั้งนี้ กำแพงที่มีเสาล้อมรอบ กำแพงรูปตัว H และ กำแพงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีเหล็กเสริมที่ขอบทั้งสองด้าน จะถือว่าเป็นเป็นกำแพงในประเภทที่ 2



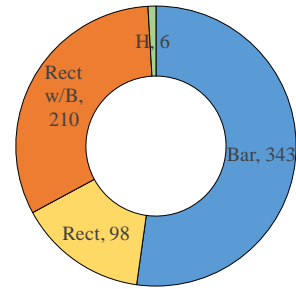
รูปที่ 1 รูปแบบทั่วไปของกำแพงเตี้ยรับแรงเฉือน

สมการแรงเฉือนของกำแพงเตี้ยตาม ACI 318 นั้นพัฒนามาจากแบบจำลองโครงข้อหมุนที่ใช้สำหรับคาน ค.ส.ล. ทั่วไป ประกอบไปด้วยส่วนรับแรงเฉือนของคอนกรีตและส่วนของเหล็กปลอก ทั้งนี้สมการแรงเฉือนของกำแพงเตี้ยได้ปรากฏอยู่ในภาคผนวกของมาตรฐาน ACI 318 ตั้งแต่ปี 1983 และยังปรากฏใน ACI 318-19 [8] ในปัจจุบันวิธีการของ Sánchez-Alejandro และ Alcocer [12] นั้นมีรูปแบบเป็นสมการเชิงประสพการณ์ ส่วน Gulec และ Whittaker [13] นั้นเป็นสมการกึ่งเชิงประสพการณ์ โดยพิจารณาจากกำลังต้านทานแรงเฉือนด้านข้างของกำแพงเตี้ย สำหรับ Kassem [14] Ning และ Lee [15] และ Hwang และคณะ [16] เป็นแบบจำลองแบบค้ำยันและตัวยึด (strut-and-tie model) ซึ่งสมมุติว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของกำแพงนั้นประกอบไปด้วยกำลังจากส่วนของแกนค้ำยันรับแรงอัด และกำลังจากเหล็กเสริมในแนวตั้งและแนวนอนและสุดท้าย Baghi และคณะ [17] พัฒนามาแบบจำลองจากทฤษฎีสถานะแรงอัด (Modified Compression Field Theory, MCFT) ซึ่งสมมุติว่าหน่วยแรงที่กระทำกับชิ้นส่วนผนังนั้นกระทำอย่างกระจายสม่ำเสมอและใช้กระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในการเปรียบเทียบแบบจำลอง สำหรับตารางที่ 2 แสดงถึงจำนวนข้อมูลผลการทดสอบสำหรับการเปรียบเทียบ (calibration) และพารามิเตอร์สำคัญ ในแต่ละวิธีการ ซึ่งได้แก่ กำลังอัดคอนกรีต (f'_c) อัตราส่วนความสูงต่อความยาว (H_w/L_w) เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมในช่วงปีกหรือเสาของกำแพง (A_{be}) เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมในแนวตั้ง (A_v) เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมในแนวนอน (A_h) และอัตราส่วนน้ำหนักในแนวตั้ง ($\frac{N_c}{A_g f'_c}$)

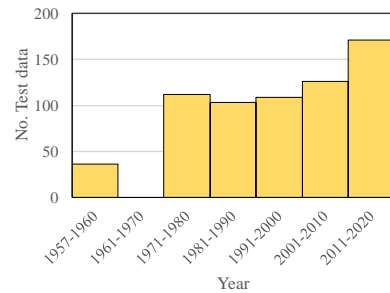
โดยภาพรวมแล้ว f'_c และ $\frac{H_w}{L_w}$ เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ทุกแบบจำลองนำมาพิจารณา และเป็นที่น่าสนใจว่า สมการของ ACI 318-19 [8] มีพารามิเตอร์สำคัญจำนวนน้อยที่สุด ส่วน Kassem [14] ใช้ข้อมูลผลการทดสอบในการปรับเทียบจำนวนมากที่สุด ขณะที่ Hwang และคณะ [16] ใช้ข้อมูลน้อยที่สุด

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่สำคัญในแต่ละแบบจำลอง

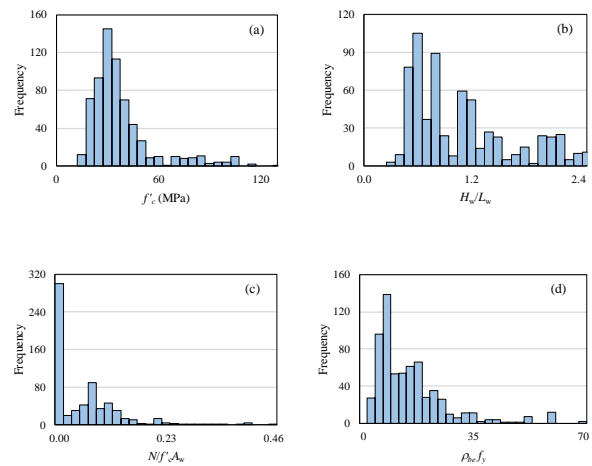
แบบจำลอง	จำนวนข้อมูลที่ใช้	พารามิเตอร์ที่สำคัญ					
		f'_c	$\frac{H_w}{L_w}$	A_{be}	A_v	A_h	$\frac{N_c}{A_g f'_c}$
ACI 318-19	—	✓	✓	—	—	✓	—
Sánchez-Alejandre และ Alcocer [12]	372	✓	✓	—	✓	✓	✓
Gulec และ Whittaker [13]	227	✓	✓	✓	✓	—	✓
Kassem [14]	645	✓	✓	—	✓	✓	✓
Ning และ Lee [15]	182	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hwang และคณะ [16]	62	✓	✓	—	✓	✓	✓
Baghi และคณะ [17]	209	✓	✓	✓	✓	✓	✓



รูปที่ 2 การจำแนกประเภทของกำแพงเตี้ย



รูปที่ 3 จำนวนผลการทดสอบในแต่ละช่วง 10 ปี



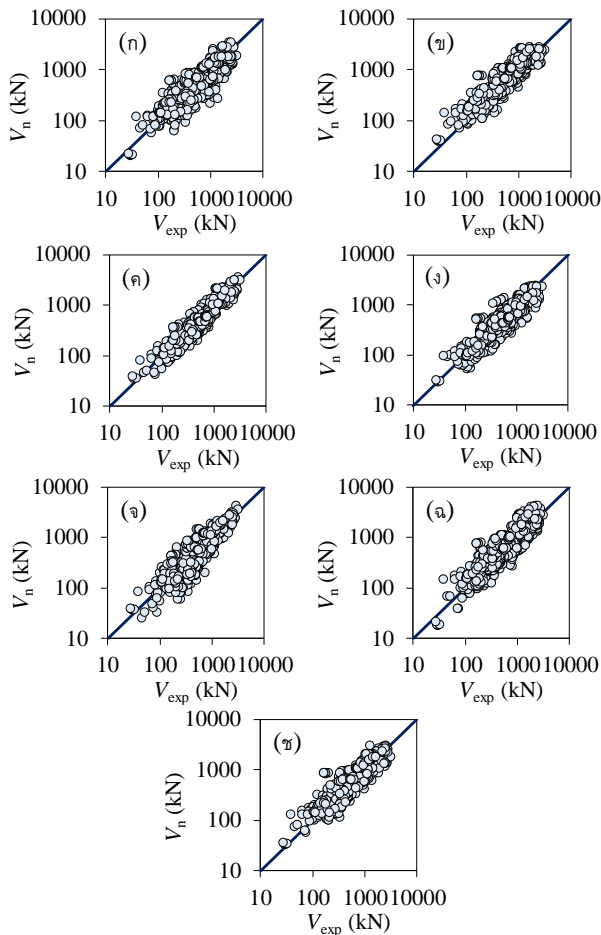
3. ฐานข้อมูลผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของกำแพงเตี้ย

ข้อมูลผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของกำแพงเตี้ยภายใต้แรงสลับทิศจากห้องปฏิบัติการ ซึ่งรวบรวมจากวารสารวิจัยนานาชาติโดย Gulec [18] Adorno-Bonilla [19] และ Usta [20] และโดยผู้เขียน รวมทั้งสิ้น 657 ข้อมูล จากข้อมูลทั้งหมด สามารถจำแนกประเภทของกำแพงได้ 4 ประเภท ดังรูปที่ 2 คือ 1) กำแพงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน 98 ข้อมูล 2) กำแพงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีเหล็กเสริมที่ขอบทั้งสองด้านจำนวน 210 ข้อมูล 3) กำแพงที่มีเสาล้อมรอบ จำนวน 343 ข้อมูล และ 4) กำแพงรูปตัว H จำนวน 6 ข้อมูล รูปที่ 3 แสดงถึงจำนวนผลการทดสอบในแต่ละช่วงปี พบว่าในแต่ละช่วง 10 ปี มีจำนวนตัวอย่างทดสอบไม่ต่ำกว่าช่วงละ 100 ตัวอย่าง ซึ่งแสดงถึงความน่าสนใจและความต่อเนื่องของงานวิจัยในด้านนี้

รูปที่ 4 การกระจายของพารามิเตอร์สำคัญ

รูปที่ 4 แสดงการกระจายข้อมูลของพารามิเตอร์สำคัญได้แก่ f'_c , $\frac{H_w}{L_w}$, $\frac{N_c}{A_g f'_c}$ และอัตราส่วนเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมในช่วงปีกของกำแพง $\rho_{be} f_y$ พบว่า ฐานข้อมูลครอบคลุมช่วงของคอนกรีตกำลังธรรมดาและกำลังสูง มีอัตราส่วน $\frac{H_w}{L_w}$ ตั้งแต่ 0.3 ถึง 2.4 มีอัตราส่วนน้ำหนักในแนวตั้งไม่เกิน 0.46 แต่ข้อมูลส่วนใหญ่นั้นไม่มีน้ำหนักในแนวตั้ง และสำหรับ $\rho_{be} f_y$ นั้นมีค่าไม่เกิน 70

4. ผลการคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนของกำแพงเตี้ย



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลการคำนวณและกำลังเฉือนจากการทดสอบของกำแพงเตี้ย (ก) ACI 318-19; (ข) Sánchez-Alejandro และ Alcocer [12]; (ค) Gulec และ Whittaker [13]; (ง) Kassem [14]; (จ) Ning และ Lee [15]; (ฉ) Hwang และคณะ [16]; (ช) Baghi และคณะ [17]

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพในการทำนายของแต่ละแบบจำลอง

แบบจำลอง	AVG	%COV	MAPE
ACI 318-19	1.29	49.3	38.4
Sánchez-Alejandro และ Alcocer [12]	1.00	35.1	32.9
Gulec และ Whittaker [13]	1.17	29.2	23.6
Kassem [14]	1.30	36.6	30.4
Ning และ Lee [15]	1.22	45.9	33.5
Hwang และคณะ [16]	1.12	38.6	37.3
Baghi และคณะ [17]	1.12	38.1	34.3

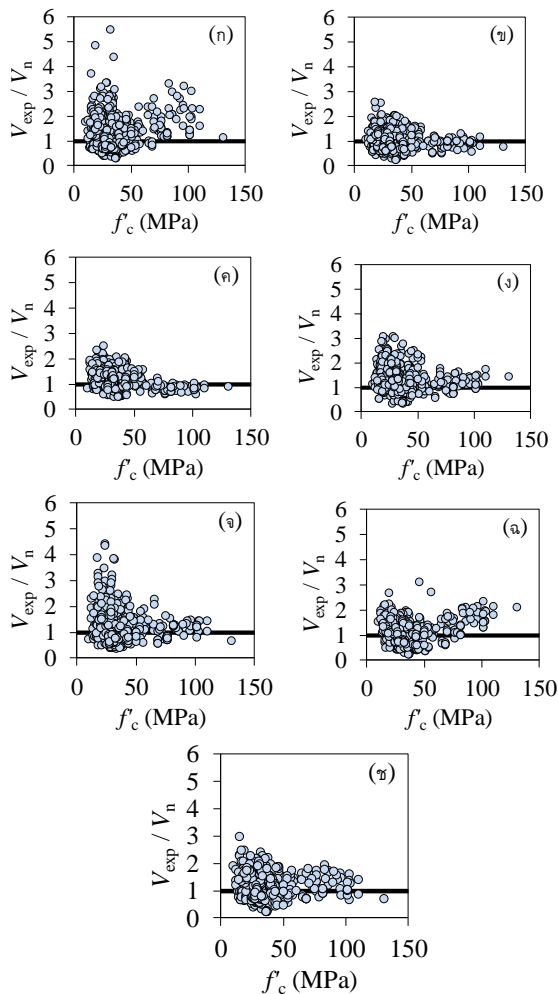
รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของกำแพงเตี้ย ในขณะที่ตารางที่ 3 แสดงถึงค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ AVG ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน COV และค่าเฉลี่ยของร้อยละ

ของความคลาดเคลื่อน MAPE โดยที่ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติเหล่านี้จะใช้บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของแต่ละแบบจำลอง ยกตัวอย่างเช่น หากแบบจำลองใดมี ค่า AVG มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แสดงว่าโดยเฉลี่ยแล้วการคำนวณให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ในขณะที่ COV และ MAPE มีค่าน้อย แสดงถึงแบบจำลองมีความผันผวนและความคลาดเคลื่อนต่ำ ตามลำดับ จากรูปที่ 4 และตารางที่ 3 พบว่า โดยรวมแล้ว ทุกแบบจำลองมีความผันผวนหรือความไม่แน่นอนค่อนข้างสูงพอสมควรซึ่งดูได้จากค่า COV มีค่าราวๆ 30% ถึง 50% และ MAPE มีค่าราว 30 ถึง 38

สาเหตุที่แบบจำลองที่เลือกมาทั้งหมดนี้ มีความคลาดเคลื่อนและมีความไม่แน่นอนสูงสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ สมการแรงเฉือนของกำแพงเตี้ยตาม ACI 318 นั้น พัฒนามาจากแบบจำลองโครงข้อหมุนที่ใช้สำหรับคาน ค.ส.ล. ทั่วไปเพื่อต้านทานแรงโน้มถ่วง แต่อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันดีว่าคาน ค.ส.ล. รับน้ำหนักในแนวตั้งนั้น มีพฤติกรรมแตกต่างจากกำแพงเตี้ย ค.ส.ล. ภายใต้แรงแผ่นดินไหวโดยสิ้นเชิง นอกจากนี้ผลประเมินความคลาดเคลื่อนของสมการ ACI 318-19 [8] ที่ได้ในบทความนี้ สอดคล้องกับ Wood [9] ซึ่งใช้ข้อมูลผลการทดสอบเพียง 143 ตัวอย่าง สำหรับแบบจำลองที่เหลือนั้นมีทั้งแบบจำลองเชิงประสบการณ์ และกึ่งเชิงประสบการณ์ ดังนั้นความถูกต้องของแบบจำลองจึงขึ้นอยู่กับ กลไกการต้านทานแรงกระทำที่เหมาะสม จำนวนพารามิเตอร์สำคัญและจำนวนข้อมูลผลการทดสอบที่ใช้ในการปรับเทียบเป็นสำคัญ

Gulec และ Whittaker [13] ดูจะเป็นแบบจำลองที่มีความคลาดเคลื่อนและผันผวนต่ำที่สุด ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าได้พิจารณาผลไกการต้านทานแรงกระทำของกำแพงและมีพารามิเตอร์สำคัญอย่างเหมาะสมกว่าแบบจำลองอื่น

สำหรับแบบจำลองแกนค้ำยันและตัวยึด ดูเหมือนว่าจะเป็นแบบจำลองที่มีกลไกการต้านทานแรงกระทำที่สมเหตุสมผลที่สุด [21-22] สำหรับองค์อาคารในบริเวณไร้ความต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ความถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของแกนค้ำยันรับแรงอัดเป็นสำคัญ [23-24] ทั้งนี้ การคำนวณหาขนาดของแกนค้ำยันในแบบจำลองของ Kassem [14] และ Hwang และคณะ [16] นั้นใช้วิธีประมาณซึ่งแนะนำโดย Paulay และ Priestley [25] สำหรับการคำนวณหาความลึกของส่วนรับแรงอัดจากการตัดของเสาในสถานะยึดหยุ่น อย่างไรก็ตามสถานะขอบเขตของเสาและกำแพงนั้นแตกต่างกันอย่างชัดเจน การกระจายของหน่วยแรงอัดจากการตัดของกำแพงอาจไม่เหมือนกับในเสาและเป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งว่า แบบจำลองของ Kassem [14] ใช้ข้อมูลผลการทดสอบมากถึง 645 ตัวอย่าง แต่ยังคงให้ผลการคำนวณที่คลาดเคลื่อนสูง อาจเป็นไปได้ว่า นอกจากการคำนวณหาขนาดของแกนค้ำยันรับแรงอัดที่ไม่สมเหตุสมผลแล้วสิ่งที่กล่าวไปแล้วนั้น แบบจำลองของ Kassem [14] ไม่ได้พิจารณาเหล็กเสริมในช่วงปีกของกำแพงซึ่งถือว่าเป็นพารามิเตอร์สำคัญ [13] ตัวหนึ่ง แม้ว่าแบบจำลอง Baghi และคณะ [17] ได้พิจารณาพารามิเตอร์สำคัญครบถ้วนกว่าแบบจำลองอื่นแต่มีสมมติฐานที่ว่าหน่วยแรงที่กระทำกับชิ้นส่วนผนังนั้นกระจายอย่างกระจายสม่ำเสมอ ทั้งนี้ สมมติฐานดังกล่าวนี้ ไม่เหมาะสมกับองค์อาคารในบริเวณไร้ความต่อเนื่องอย่างคานสีก และ กำแพงเตี้ยรับแรงเฉือน [21-22]



รูปที่ 6 ผลกระทบของกำลังอัดคอนกรีตที่มีต่อการคำนวณของแบบจำลอง (ก) ACI 318-19; (ข) Sánchez-Alejandre และ Alcocer [12]; (ค) Gulec และ Whittaker [13]; (ง) Kassem [14]; (จ) Ning และ Lee [15]; (ฉ) Hwang และคณะ [16]; (ช) Baghi และคณะ [17]

รูปที่ 6 แสดงถึงผลกระทบของกำลังอัดคอนกรีตที่มีต่อการทำนายกำลังเฉือนของแต่ละแบบจำลอง จากรูปพบว่า โดยส่วนใหญ่แล้วเกือบทุกแบบจำลองจะให้ผลการคำนวณที่ต่ำกว่าผลการทดสอบและมีความแปรปรวนมากเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดต่ำและเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น แบบจำลองจะมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ยกเว้น ACI 318-19 [8] และ Hwang และคณะ [16]

5. สรุปผลการศึกษา

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนของกำแพงเตี้ยคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงแผ่นดินไหวจากแบบจำลองกับฐานข้อมูลผลการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 วิธีการคำนวณตาม ACI 318-19 มีความคลาดเคลื่อนและผันผวนมากที่สุด เนื่องจากมีจำนวนพารามิเตอร์สำคัญน้อยเกินไป

5.2 แบบจำลองของ Gulec and Whittaker[13] ให้ผลการคำนวณที่คลาดเคลื่อน และมีความผันผวนน้อยที่สุด เนื่องจากได้พิจารณาผลของการต้านทานแรงกระทำที่สมเหตุสมผลและมีพารามิเตอร์สำคัญครบถ้วนกว่า

5.3 แบบจำลองโดยส่วนใหญ่จะให้ผลการคำนวณค่อนข้างไปโนเชิงอนุรักษ์และมีความแปรปรวนมากเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดต่ำ

5.4 ผลที่ได้จากการศึกษานี้ ชี้ให้เห็นว่าการทำนายกำลังต้านทานแรงเฉือนของกำแพงเตี้ยคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่มีความถูกต้องแม่นยำนั้นยังคงเป็นที่ต้องการอยู่ ซึ่งผู้เขียนจะได้นำเสนองานวิจัยในครั้งถัดไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fintel M. Shearwalls – *an answer for seismic resistance?* *Concr Int* 1991;13(7):48–53.
- [2] Lefas LD, Kotsovos MD, Ambraseys NN. Behaviour of reinforced concrete structural walls: strength, deformation characteristics, and failure mechanism. *ACI Structural Journal* 1990;87(1):23–31.
- [3] Gupta A, Rangan BV. High-strength concrete (HSC) structural walls. *ACI Structural Journal* 1998;95(2):194–205.
- [4] Salonikios NT, Kaos AJ, Tegos IA, Penelis GG. Cyclic load behaviour of low slenderness reinforced concrete walls: design basis and test results. *ACI Structural Journal* 1999;96(4):649–660.
- [5] Sittipunt C, Wood SL, Lukunaprasit P, Pattarattanukul P. Cyclic behavior of reinforced concrete structural walls with diagonal web reinforcement. *ACI Structural Journal* 2001;98(4)
- [6] Oh YH, Han SW, Lee LH. Effect of boundary element details on the seismic deformation capacity of structural walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2002;31(8):1583–1602.
- [7] Liang X, Che J, Yang P, Deng M. Seismic behavior of high-strength concrete structural walls with edge columns. *ACI Structural Journal* 2013;110(6):953–963.
- [8] American Concrete Institute. *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19)*, Farmington Hills, Michigan; 2019.
- [9] Wood SL. Shear strength of low-rise reinforced concrete walls. *ACI Structural Journal* 1990;87(1).

- [10] Gulec CK, Whittaker AS, Stojadinovic B. Shear strength of squat rectangular reinforced concrete walls. *ACI Structural Journal* 2008;105(4):488–497.
- [11] Gulec CK, Whittaker AS, Stojadinovic B. Peak shear strength of squat reinforced concrete walls with boundary barbells or flanges. *ACI Structural Journal* 2009;106(3):368–377.
- [12] Sánchez-Alejandre A, Alcocer SM. Shear strength of squat reinforced concrete walls subjected to earthquake loading – trends and models. *Engineering Structures* 2010;32(8):2466–2476.
- [13] Gulec CK, Whittaker AS. Empirical equations for peak shear strength of low aspect ratio reinforced concrete walls. *ACI Structural Journal* 2011;108(1):80–89.
- [14] Kassem W. Shear strength of squat walls: a strut-and-tie model and closed-form design formula. *Engineering Structures* 2015; 84:430–438.
- [15] Ning CL, Li B. Probabilistic development of shear strength model for reinforced concrete squat walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2017; 46:877–897.
- [16] Hwang SJ, Tsai RJ, Lam WK, Moehle JP Simplification of softened strut-and-tie model for strength prediction of discontinuity regions. *ACI Structural Journal*. 2017; 114(5):1239–1248.
- [17] Baghi H, Baghi H, Siavashi S. Novel Empirical expression to predict shear strength of reinforced concrete walls based on particle swarm optimization. *ACI Structural Journal*. 2019; 116(5): 247–260.
- [18] Gulec CK. *Performance-based assessment and design of squat reinforced concrete shear walls*. New York (United States): State University of New York at Buffalo; 2009.
- [19] Adorno-Bonilla CM. *Shear strength and displacement capacity of squat reinforced concrete shear walls*. University of Puerto Rico Mayagüez Campus; 2016.
- [20] Usta, M. *Shear strength of structural walls subjected to load cycles*. MS thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, 2017.
- [21] Hwang SJ, Fang WH, Lee HJ, Yu HW. Analytical model for predicting shear strength of squat walls. *Journal of Structure Engineering ASCE* 2001;127(1):43–50.
- [22] Yu HW, Hwang SJ. Evaluation of softened truss model for strength prediction of reinforced concrete squat walls. *Journal of Engineering Mechanics ASCE* 2005;131(8): 839–846.
- [23] Lim E, Hwang SJ. Modeling of the strut-and-tie parameters of deep beams for shear strength prediction. *Engineering Structure* 2016;108: 104–112.
- [24] Chetchotisak P, Arjsri E, Teerawong J. Strut-and-tie model for shear strength prediction of RC exterior beam–column joints under seismic loading. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020; 18:1525–1546.
- [25] Paulay T, Priestley M. *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. New York: Wiley; 1992.