บทที่ 5

การวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.1 ผลการวิเคราะห์กำลังของตัวอย่างการทดสอบ BF, W และ W-SR

การวิเคราะห์กำลังจะใช้ทฤษฎีการวิบัติของผนังอิฐก่อภายในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะได้แก่ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Resistance) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Sliding Shear Resistance) และ กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) สำหรับวิธีการออกแบบโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์เป็นไปตามมาตรฐาน ACI549 สำหรับการวิเคราะห์กำลังเบื้องต้นจะทำให้ได้แรงกระทำสูงสุดที่เกิดจากการวิบัติทั้ง 3 โดยจะทำการเปรียบเทียบเนื่องจากแรงกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่านั้นในการวิเคราะห์ ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณดังแสดงในภาคผนวกที่ ง

5.1.1 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงของตัวอย่างการทดสอบ BF

กำลังต้านทานโครงอาคารเปล่าสามารถคำนวณได้จาก ค่าโมเมนต์พลาสติกในเสา (M_{pc}) จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CSI-Column ได้ค่าโมเมนต์พลาสติกเท่ากับ 10,337 kg-m (101.37 kN-m) และค่าโมเมนต์ของจุดต่อของเสาคาน (M_{pj}) เท่ากับ 2,546 kg-m (24.93 kN-m) สามารถคำนวณกำลังต้านทานโครงอาคารเปล่าซึ่งได้ค่ากำลังต้านทานโครงอาคารเปล่า R_{BF} เท่ากับ 74.29 kN

5.1.2 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงของตัวอย่างการทดสอบ W

สำหรับตัวอย่างการทดสอบ W การวิเคราะห์กำลังจะใช้ทฤษฎีการวิบัติของผนังอิฐก่อภายในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะได้แก่ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Resistance) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Sliding Shear Resistance) และ กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) ซึ่งมีตัวอย่างการคำนวณดังแสดงในภาคผนวกที่ ง และได้ผลสรุปการวิเคราะห์วิเคราะห์ภายใต้ทฤษฎีการวิบัติของผนังอิฐก่อภายในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงด้านข้างของตัวอย่างการทดสอบ W

รูปแบบการวิบัติ	แรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดจากการวิเคราะห์ (kN)	แรงกระทำทางด้านข้างรวมกับแรงของโครงข้อแข็งเปล่า (kN)
กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง	312.90	383.75
กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล	326.80	397.65
กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง	329.90	400.75

จากการวิเคราะห์กำลังของตัวอย่างการทดสอบ W ด้วยกำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Resistance) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Sliding Shear Resistance) และ กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) ดังนั้นกำลัง

ต้านทานกำหนดด้วยค่ากำลังต้านทานที่น้อยที่สุดจากการวิเคราะห์ทั้งกำลังต้านทั้ง 3 แบบ คือกำลังต้านทานในแนวทแยงรวมกับโครงข้อแข็งเปล่าเท่ากับ 383.75 kN

5.1.3 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงของตัวอย่าง W-SR

สำหรับตัวอย่าง W-SR ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีก TYPE-1 การวิเคราะห์กำลังจะใช้ทฤษฎีการวิบัติของผนังอิฐก่อภายในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะได้แก่ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Resistance) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Sliding Shear Resistance) และ กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์กำลังในตัวอย่าง W แต่จะคำนวณการเสริมกำลังผนังอิฐก่อจาก วิธีการออกแบบโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์ตามมาตรฐาน ACI549 แล้วนำค่าแรงที่ได้ไปรวมกับค่ากำลังจากการวิบัติทั้ง 3 ลักษณะดังที่ได้กล่าว ซึ่งมีตัวอย่างการคำนวณดังแสดงในภาคผนวกที่ ง และได้ผลสรุปการวิเคราะห์วิเคราะห์ภายใต้ทฤษฎีการวิบัติของผนังอิฐก่อภายในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงด้านข้างของตัวอย่างการทดสอบ W-SR

รูปแบบการวิบัติ	แรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดจากการวิเคราะห์ (kN)	แรงกระทำทางด้านข้างรวมกับแรงของโครงข้อแข็งเปล่า (kN)
กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง	494.48	565.30
กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล	433.90	577.20
กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง	433.60	504.40

จากการวิเคราะห์กำลังของตัวอย่างการทดสอบ W-SR ด้วยกำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Resistance) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Sliding Shear Resistance) และ กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) ดังนั้นกำลังต้านทานกำหนดด้วยค่ากำลังต้านทานที่น้อยที่สุดจากการวิเคราะห์กำลังต้านทั้ง 3 แบบ คือกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง รวมการเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกเท่ากับ 504.4 kN

5.1.4 สรุปการวิเคราะห์กำลังรับแรงเปรียบเทียบกับการทดสอบของตัวอย่าง BF , W และ W-SR

ผลการเปรียบเทียบกำลังจากการทดสอบและการวิเคราะห์ของตัวอย่าง BF , W และ W-SR ได้สรุปผลดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบกำลังจากการทดสอบและการคำนวณตัวอย่าง BF , W และ W-SR

ตัวอย่าง	การวิเคราะห์		ผลการทดสอบ		ค่าความคลาดเคลื่อน %
	แรงกระทำทางด้านข้าง (kN)	รูปแบบการวิบัติ	แรงกระทำทางด้านข้าง (kN)	รูปแบบการวิบัติ	
BF	74.29	-	72.46	-	2.46
W	383.80	กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง	407.19	กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง	6.09
W-SR	504.40	กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง	490.93	กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง	2.67

ตัวอย่างการทดสอบ BF ซึ่งเป็นโครงข้อแข็งปล่าว จากผลการวิเคราะห์ได้กำลังรับแรงด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 74.29 kN มีค่าแตกต่างจากผลการทดสอบเท่ากับร้อยละ 2.46 %

ตัวอย่างการทดสอบ W ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ก่อด้วยผนังอิฐมอญ ในการคำนวณกำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล และกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง ได้ผลการวิเคราะห์เท่ากับ 312.9 , 337.9 และ 329.9 kN ตามลำดับ โดยกำลังต้านทานกำหนดด้วยค่าที่น้อยที่สุด คือกำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง ดังนั้นกำลังต้านทานรวมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อด้วยผนังอิฐมอญ $H = R_{BF} + R_{DC}$ เท่ากับ 383.75kN และมีค่าแตกต่างจากผลการทดสอบเท่ากับร้อยละ 6.09 %

ตัวอย่างการทดสอบ W-SR ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ก่อด้วยผนังอิฐมอญและเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีก TYPE-1 ในการวิเคราะห์ผลของการคำนวณกำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล และกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง ได้ผลการวิเคราะห์เท่ากับ 494.48 , 433.90 และ 433.60 kN ตามลำดับ ในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง W แต่สำหรับการเสริมกำลังด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ ในการคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนของผนังเสริมกำลัง ดังนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์จะต้องนำค่าการวิเคราะห์มารวมกันเพื่อเป็น กำลังต้านทานแรงเฉือนรวม โดยกำลังต้านทานกำหนดด้วยค่าที่น้อยที่สุดในการคำนวณกำลังต้านทานทั้ง 3 คือกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนังดังนั้นกำลังต้านทานรวมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังผนังอิฐก่อ $H = R_{BF} + R_{CC}$ เท่ากับ 504.4 kN และมีค่าแตกต่างจากผลการทดสอบเท่ากับร้อยละ 2.67 % ผลของความแตกต่างที่เกิดขึ้นเนื่องจาก เมื่อเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกทำให้เพิ่มความแข็งแกร่งทางด้านโครงสร้างผนังอิฐก่อได้เป็นอย่างดีเมื่อทำการทดสอบส่งผลให้เกิดความเสียหายที่เสาเนื่องจากการทดสอบจะเสียหายเนื่องจากกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนังส่งผลทำให้เสาเกิดพฤติกรรมเป็น เสาสั้นจนทำให้เสาเกิดการวิบัติจากแรงเฉือนก่อนทำให้ผนังที่เสริมกำลังยังรับกำลังได้ไม่เต็มกำลัง สังเกตได้เมื่อเทียบกับตัวอย่าง W ผนังจะเกิดการวิบัติก่อนโครงสร้างข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ตัวอย่าง W-SR ยังไม่เกิดความเสียหายต่อตัวโครงสร้างผนังมากหนัก

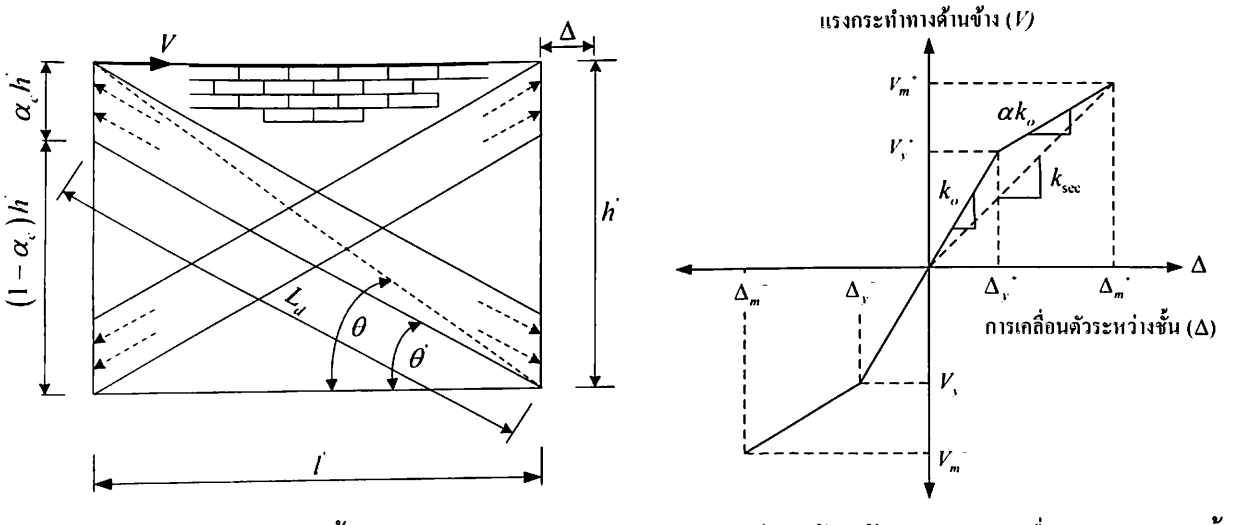
การวิเคราะห์กำลังที่ได้เป็นเพียงการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีการวิบัติของผนังอิฐก่อภายในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะได้แก่ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Resistance) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Sliding Shear Resistance) และกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) เบื้องต้นเท่านั้น แต่สำหรับการสร้างแบบจำลองสอบเทียบกับผลการทดสอบจำเป็นต้องวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นทั้งกรณีการให้แรงในทิศ

ทางบวกและการให้แรงในทิศทางลบ รวมถึงการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการวิบัติในแต่ละช่วงของการทดสอบเพื่อจะทำให้ผลการสร้างแบบจำลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร

5.2 การสร้างแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่างการทดสอบ BF, W และ W-SR

5.2.1 แบบจำลองกำลังต้านทานแรงกดอัดผนังอิฐก่อในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

การสร้างแบบจำลองกำลังต้านทานแรงกดอัดผนังอิฐก่อในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่า (Equivalent Compression Strut) ดังแสดงในรูปที่ 5.1ก ซึ่งเป็นการรวมแรงด้านข้างระหว่างผนังอิฐก่อกับโครงข้อแข็งเปล่า สำหรับการสร้างแบบจำลองของแรงด้านข้างและการเคลื่อนตัวระหว่างชั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1ข จำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย ค่าสติฟเนสในช่วงแรก (initial stiffness) k_o แรงเฉือนที่จุดคราก V_y และค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นที่จุดคราก Δ_y แต่เมื่อผ่านจุดครากจะทำให้เกิดแรงเฉือนสูงสุด V_m และค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด Δ_m ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดค่าสติฟเนสหลังจุดคราก (post-yield stiffness) αk_o



(ก) โมเดลจำลองแรงค้ำยันเทียบเท่า (ข) ความสัมพันธ์แรงด้านข้างและการเคลื่อนตัวระหว่างชั้น

รูปที่ 5.1 แบบจำลองแรงค้ำยันเทียบเท่าและความสัมพันธ์ของแรงด้านข้างและการเคลื่อนตัวระหว่างชั้น

การสร้างแบบจำลองในการศึกษานี้ได้ใช้ค่ากำลังรับแรงอัดของปรีซึมอิฐก่อที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (stress-strain) ซึ่งเป็นการนำค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.1ข โดยการแทนค่าในสมการที่เสนอโดย Saneinejad and Hobbs (1995) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานก่อนการสร้างแบบจำลองให้กับผนังอิฐก่อในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับกรณีของการวิบัติที่เกิดจากการวิบัติแบบแรงกดอัดในแนวทแยง สามารถหาค่าแรงเฉือนที่จุดคราก V_y โดยการประยุกต์สมการที่เสนอโดย Saneinejad and Hobbs (1995) มาใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ 5.1

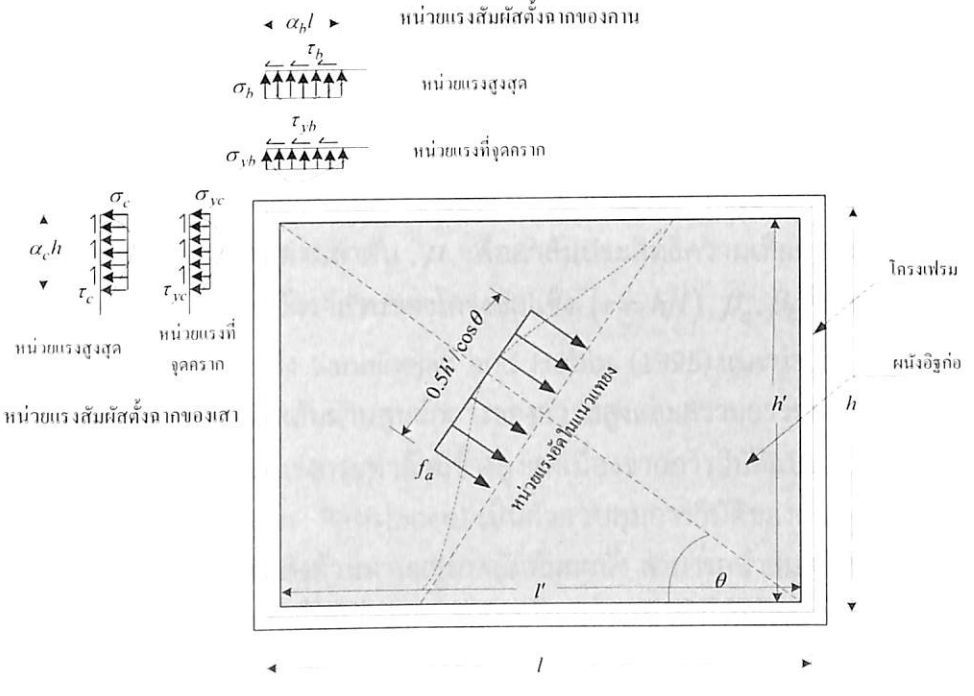
$$V_y = R_t = 2\sqrt{2}th' f_t \cos\theta \tag{5.1}$$

เมื่อ $f_t = 0.25\phi\sqrt{f_m'}$ (MPa), $\phi = 0.65$, R_t คือกำลังรับแรงเฉือนแตกร้าวในแนวทแยง, t คือ ความหนาของผนังอิฐก่อ, h' คือ ความสูงของผนังอิฐก่อ และ f_m' คือกำลังรับแรงอัดของปรีซึมอิฐก่อ

สำหรับค่าแรงเฉือนสูงสุดของผนังอิฐก่อ V_m สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของแรงอัดในแนวทแยงเทียบเท่าดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ 5.2

$$V_m = R_{DC} = \frac{0.5h'tf_a}{\cos\theta} \tag{5.2}$$

เมื่อ $f_a = 0.6\phi f_m'$, $\phi = 0.65$, และ θ คือ มุมในแนวทแยงของผนังอิฐก่อ



รูปที่ 5.2 แรงค้ำยันเทียบเท่าและหน่วยแรงในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับกรณีของการวิบัติที่เกิดจากการวิบัติแบบกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) เนื่องจากแรงกดอัดที่มุมผนังอิฐก่อที่สูง ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการกดอัดด้วยหน่วยแรงเข้าสู่มุมของผนังอิฐก่อที่สูง ซึ่งสามารถคำนวณแรงเฉือนสูงสุดในผนังอิฐก่อ V_m ได้จากสมการที่ 5.3

$$V_m = R_{CC} = \frac{(1-\alpha_c)\alpha_c th\sigma_c + \alpha_h tl\tau_h}{\cos\theta} \tag{5.3}$$

เมื่อ ค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ 5.3 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.3a , 5.3b , 5.3c ,5.3d และ 5.3e

$$\alpha_c = \frac{1}{h}\sqrt{\frac{2M_{pj} + 2\beta_c M_{pc}}{\sigma_c t}} \quad (5.3a)$$

$$\alpha_b = \frac{1}{l}\sqrt{\frac{2M_{pj} + 2\beta_b M_{pb}}{\sigma_b t}} \quad (5.3b)$$

$$\sigma_c = \frac{f'_m}{\sqrt{1 + 3\mu^2 r^4}} \quad (5.3c)$$

$$\sigma_b = \frac{f'_m}{\sqrt{1 + 3\mu^2}} \quad (5.3d)$$

$$\tau_b = \mu\sigma_b \quad (5.3e)$$

M_{pj} คือ ค่าพลาสติกโมเมนต์ต่ำสุดระหว่าง M_{pc} และ M_{pb} โดยที่ M_{pc}, M_{pb} คือ ค่าพลาสติกโมเมนต์ของเสาและคานตามลำดับ , μ คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของโครงข้อแข็งและหน้าสัมผัสของผนังอิฐก่อ, r คืออัตราส่วนของโครงข้อแข็ง $(r = h/l)$, β_c, β_b คือ ค่าแฟคเตอร์ตัวคูณลดกำลังของเสาและคานตามลำดับ ซึ่ง Saneinejad and Hobbs (1995) แนะนำใช้ที่ 0.2 , ค่าพารามิเตอร์ h, l คือ ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของความสูงและความยาวของโครงข้อแข็งตามลำดับ

สำหรับกรณีที่เกิดแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเนื่องจากการวิบัติแบบกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) เป็นตัวควบคุมการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ การหาค่ากำลังรับแรงที่จุดครากที่เกิดจากกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง สามารถนำสมการที่ 5.3 มาประยุกต์โดยใช้ค่ากำลังรับแรงอัดของปรีซึมอิฐก่อในช่วงจุดครากแทนในสมการซึ่งทำให้ได้สมการใหม่ดังแสดงในสมการที่ 5.4

$$V_y = R_{ycc} = \frac{(1 - \alpha_c)\alpha_c th\sigma_{yc} + \alpha_b tl\tau_{yb}}{\cos\theta} \quad (5.4)$$

เมื่อ ค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ 5.4 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.4a , 5.4b และ 5.4c

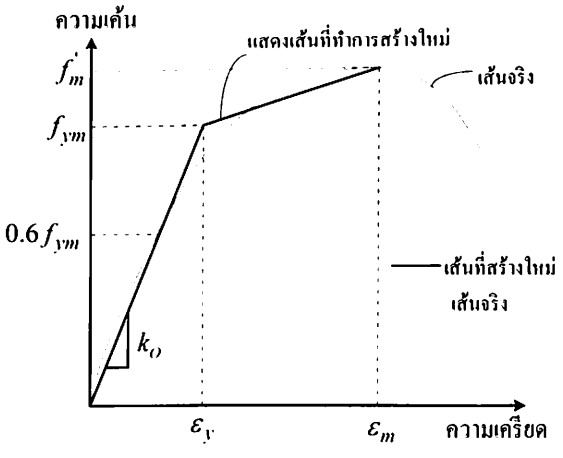
$$\sigma_{yc} = \frac{f_{ym}}{\sqrt{1 + 3\mu^2 r^4}} \quad 5.4a)$$

$$\tau_{yb} = \mu\sigma_{yb} \quad (5.4b)$$

$$\sigma_{yb} = \frac{f_{ym}}{\sqrt{1+3\mu^2}} \tag{5.4c}$$

ค่าพารามิเตอร์ σ_{yc} คือ หน่วยแรงสัมผัสตั้งฉากที่จุดครากของหน่วยแรงกดอัดที่มุมของเสา ,σ_{yb} และ τ_{yb} คือ หน่วยแรงสัมผัสตั้งฉากที่จุดครากของแรงกดอัดที่คานและหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของคานตามลำดับ

ค่าพารามิเตอร์ f_{ym} คือ กำลังที่จุดครากของปรีซีมอิฐก่อ ซึ่งในการหาค่า f_{ym} หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับค่าความเครียดที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดปรีซีมอิฐก่อในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 5.3 สำหรับการหาความสัมพันธ์ของจุดครากที่เกิดขึ้นในช่วงเส้นโค้งของกราฟหาโดยวิธีการหาแนวเส้นตรงสัมผัสกับแนวเส้นโค้งระหว่างความเค้นและความเครียด โดยใช้หลักการที่เสนอโดย Panyakapo (2014) ซึ่งได้แสดงการหาแนวเส้นตรงเพื่อสัมผัสกับเส้นโค้งในช่วงของการหาค่าสติฟเนสช่วงแรก (initial stiffness) ซึ่งมีวิธีการในการสร้างความสัมพันธ์ 2 ข้อได้แก่ 1) ค่าสติฟเนสช่วงแรก (initial stiffness) ของเส้นสัมผัสกับเส้นโค้งสามารถหาได้โดยการใช้กำลังที่ 60% ของกำลังที่จุดครากของปรีซีมอิฐก่อ 2) พื้นที่ใต้เส้นตรงสัมผัสด้านบนและด้านล่างจะต้องมีพื้นที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของปรีซีมอิฐก่อ

สำหรับการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นที่จุดคราก Δ_y และการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด Δ_m ของผนังอิฐก่อสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.5a และ 5.5b

$$\Delta_y = \frac{\varepsilon_y L_d}{\cos\theta} \tag{5.5a}$$

$$\Delta_m = \frac{\varepsilon_m L_d}{\cos\theta} \tag{5.5b}$$

เมื่อ $\varepsilon_y, \varepsilon_m$ คือ ค่าความเครียดที่จุดครากและค่าความเครียดสูงสุดของปรีซีมอิฐก่อ, L_d คือ ความยาวในแนวเส้นทแยงค้ำยันเทียบเท่า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.6

$$L_d = \sqrt{(1-\alpha_c)^2 h'^2 + l'^2} \tag{5.6}$$

เนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างและการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นที่จุดครากและจุดสูงสุด สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่า สติฟเนสช่วงแรก (initial stiffness) k_o และค่าสติฟเนสช่วงซีแคนซ์ (secant stiffness) k_{sec} ส่วนค่าสติฟเนสหลังจุดคราก (post-yield stiffness) αk_o และแฟคเตอร์ของแนวเส้นตรง (bilinear factor) α สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในสมการที่ 5.7 , 5.8, 5.9 และ 5.10

$$k_o = \frac{V_y}{\Delta_y} \tag{5.7}$$

$$k_{sec} = \frac{V_m}{\Delta_m} \tag{5.8}$$

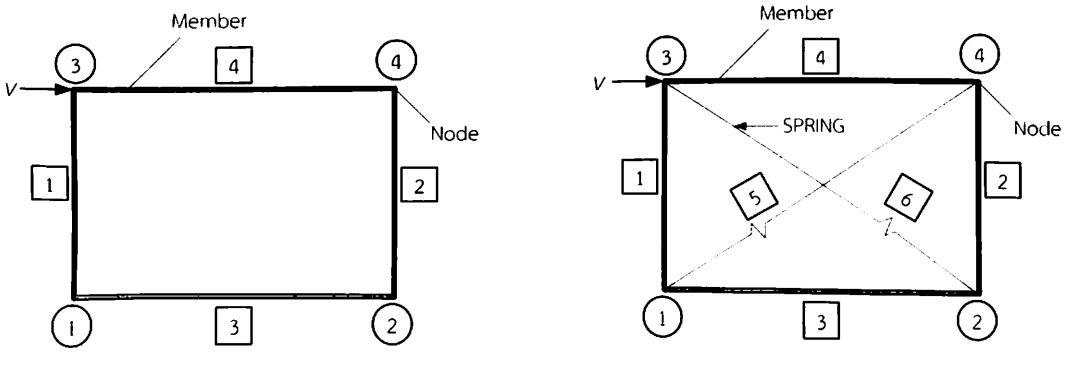
$$\alpha k_o = \frac{V_m - V_y}{\Delta_m - \Delta_y} \tag{5.9}$$

$$\alpha = \frac{V_m - V_y}{\Delta_m - \Delta_y} \cdot \frac{\Delta_y}{V_y} \tag{5.10}$$

5.2.2 แบบจำลองโครงข้อแข็งด้วยโปรแกรม RUAUMOKO

การสร้างแบบจำลองโครงข้อแข็งในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรม RUAUMOKO ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น สำหรับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่าการสร้างแบบจำลองจะใช้การจำลองแบบ Modified Takeda ดังแสดงในรูปที่ 5.4ก ส่วนโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อรูปแบบของสปริงแบบไม่เชิงเส้นซึ่งนำมาใช้ในการจำลองแทนแรงอัดในแนวทแยงเทียบเท่าของผนังอิฐก่อ โดยใช้รูปแบบการจำลองแบบ SINA degrading tri-linear ดังแสดงในรูปที่ 5.4ข ซึ่งการจำลองทั้ง 2 แบบเป็นพฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักร (hysteretic)

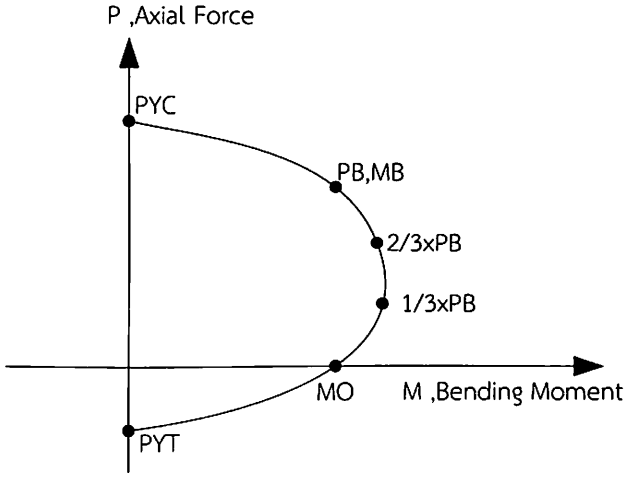
ในการทำแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างจำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้เหมาะสมกับค่าที่แท้จริง ซึ่งได้แก่คุณสมบัติของคอนกรีต เหล็กเสริมและผนังอิฐก่อ



(ก) แบบจำลองโครงข้อแข็งเปล่า (ข) แบบจำลองโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ

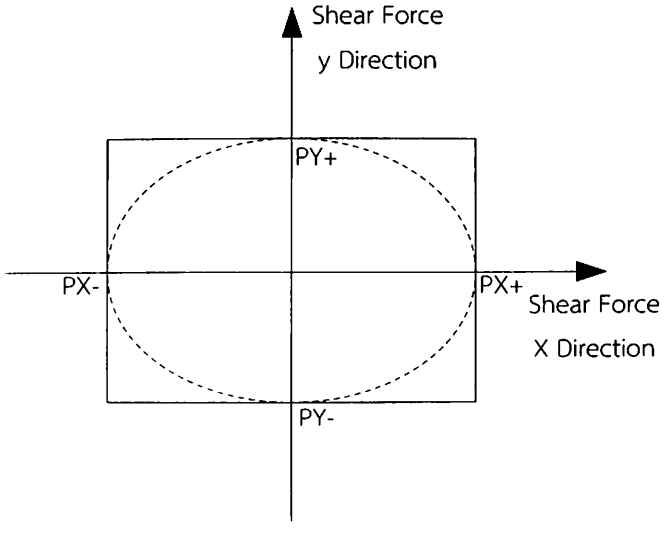
รูปที่ 5.4 แบบจำลองโครงข้อแข็ง

สำหรับในส่วนของเสาและคาน คุณสมบัติที่ต้องคำนึงถึงนอกจากคุณสมบัติของวัสดุเบื้องต้นแล้วจำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน แล้วยังต้องคำนึงถึงแรงตามแนวแกนที่มีต่อความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดของเสาด้วย ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดของเสาและคาน (interaction surface) สำหรับโปรแกรม RUAUMOKO ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดของเสาและคาน

สำหรับผนังอิฐก่อในการจำลองได้ใช้รูปแบบสปริงแบบไม่เชิงเส้นแทนแรงอัดในแนวทแยงเทียบเท่าของผนังอิฐก่อ คุณสมบัติที่ต้องคำนึงถึงนอกจากคุณสมบัติของวัสดุเบื้องต้นแล้ว จำเป็นต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ของแรงเฉือนที่จุดครากของชิ้นส่วนสปริง (yield interaction surface) สำหรับโปรแกรม RUAUMOKO ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของแรงเฉือนที่จุดครากของชิ้นส่วนสปริง

5.2.3 ผลการสร้างแบบจำลองโครงข้อแข็งเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ค่าพารามิเตอร์ของการสร้างแบบจำลองการรับแรงแบบวัฏจักร (hysteretic) ของผนังอิฐก่อสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น สำหรับตัวอย่างโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ (W) แรงด้านข้างที่จุดคราก V_y และแรงด้านข้างสูงสุด V_m ของผนังอิฐก่อ สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้โดยใช้กำลังที่จุดครากในแนวทแยงของการวิบัติด้วยแรงอัดในแนวค้ำยัน R_t และกำลังรับแรงอัดในแนวทแยงค้ำยัน R_{DC} ตามลำดับ โดยค่าพารามิเตอร์สามารถคำนวณการให้แรงได้ทั้ง 2 ทิศทางซึ่งได้แก่ทิศทางให้แรงทิศทางบวก (loading) และการให้แรงทิศทางลบ(reloading) ซึ่งได้แสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก จ สำหรับการให้แรงในทิศทางลบ (reloading) ตัวคูณลดค่ากำลังรับแรงด้านข้างนำมาใช้เนื่องจากผลของการยืดตัวของเหล็กขนาด 32 mm ซึ่งเกิดในทิศทางการดึงกลับของแรงแบบวัฏจักร (hysteretic) โดยมีค่าเท่ากับ 0.825 เพื่อใช้คูณลดค่ากำลังรับแรงด้านข้างที่จุดคราก V_y และแรงด้านข้างสูงสุด V_m

สำหรับโครงข้อแข็งเสริมกำลังผนังอิฐก่อ (W-SR) กำลังรับแรงด้านข้างที่จุดคราก V_y และแรงด้านข้างสูงสุด V_m ของผนังอิฐก่อ ในทิศทางการให้แรงทิศทางบวก (loading) สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้โดยใช้ กำลังรับแรงทางด้านข้างที่จุดคราก R_{ycc} และกำลังรับแรงด้านข้างจากแรงกดอัดที่มุมผนังอิฐก่อ R_{cc} ตามลำดับ แต่สำหรับการให้แรงในทิศทางลบ (reloading) ค่าพารามิเตอร์คำนวณจากกรณีเกิดการวิบัติด้วยแรงอัดในแนวค้ำยัน ซึ่งได้แสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก จ และได้ผลสรุปค่าพารามิเตอร์การรับแรงแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงข้อแข็งของตัวอย่าง W และ W-SR ดังแสดงในตารางที่ 5.4

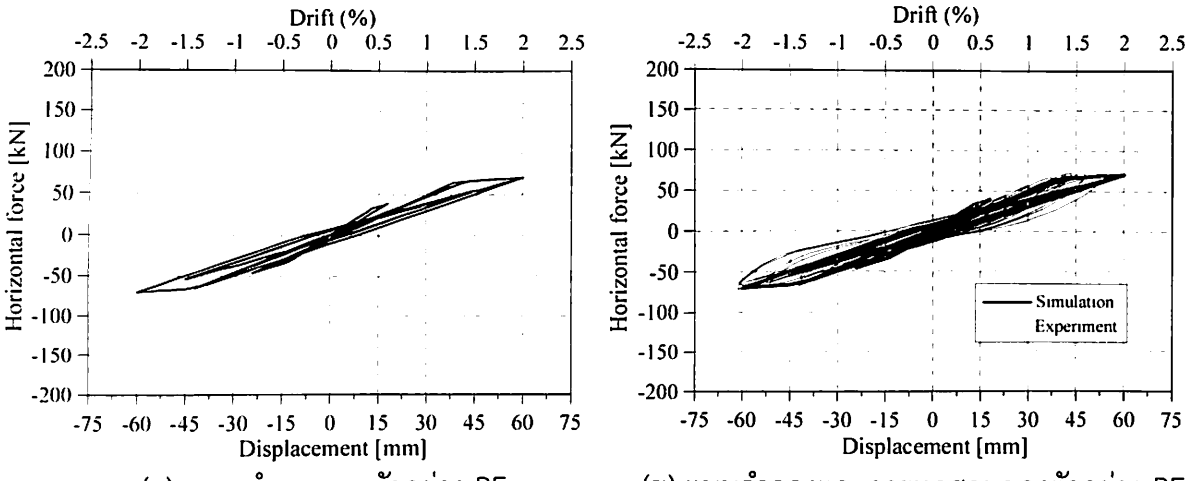
ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์การรับแรงแบบวัฏจักร (hysteretic) ของผนังอิฐก่อสำหรับการสร้างแบบจำลองโครงสร้างของตัวอย่าง W และ W-SR

โครงสร้าง	ทิศทางการให้แรง	k_o (kN/mm)	V_y (kN)	Δ_y (mm)	V_m (kN)	Δ_m (mm)	α
W	ทิศทางบวก	53.39	212.51	3.98	312.80	9.81	0.30
	ทิศทางลบ	44.05	-175.32		-258.00		0.30
W-SR	ทิศทางบวก	61.02	259.32	4.25	370.46	13.20	0.20
	ทิศทางลบ	63.02	-300.65		-494.31		0.30

ในการสร้างแบบจำลองของโครงข้อแข็งเปล่า (BF) โครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ (W) และโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อเสริมกำลัง (W-SR) โดยการจำลองพฤติกรรมจะใช้รูปแบบการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นเช่นเดียวกันกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ สำหรับแบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร (hysteresis loop) ของโครงข้อแข็งเปล่า (BF) ดังแสดงในรูปที่ 5.7ก และแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.7ข สำหรับแบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร (hysteresis loop) ของผนังอิฐก่อ (W) ดังแสดงในรูปที่ 5.8ก และแสดงกำลังรับแรงรวมของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ (W) ที่เกิดจากกำลังรับแรงของผนังอิฐก่อกับกำลังรับแรงของโครงข้อแข็งเปล่าดังแสดงในรูป

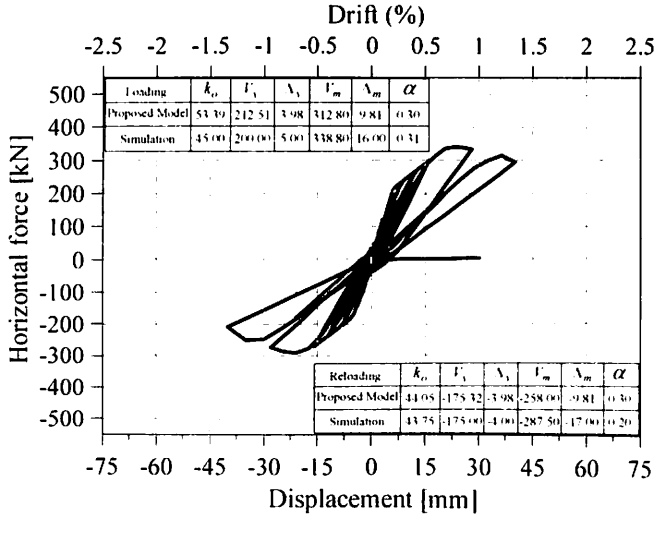
ที่ 5.8ข ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของการสร้างแบบจำลองและผลการทดสอบของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ (W) ดังแสดงในรูปที่ 5.8ค

สำหรับแบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร (hysteresis loop) ของผนังอิฐก่อเสริมกำลัง (W-SR) ดังแสดงในรูปที่ 5.9ก และแสดงกำลังรับแรงรวมของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อเสริมกำลัง (W-SR) ที่เกิดจากกำลังรับแรงของผนังอิฐก่อกับกำลังรับแรงของโครงข้อแข็งเปล่าดังแสดงในรูปที่ 5.9ข ส่วนผลการเปรียบเทียบแบบจำลองและผลการทดสอบของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อเสริมกำลัง (W-SR) ดังแสดงในรูปที่ 5.9ค และได้ผลสรุปการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของการสร้างแบบจำลองและผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ W และโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อเสริมกำลัง W-SR ดังแสดงในตารางที่ 5.5



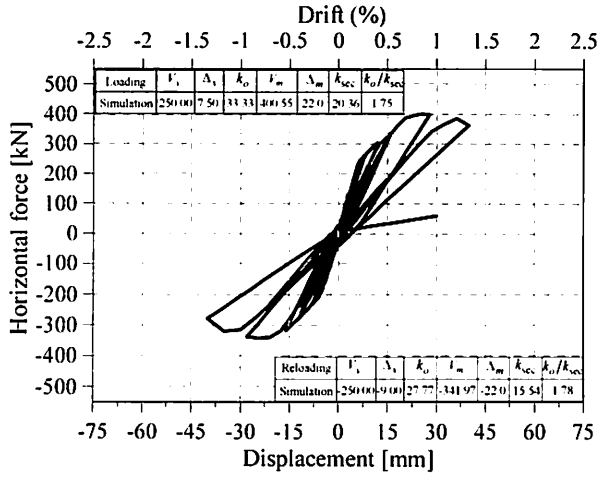
(ก) แบบจำลองของตัวอย่าง BF (ข) แบบจำลองและการทดสอบของตัวอย่าง BF

รูปที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบของแบบจำลองและผลการทดสอบของตัวอย่าง BF

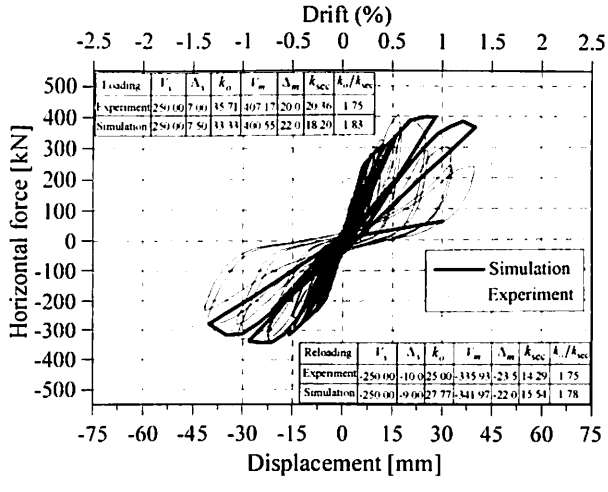


(ก) แบบจำลองของผนังอิฐก่อ (W)

รูปที่ 5.8 ผลการเปรียบเทียบของแบบจำลองและผลการทดสอบของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ W

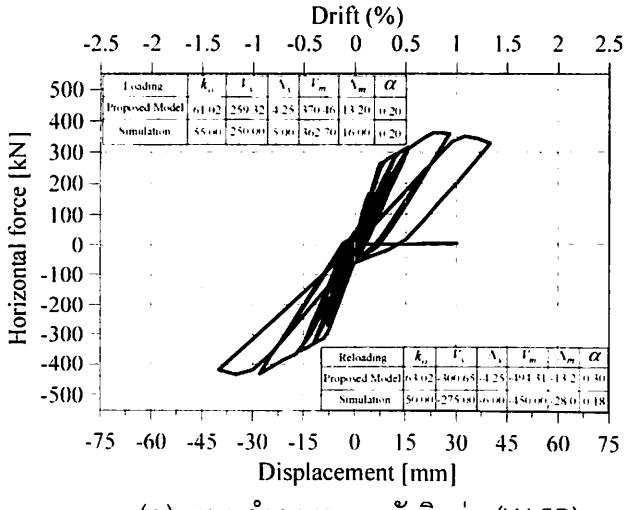


(ข) แบบจำลองของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ W



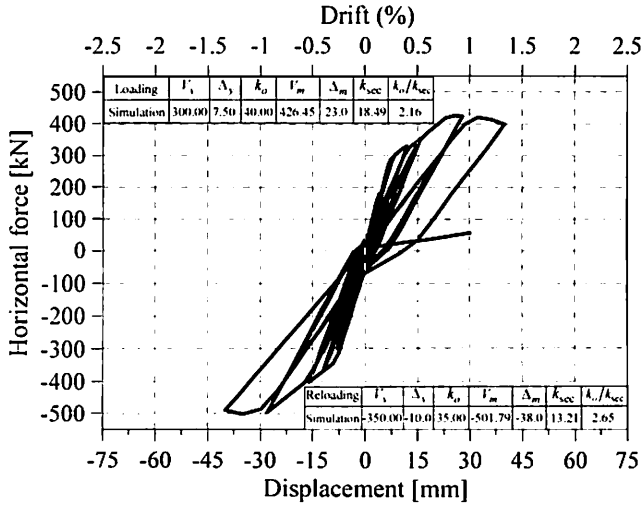
(ค) แบบจำลองและการทดสอบของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ W

รูปที่ 5.8 ผลการเปรียบเทียบของแบบจำลองและผลการทดสอบของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ W (ต่อ)

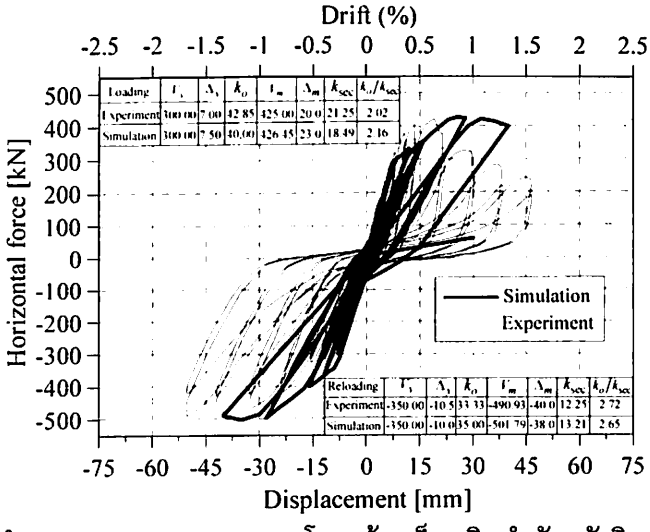


(ก) แบบจำลองของผนังอิฐก่อ (W-SR)

รูปที่ 5.9 ผลเปรียบเทียบของแบบจำลองและผลการทดสอบของโครงข้อแข็งเสริมกำลังผนังอิฐก่อ W-SR



(ข) แบบจำลองของโครงข้อแข็งเสริมกำลังผนังอิฐก่อ W-SR



(ค) แบบจำลองและการทดสอบของโครงข้อแข็งเสริมกำลังผนังอิฐก่อ W-SR

รูปที่ 5.9 ผลการเปรียบเทียบของแบบจำลองและผลการทดสอบของโครงข้อแข็งเสริมกำลังผนังอิฐก่อ W-SR(ต่อ)

จากรูปที่ 5.8ก และ 5.9ก ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ได้นำมาทำการเปรียบเทียบผลการจำลองซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ในตารางช่องขนาดเล็กในรูปภาพ ทั้งการให้แรงในทิศทางบวก (loading) และการให้แรงในทิศทางลบ (reloading) จากการศึกษาพบว่าผลการสร้างแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง สำหรับโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ (W) ในกรณีการให้แรงในทิศทางบวก (loading) ได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของกำลังรับแรงด้านข้างที่จุดคราก V_y เท่ากับ 212.51 kN และ 200.00 kN ตามลำดับ และ ได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของแรงด้านข้างสูงสุด V_m เท่ากับ 312.80 kN และ 338.80 kN ตามลำดับ ในส่วนของค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของการเคลื่อนตัวที่จุดคราก Δ_y เท่ากับ 3.98 mm และ 5.00 mm ตามลำดับ และ ได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด Δ_m เท่ากับ 9.81 mm และ 16.00 mm ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ข้างต้นนำมาคำนวณหาค่า

สติฟเนสซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของค่าสติฟเนสช่วงแรก k_o เท่ากับ 53.39 kN/mm และ 45.00 kN/mm ตามลำดับ และ ได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของค่าแฟคเตอร์เชิงเส้น α เท่ากับ 0.30 and 0.31 ตามลำดับ

สำหรับผนังอิฐก่อของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อเสริมกำลัง (W-SR) ในทิศทางการให้แรงบวก (loading) ได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของกำลังรับแรงด้านข้างที่จุดคราก V_y เท่ากับ 259.32 kN และ 250.00 kN ตามลำดับ และได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของแรงด้านข้างสูงสุด V_m เท่ากับ 370.46 kN และ 362.70 kN ตามลำดับ ในส่วนของค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของการเคลื่อนตัวที่จุดคราก Δ_y เท่ากับ 4.25 mm และ 5.00 mm ตามลำดับ และได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด Δ_m เท่ากับ 13.20 mm และ 16.00 mm ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ข้างต้นนำมาคำนวณหาค่าสติฟเนสซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของค่าสติฟเนสช่วงแรก k_o เท่ากับ 61.02 kN/mm และ 55.00 kN/mm ตามลำดับ และได้ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองและผลการจำลองของค่าแฟคเตอร์เชิงเส้น α เท่ากับ 0.20 และ 0.20 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าการสร้างแบบจำลองให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดสอบซึ่งสามารถทำนายผลในการสร้างแบบจำลองได้ใกล้เคียงกัน

สำหรับผลการเปรียบเทียบแบบจำลองและผลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.7-5.9 จากการศึกษาแสดงให้เห็นพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร (hysteresis loop) ที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นรูปแบบที่ดี สำหรับค่าพารามิเตอร์แบบจำลองโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ (W) และโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อเสริมกำลัง (W-SR) ได้แสดงผลสรุปในตารางที่ 5.5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองและผลการทดสอบ จากการศึกษาพบว่ารูปแบบการวิเคราะห์แบบจำลองที่ได้สามารถทำนายค่าสติฟเนสและกำลังรับแรงต้านทานได้อย่างถูกต้อง

สำหรับกำลังรับแรงด้านข้างของผนังอิฐก่อดังแสดงในรูปที่ 5.8ก จากการศึกษาพบว่าผนังอิฐก่อสามารถเพิ่มกำลังรับแรงด้านข้างสูงสุด V_m ขึ้นร้อยละ 84.5% สำหรับโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ (W) และจากรูปที่ 5.9ก ผนังอิฐก่อเสริมกำลังสามารถเพิ่มกำลังรับแรงด้านข้างสูงสุด V_m ขึ้นร้อยละ 89.0% สำหรับโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อเสริมกำลัง (W-SR) ซึ่งแสดงให้เห็นผลของผนังอิฐก่อสามารถเพิ่มกำลังรับแรงโดยรวมของโครงสร้างได้เป็นอย่างดี และเมื่อผนังอิฐก่อได้รับการเสริมกำลังทำให้กำลังรับแรงด้านข้างที่จุดครากและกำลังรับแรงด้านข้างสูงสุดของผนังอิฐก่อเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.1% และ 7.0% ตามลำดับ และผนังอิฐก่อยังสามารถเพิ่มค่าสติฟเนสของโครงสร้างได้เป็นอย่างดี โดยค่าสติฟเนสของผนังอิฐก่อเสริมกำลังสำหรับทิศทางการให้แรงเป็นบวก (loading) และทิศทางการให้แรงเป็นลบ (reloading) เพิ่มขึ้นร้อยละ 11.11% และ 14.3% ตามลำดับ

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและการสร้างแบบจำลองของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ W และโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อเสริมกำลังW-SR

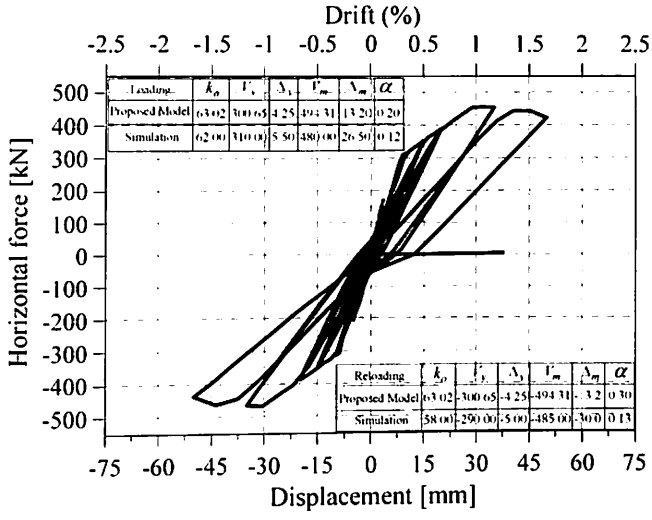
โครงสร้าง	ทิศทางการให้แรง	V_y (kN)	Δ_y (mm)	k_o (kN/mm)	V_m (kN)	Δ_m (mm)	k_{sec} (kN/mm)	k_o/k_{sec}
W การทดสอบ	ทิศทางบวก	250	7.0	35.71	407.17	20.0	20.36	1.75
W การจำลอง	ทิศทางบวก	250	7.5	33.33	400.55	22.0	18.20	1.83
W การทดสอบ	ทิศทางลบ	-250	-10.0	25.00	-335.93	-23.5	14.29	1.75
W การจำลอง	ทิศทางลบ	-250	-9.0	27.77	-341.97	-22.0	15.54	1.78
W-SR การทดสอบ	ทิศทางบวก	300	7.0	42.85	425.00	20.0	21.25	2.02
W-SR การจำลอง	ทิศทางบวก	300	7.5	40.00	426.45	23.0	18.49	2.16
W-SR การทดสอบ	ทิศทางลบ	-350	-10.5	33.33	-490.93	-40.0	12.25	2.72
W-SR การจำลอง	ทิศทางลบ	-350	-10.0	35.00	-501.79	-38.0	13.21	2.65

จากการศึกษารูปแบบของการวิบัติของตัวอย่างโครงข้อแข็งเสริมกำลังผนังอิฐก่อ (W-SR) ซึ่งเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงอัดที่มุมของผนังอิฐก่อทำให้เกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนที่เสาส่งผลต่อการทดสอบต้องหยุดลง แต่ผนังอิฐก่อที่เสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกสำหรับกรณีเกิดการวิบัติแบบแรงอัดในแนวทแยง ซึ่งจากการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงด้านข้างในการทดสอบสามารถรับกำลังต้านทานต่อไปได้ ดังนั้นในการวิจัยจึงได้ทำนายกำลังรับแรงของผนังอิฐก่อเสริมกำลังโดยการจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร โดยการสร้างแบบจำลองให้ผนังอิฐก่อเสริมกำลังเกิดการวิบัติด้วยแรงอัดในแนวทแยงของการให้แรงกระทำทางด้านข้างทั้ง 2 ทิศทาง เพื่อทำนายกำลังรับแรงด้านข้างของตัวอย่างผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีก ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของการจำลองพฤติกรรมของผนังอิฐก่อเสริมกำลังดังแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองพฤติกรรมของผนังอิฐก่อเสริมกำลัง

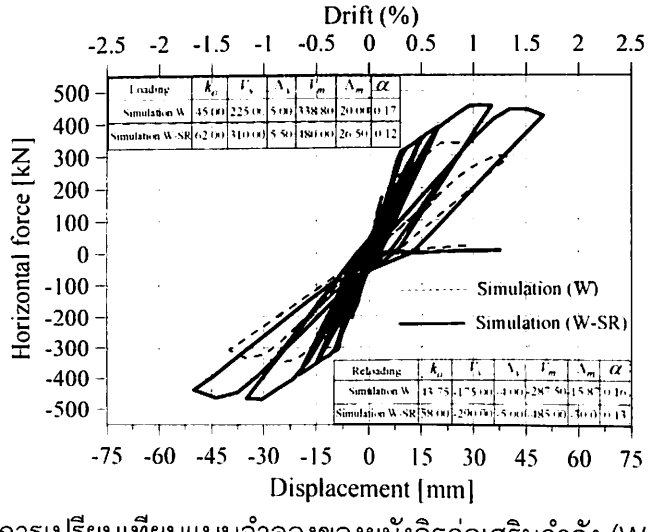
โครงสร้าง	ทิศทางการให้แรง	k_o (kN/mm)	V_y (kN)	Δ_y (mm)	V_m (kN)	Δ_m (mm)	α
W-SR	ทิศทางบวก	63.02	300.65	4.25	494.31	13.2	0.20
	ทิศทางลบ	63.02	-300.65		-494.31		0.30

การสร้างแบบจำลองของผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกดังแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างและการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของผนังอิฐก่อเสริมกำลัง จากการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายความสามารถในการรับกำลังต้านทานของผนังอิฐก่อเสริมกำลัง เมื่อกำหนดรูปแบบการวิบัติของผนังอิฐก่อเป็นการวิบัติแบบแรงอัดในแนวทแยง



รูปที่ 5.10 แบบจำลองของผนังอิฐก่อ (W-SR)

จากการจำลองพฤติกรรมของผนังอิฐก่อเสริมกำลังเมื่อกำหนดรูปแบบการวิบัติของผนังอิฐก่อเป็นการวิบัติแบบแรงอัดในแนวทแยง พบว่าในทิศทางการให้แรงเป็นบวกและทิศทางการให้แรงเป็นลบกำลังรับแรงด้านข้างมีค่าเพิ่มขึ้น 1.42 และ 1.69 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผนังอิฐก่อที่ไม่มีการเสริมกำลังดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองของผนังอิฐก่อเสริมกำลัง (W-SR) และผนังอิฐก่อ (W)

รูปแบบการจำลองที่ได้เป็นเพียงการจำลองพฤติกรรมของผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกซึ่งไม่ได้มีการทดสอบในห้องปฏิบัติการจริง เป็นเพียงการทำนายถึงขีดความสามารถในการรับกำลังของผนังอิฐก่อเสริมกำลังกรณีกำหนดรูปแบบการวิบัติของผนังอิฐก่อเป็นการวิบัติแบบแรงอัดในแนวทแยงเท่านั้น ดังนั้นในการทดสอบเพื่อให้ได้ขีดความสามารถของการรับกำลังของผนังอิฐก่อเสริมกำลังควรมีการวิจัยทางด้านการเสริมกำลังให้กับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กรวมถึงการหาเทคนิคในการป้องกันการเกิดการวิบัติแบบแรงอัดที่มุมของผนังเพื่อนำมาทำการเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป