

พฤติกรรมผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เสริม  
กำลังด้วย CFRP

BEHAVIOR OF CFRP-REINFORCED CONCRETE BEARING WALL PANELS WITH  
LARGE OPENING

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัชวาลย์ พูนลาภพานิช<sup>า</sup>

<sup>า</sup>อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
ความเชี่ยวชาญ : วิศวกรรมปฐพีและฐานราก, วิศวกรรมโครงสร้าง



ดร.ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์<sup>า</sup>

<sup>า</sup>อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
ความเชี่ยวชาญ : วิศวกรรมโครงสร้าง, การซ่อมเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต



เลิศภพ จันทร่เที่ยง<sup>บ</sup>

<sup>บ</sup>ผู้จัดการโครงการ บริษัทโรโกทองคอนสตรัคชั่นแอนด์เซอร์วิส จำกัด  
ความเชี่ยวชาญ : วิศวกรรมโยธา, วิศวกรรมโครงสร้าง



## 1. บทนำ

ผนังรับน้ำหนักคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC bearing walls) เป็นระบบโครงสร้างสำเร็จรูปที่อุตสาหกรรมก่อสร้างนิยมใช้ผลิตอาคารประเภทพักอาศัย เนื่องจากก่อสร้างรวดเร็วและลดต้นทุนการผลิตได้เมื่อก่อสร้างปริมาณมาก ระบบโครงสร้างเกิดจากชิ้นส่วนพื้นและผนังที่ต่อเชื่อมกันโดยไม่มีเสาและคาน ผนังชั้นล่างจะรับน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายจากชิ้นส่วนพื้นและผนังชั้นบน กรณีไม่สามารถเลี่ยงการเจาะช่องเปิดในผนังที่บดเคี้ยวเพื่อติดตั้งอุปกรณ์งานระบบ หรือเจาะช่องประตูหน้าต่างเพื่อปรับปรุงพื้นที่ใช้สอย การตรวจสอบประเมินกำลังรับน้ำหนักของผนังและการซ่อมเสริมกำลังโครงสร้างผนังภายหลังเจาะช่องเปิดเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากช่องเปิดใหม่จะส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักของผนังลดลง รวมทั้งทำให้แนวการถ่ายเทแรง (load path) และสภาพการกระจายหน่วยแรงรอบบริเวณช่องเปิดเปลี่ยนแปลงเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายหรือโครงสร้างผนังพิบัติ และเนื่องด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินกำลังรับน้ำหนักและการเสริมกำลังผนังคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ นั้นมีจำนวนไม่มาก โดยเฉพาะผนังที่มีช่องเปิดที่มีขนาดเกิน 40 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการศึกษาเรื่อง “พฤติกรรมผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เสริมกำลังด้วย CFRP” จึงมีความสำคัญ

## 2. วัตถุประสงค์ของงานการศึกษา

1. ศึกษากำลังของผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปเนื่องจากผลของการเจาะช่องเปิดขนาดใหญ่
2. สร้างสมการทำนายกำลังในผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่เจาะช่องเปิดขนาดใหญ่
3. เพื่อเสริมกำลังผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ด้วย CFRP

## 3. มาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กำลังรับน้ำหนักของผนังที่ไม่มีช่องเปิดกล่าวไว้ในมาตรฐาน ACI และมาตรฐาน AS ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะแสดงผลของการทดสอบผนังที่มีช่องเปิดและไม่มีช่องเปิดรวมทั้งการเสริมกำลังช่องเปิดด้วย CFRP

### 3.1 มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

การคำนวณกำลังผนังคอนกรีตเสริมเหล็กพิจารณาตาม ACI 318-19 [1] ดังสมการที่ 1

$$\phi P_{nw} = 0.55 \phi f'_c A_g \left[ 1 - \left( \frac{kl_c}{32h} \right)^2 \right]$$

(1)

โดย  $P_{nw}$  คือ กำลังรับแรงของผนังในแนวดิ่ง (kg),  $A_g$  คือ เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของผนัง =  $hl_w$ ,  $h$  คือ ความหนาของผนัง (cm),  $l_w$  คือ ความยาวของผนังในแนวนอน (cm),  $l_c$  คือ ความสูงผนัง (cm),  $\phi$  คือ ตัวคูณลดกำลัง,  $k$  คือ ตัวคูณประกอบความสูงผนัง,  $f'_c$  คือ กำลังต้านแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) ส่วนกำลังของผนังรับแรงตามแนวดิ่งโดยมาตรฐาน AS-3600-2009 [2] จะมีการพิจารณาผลของระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำ ( $e$ ) โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลางตามความหนาของผนัง แต่ทั้งนี้ระยะเยื้องศูนย์กลางต้องไม่เกินกว่าหนึ่งในหกของความหนาผนัง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$\phi N_u = \phi(t_w - 1.2e - 2e_a)0.6f'_c \quad (2)$$

โดย  $N_u$  คือ กำลังรับแรงของผนังในแนวดิ่ง ( $\text{kg}/\text{cm}$ ),  $t_w$  คือ ความหนาของผนังคอนกรีต (cm),  $e$  คือ ระยะเยื้องศูนย์กลางโดยวัดจากศูนย์กลางของผนัง (cm) โดยระยะเยื้องศูนย์กลางจะต้องไม่น้อยกว่า  $0.05t_w$ ,  $f'_c$  คือ ค่ากำลังรับแรงอัดระบุของคอนกรีต ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ),  $H_{we}$  คือ ความสูงประสิทธิผลของผนัง (cm) =  $kH_w$ ,  $e_a = \frac{H_{we}^2}{2500t_w}$ ,  $\phi = 0.6$ ,  $H_w$  คือ ความสูงของผนัง (cm),  $L$  คือ ความยาวผนัง (cm) ระบบผนังทางเดียว  $k = 0.75$  (เมื่อถูกจำกัดการหมุนด้านบนและด้านล่างของผนัง),  $k = 1.0$  (เมื่อไม่ถูกจำกัดการหมุนด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน)

### 3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Saheb and Desayi, (1990) [3] ได้ทดสอบผนังทั้งหมด 12 ชั้น โดยผนังมีรูปแบบของช่องเปิดที่แตกต่างกัน 6 แบบแยกเป็น แบบ one-way action 6 ชั้น และ two-way action 6 ชั้น โดยการคำนวณพิจารณาจากตัวแปรในรูปที่ 1 และสมการทำนายกำลังของผนังที่มีช่องเปิด ระบบผนังทางเดียว (one-way walls) ดังแสดงในสมการที่ 3

$$P_{uoc}^c = (k_1 - k_2\alpha)P_{uc}^c \quad (3)$$

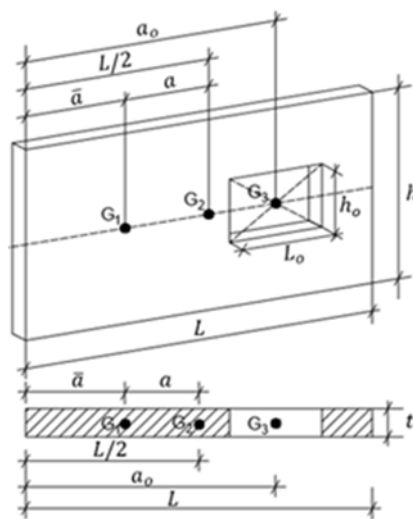
กำหนดให้  $P_{uoc}^c$  คือ กำลังของผนังที่มีช่องเปิด (kg),  $P_{uc}^c$  คือ กำลังของผนังทึบ (kg) ในรูปที่ 1 ตำแหน่ง  $G_1$  และ  $G_2$  คือ จุดศูนย์กลางถ่วงของผนังที่มีช่องเปิดและไม่มีช่องเปิดตามลำดับ,  $G_3$  คือ

จุดศูนย์กลางถ่วงของช่องเปิด,  $\alpha$  คือ ค่าพารามิเตอร์แสดงตำแหน่งและขนาดช่องเปิด =  $\frac{A_o}{A} + \frac{a}{L}$ ,  $A_o$  คือ พื้นที่หน้าตัดตามความยาวของช่องเปิด =  $L_o t$ ,  $a$  คือ ระยะจุดศูนย์กลางถ่วงของผนังที่มีช่องเปิดถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของผนังที่ไม่มีช่องเปิด =  $\frac{L}{2} - \bar{a}$ ,  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดตามความยาวผนัง =  $Lt$ ,  $\bar{a}$  คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางถ่วงของผนังที่มีช่องเปิดถึงแนวแกนอ้างอิง =  $\left[ \left( \frac{L^2 t}{2} - L_o t a_o \right) / (Lt - L_o t) \right]$  กำลังของผนังทึบ ( $P_{uc}^c$ ) กรณีอัตราส่วนความสูงต่อความยาวผนังน้อยกว่า 2 หรือ  $\left( \frac{h}{L} < 2 \right)$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$P_{uc}^c = 0.55\phi \left[ Af'_c + (f_{yu} + f'_c) A_{sv} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{h}{32t} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1.20 - \left( \frac{h}{10L} \right) \right] \quad (4)$$

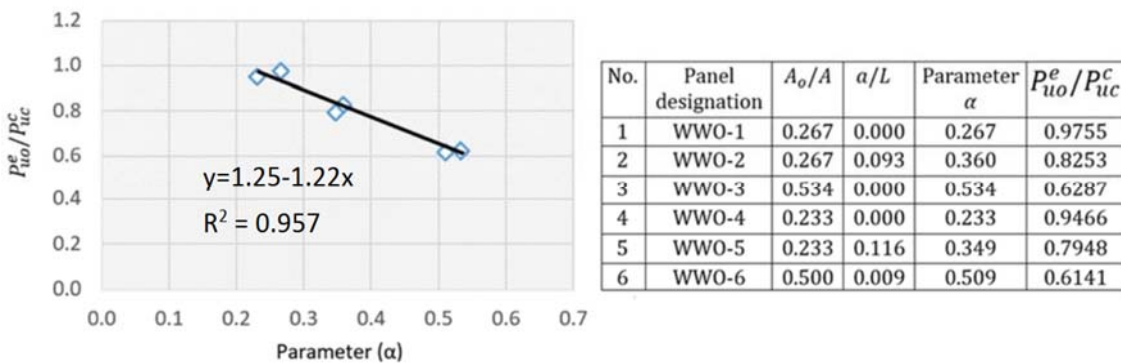
ส่วนกำลังของผนังที่ไม่มีช่องเปิดที่มีอัตราส่วน  $\left( \frac{h}{L} \geq 2 \right)$  จะแสดงในสมการที่ 5

$$P_{uc}^c = 0.55\phi \left[ Af'_c + (f_{yu} - f'_c) A_{sv} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{h}{32t} \right)^2 \right] \quad (5)$$



รูปที่ 1 ผนังคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด [3]

ผลการทดสอบปรากฏรอยร้าวที่ผนัง one-way action ระหว่าง 33%-72% ของกำลัง  
 ประลัย รอยร้าวของผนัง two-way action ที่ระหว่าง 34%-80% ของกำลังประลัย ความเครียดที่  
 ผิวหน้าและการโก่งตัวทางด้านข้างพบว่ามีความแตกต่างอย่างเป็นสัดส่วนเมื่อมีการใช้น้ำหนักเพิ่ม  
 เป็น 60%-70% ของน้ำหนักประลัยสูงสุดของชิ้นทดสอบ และพบว่าผนังแบบ two-way action มี  
 ประสิทธิภาพในการรับแรงที่มากกว่าแบบ one-way action **รูปที่ 2** แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  
 พารามิเตอร์ ( $\alpha$ ) และกำลังของผนังที่มีช่องเปิดต่อกำลังของผนังทึบ ( $P_{uo}^e/P_{uc}^c$ ) จากการทดสอบแบบ  
 one-way action ทำให้ได้ค่า  $k$  ในสมการที่ 3  $k_1 = 1.25$  และ  $k_2 = 1.22$



**รูปที่ 2** ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  และ  $\frac{P_{uo}^e}{P_{uc}^c}$  [3]

Fragomeni, S., et al., (2012) [4] ได้ศึกษาผนังคอนกรีตรับกำลังจำนวน 47 ตัวอย่างที่มี  
 ที่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ  $t_w/6$  เป็นการทดสอบโดยใช้ 1/2 มาตรฐานจริง โดยมีการกำหนดการ  
 ทดสอบเป็น one-way action และ two-way action ซึ่งมีค่า slenderness ratio 30, 35, 40 ทำการศึกษา  
 รูปแบบของรอยร้าว รูปแบบการวิบัติและการโก่งตัวเนื่องจากน้ำหนัก ดำเนินการทดสอบจนวิบัติ มีการ  
 คำนวณกำลังตามมาตรฐาน Australian standard ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงน้ำหนักวิบัติลดลงเมื่อมี  
 ช่องเปิดที่เพิ่มขึ้นจากหนึ่งช่องเป็นสองช่อง นอกจากนี้อัตราส่วนความแข็งแรงตามแนวแกนของผนัง  
 one-way action และ two-way action ค่อยๆลดลงเมื่ออัตราส่วนความชะลุดเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 40

Popescu, C., et al., (2016) [5] ได้ทำการทดสอบผนังคอนกรีตรับน้ำหนักจำนวน 3 ชิ้น  
 คือผนังทึบ ผนังที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก และผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ผลของการลดขนาดหน้าตัด 25%  
 และ 40% ของพื้นที่ผนังโดยการตัดช่องเปิดนำไปสู่การรับน้ำหนักที่ลดลง 36% และ 50% ตามลำดับ

Mohammed, B.S., et al., (2010) [6] ได้ศึกษาการใช้ CFRP Sheet เสริมกำลังของผนังคอนกรีตสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงมีช่องเปิดที่ศูนย์กลางของผนัง 17 ชั้นโดยการใช้ 1/3 มาตรฐานจริง กำหนดขนาดช่องเปิดแตกต่างกันคือ 5% 10% 20% 30% ของพื้นที่ผนัง ทดสอบแบบผนังทางเดียวรับแรงแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอที่มีระยะเยื้องศูนย์กลาง 1/6 ของความหนาผนัง มีการติดตั้ง CFRP ที่ผิวของผนังเหมือนกันทั้งสองด้านสองรูปแบบ แบบที่ 1 ติดตั้งแผ่น CFRP 4 ชั้นวางขนานกับแนวขอบช่องเปิดทั้ง 4 ด้าน คล้ายกับเป็นกรอบของช่องเปิด แบบที่ 2 ติดตั้งแผ่น CFRP 4 ชั้น เอียงทำมุม 45 องศาที่มุมของช่องเปิดทั้ง 4 ด้าน ผลทดสอบสรุปได้ว่ากำลังประลัยของผนังจะลดลงเมื่อช่องเปิดมีขนาดเพิ่มขึ้น การติดตั้งแผ่น CFRP แบบที่ 1 สามารถเพิ่มการรับกำลังได้ประมาณ 34% ขณะที่การติดตั้งแบบที่ 2 สามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้นประมาณ 55% ซึ่งรับกำลังได้มากกว่าแบบแรก

Lima, M.M., et al., (2019) [7] ได้ศึกษาการเสริมกำลังผนังคอนกรีตรับน้ำหนักโดยมีระยะเยื้องศูนย์กลาง 1/6 ของความหนาผนัง ทดสอบผนังจำนวนทั้งหมด 18 ชั้น จำแนกเป็นการทดสอบระบบผนังแบบทางเดียว จำนวน 6 ชั้น ระบบผนังแบบสองทางแบบยึดรั้ง 3 ด้าน จำนวน 7 ชั้น และระบบผนังแบบสองทางยึดรั้ง 4 ด้านจำนวน 5 ชั้น ผนังเสริมกำลังด้วย CFRP ตามรูปแบบพฤติกรรมของแรง ผลทดสอบสรุปว่าการติดตั้ง CFRP ช่วยเพิ่มกำลังประลัยของผนังภายใต้เงื่อนไขผนังทางเดียวผนังสองทางยึดรั้ง 3 ด้านและ ผนังสองทางยึดรั้ง 4 ด้าน โดยมีช่วงค่ากำลังที่เพิ่มขึ้น 14%-59.7% 3%-40.8% และ 18.4-24.9% ตามลำดับ

Popescu, C., et al., (2017) [8] ได้ศึกษาการเสริมกำลังผนังคอนกรีตรับแรงที่มีช่องเปิดด้วยด้วย CFRP โดยใช้ขนาด 1/2 ของมาตรฐานจริง ทำการทดสอบจำนวน 3 ชั้นทดสอบ ชั้นที่ 1 เป็นผนังทึบ ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 เป็นผนังที่มีช่องเปิดขนาด 20% และ 39% ของพื้นที่ผนัง ผนังชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 เสริมกำลังโดยใช้ CFRP หุ้มพันโดยรอบของพื้นที่ผนังทั้งหมดและฝังยึดด้วย mechanical anchorage เพื่อเพิ่มการโอบรัด (confinement) ให้กับเนื้อคอนกรีตภายใน ผลทดสอบพบว่า ผนังเสริมกำลังชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 รับกำลังได้เพิ่มขึ้นในช่วงค่า 34%-50% และ 13%-27% ตามลำดับ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของผนังคอนกรีตรับน้ำหนักแบบทางเดียวและสองทาง รวมทั้งกรณีผนังคอนกรีตที่มีช่องเปิดและมีช่องเปิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP แต่ก็ยังพบว่างานวิจัยที่ศึกษาการเสริมกำลังของผนังด้วย CFRP นั้นยังมีอยู่น้อยมากและยังไม่ครอบคลุมถึงช่องเปิดขนาดใหญ่ถึง 45 % ซึ่งเป็นขนาดใหญ่มากเทียบเท่าขนาดช่องเปิดของประตูกว้างๆ 2 บานในกรณีที่ต้องการเชื่อมพื้นที่ใช้สอยของห้อง 2 ยูนิตที่ติดกัน ทางผู้วิจัยจึงได้มีการต่อยอดและศึกษาเพิ่มเติมองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

#### 4. วิธีดำเนินการศึกษา

##### 4.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

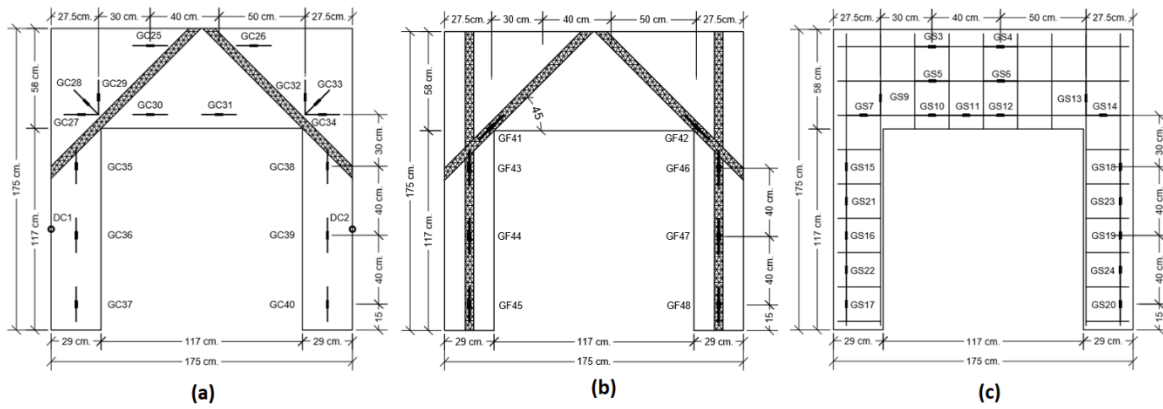
ในการศึกษานี้ใช้ผนังคอนกรีตรับน้ำหนัก (bearing wall) ทั้งหมด 3 ชั้นโดยย่อส่วนลงให้เหลือกำลังเท่ากับ  $1/3$  เท่าของกำลังรับน้ำหนักผนังจริง โดยทั้งหมดมีพฤติกรรมเป็นผนังทางเดียว (one-way action) แบบไม่ถูกจำกัดการหมุนทั้ง 2 ด้าน มีขนาดเท่ากันทุกชั้น คือ ความยาว 175 cm ความสูง 175 cm หนา 7 cm และเสริมด้วยเหล็กตะแกรงไวร์เมช (wire mesh) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 mm ระยะห่าง 20 cm ที่ผลิตตามมาตรฐาน มอก. 737-2549 ชั้นที่ 1 ออกแบบเป็นผนังควบคุมซึ่งจะเป็นผนังทึบ (control wall), CW ชั้นที่ 2 เจาะช่องเปิดบริเวณกึ่งกลางผนัง ขนาดกว้าง 117 cm สูง 117 cm หรือคิดเป็น 45 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผนัง (wall with opening), WO เนื่องจากผนังชั้นนี้จำลองการเจาะช่องเปิดใหม่ในผนังทึบจึงไม่มีเหล็กเสริมพิเศษที่บริเวณมุมช่องเปิดของผนัง ชั้นที่ 3 ผนัง SWO (strengthened wall with opening) เป็นการนำผนังที่เหมือน WO มาเสริมกำลังด้วย CFRP วิธีเสริมกำลังนั้นอาศัยผลการทดสอบชั้น WO เป็นหลักในการพิจารณา โดยจะเสริมกำลังด้วย CFRP เป็นแถบกว้าง 5 cm 1 ชั้น ซึ่งทั้งสองด้านจะมีลักษณะการเสริมกำลังที่แตกต่างกัน จำแนกได้เป็นด้านรับแรงดึง (Tension) และด้านรับแรงอัด (Compression) รายละเอียดดังรูปที่ 3

##### 4.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่า

อุปกรณ์วัดค่าประกอบด้วย strain gauges ที่ใช้วัดค่าหน่วยการยืดหดตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริมรวมทั้ง CFRP และ dial gauges ที่ใช้วัดค่าการโก่งตัวของผนัง เพื่อความกระชับของบทความจะแสดงเฉพาะการติดตั้ง strain gauges และ dial gauges ในผนัง SWO เท่านั้นดังในรูปที่ 3

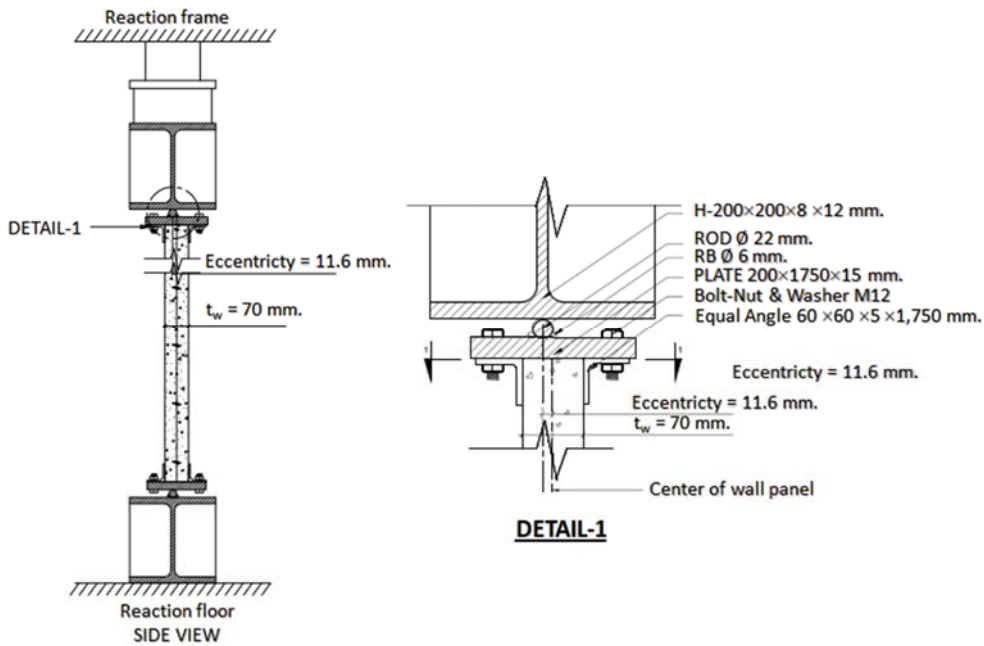
##### 4.3 การทดสอบ

นำผนังชั้นติดตั้งเพื่อเตรียมการทดสอบดังในรูปที่ 4 โดยใส่แรงกระทำแบบแผ่กระจายตลอดความยาวของผนัง ให้แรงกระทำเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ  $1/6$  ของความหนาของผนัง ทำการทดสอบผนังโดยการให้น้ำบรรทุกกระทำต่อผนังเพิ่มน้ำหนักทีละ 1,000 kg พร้อมบันทึกค่า การโก่งตัวของผนังและค่า strain ในเหล็กเสริม ในคอนกรีตและใน CFRP ระหว่างที่ให้น้ำหนักบรรทุกจะบันทึกรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงน้ำหนักที่กระทำ ทดสอบจนกระทั่งผนังนั้นวิบัติ



รูปที่ 3 ตำแหน่งติดตั้ง CFRP Strain gauges และ Dial gauges บนผนัง SWO

a) ผิวผนังคอนกรีตด้านรับแรงอัด b) ผิวผนังคอนกรีตด้านรับแรงดึง c) เหล็กเสริมในผนัง



รูปที่ 4 การทดสอบผนังแบบแรงกระจายสม่ำเสมอและเยื้องศูนย์กลาง

#### 4.4 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัดที่ 28 วันออกแบบไว้เท่ากับ  $240 \text{ kg/cm}^2$  ค่าการยุบตัวเท่ากับ  $10 \pm 2.5 \text{ cm}$  แต่กำลังรับแรงอัดจริงในผนัง CW และผนัง WO หรือ SWO มีค่าเท่ากับ  $306 \text{ kg/cm}^2$  (ลูกปunchชุดที่ 1) และ  $286 \text{ kg/cm}^2$  (ลูกปunchชุดที่ 2) ตามลำดับ และหน่วยการทดสอบ

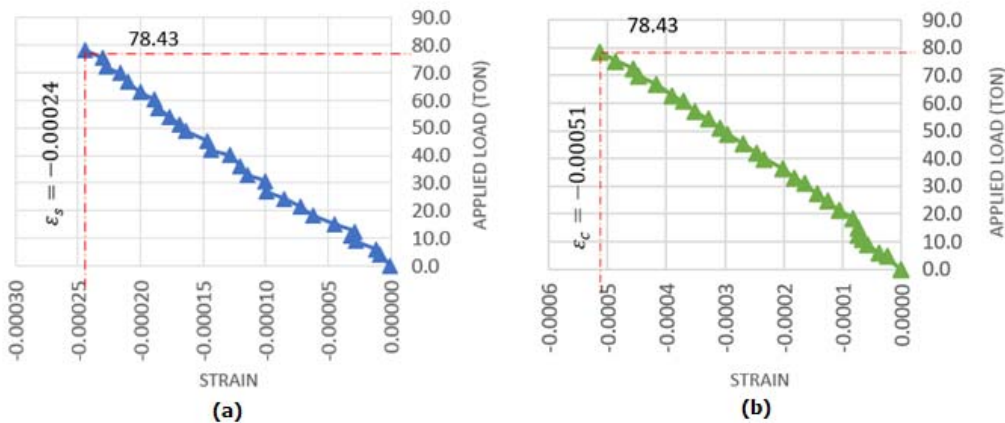


ตัวสูงสุดของคอนกรีตจากการทดสอบลูกปูนทั้ง 2 ชุดขณะวิบัติ  $\epsilon_{cu} = -0.0014$  และ  $-0.0012$  ตามลำดับ (-หมายถึงหน่วยการหดตัว) ส่วนเหล็กไวร์เมชมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 mm ระยะห่าง 20 cm ที่ผลิตตามมาตรฐาน มอก. 737-2549 มีกำลังที่จุดประลัยเท่ากับ  $4,275 \text{ kg/cm}^2$  มีค่าหน่วยการยึดตัวสูงสุดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ  $0.002236$  และ  $1,961,538 \text{ kg/cm}^2$  ตามลำดับ ขณะที่ CFRP ที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ SMARTFIBER - SHEET รุ่น UT70-30 มีค่ากำลังรับแรงดึง  $35,000 \text{ kg/cm}^2$  โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ  $2,350,000 \text{ kg/cm}^2$  ความหนาต่อชั้นเท่ากับ  $0.0167 \text{ cm}$

#### 4.5 ผลการทดสอบ

##### 4.5.1 ผนัง CW

จากการทดสอบผนังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้เท่ากับ 78.43 ตัน จึงวิบัติแบบ buckling failure โดยค่าเฉลี่ย strain ที่ติดตั้งที่เหล็กไวร์เมชบริเวณกึ่งกลางผนังขณะวิบัติเท่ากับ  $\epsilon_s = -0.00024$  ดังในรูปที่ 5a และในผนังคอนกรีตด้านรับแรงอัดที่กึ่งกลางความสูงมีค่า strain เฉลี่ยขณะวิบัติเท่ากับ  $\epsilon_c = -0.00051$  ดังในรูปที่ 5b ส่วนการโก่งตัวสูงสุดที่กึ่งกลางผนังเท่ากับ 4 mm



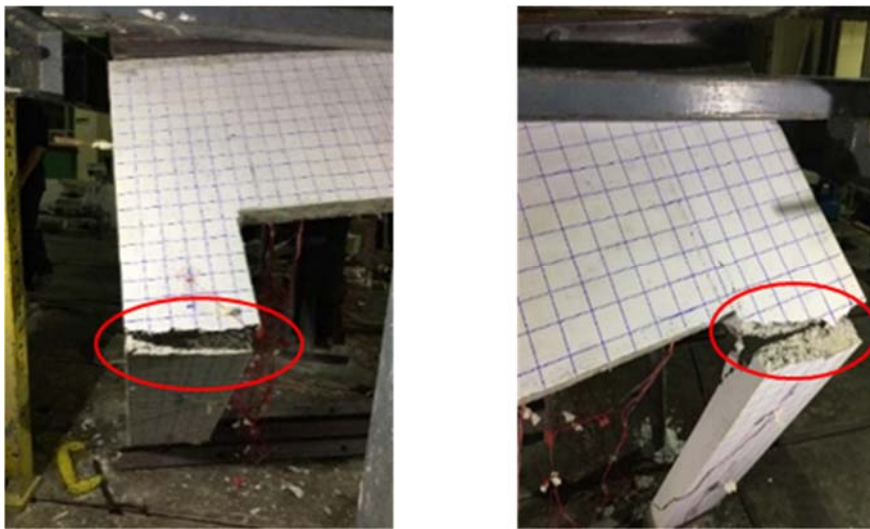
รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ย Strain ในผนัง CW

a) ติดตั้งที่เหล็กเสริมในผนัง    b) ติดตั้งที่ผิวผนังคอนกรีตด้านรับแรงอัด

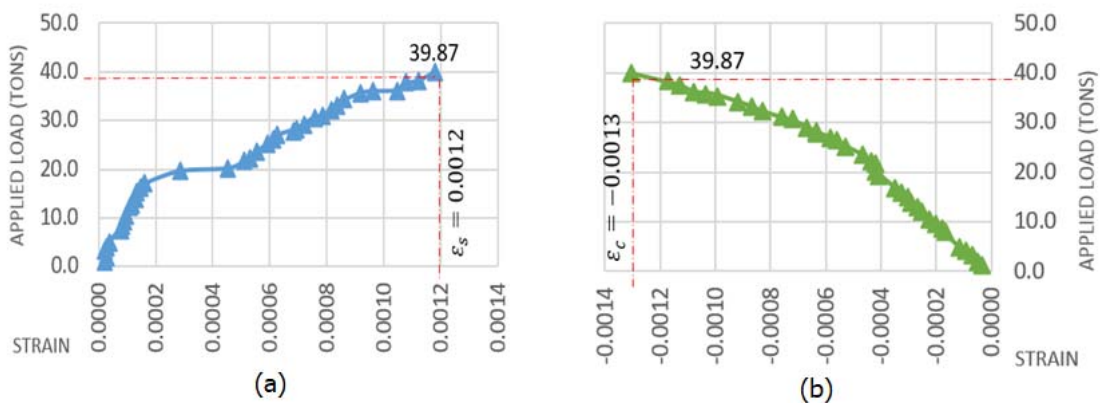
##### 4.5.2 ผนัง WO

ผลการทดสอบพบ first crack ที่แรงกด 27 ตัน บริเวณมุมบนด้านขวาของช่องเปิดขึ้นไปในแนวตั้งและค่อยๆเอียงและค่อยๆเอียงเข้าหาบริเวณกึ่งกลางของยอดบนสุดของผนัง เมื่อเพิ่มแรงกด

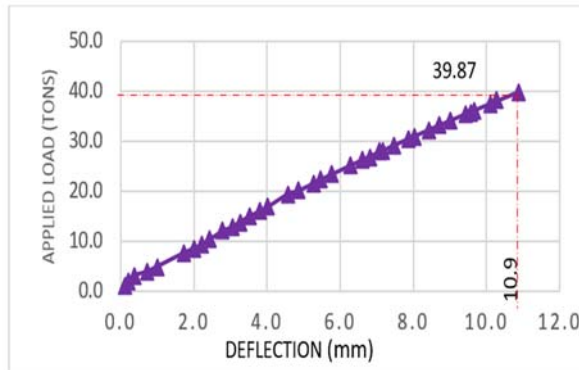
ถึง 39.87 ตัน ผนังจึงเกิดการวิบัติแบบแรงดัดโดยแรงอัดเป็นหลักที่บริเวณขาทั้งสองด้านของช่องเปิด ดังในรูปที่ 6 โดยค่า Strain ในเหล็กเสริมขาผนังข้างช่องเปิดที่ระดับกึ่งกลางความสูงผนังขณะวิบัติ มีค่า  $\epsilon_s = 0.0012$  ดังในรูปที่ 7a และที่ผนังคอนกรีตด้านรับแรงอัดมีค่า strain ขณะวิบัติ  $\epsilon_c = -0.0013$  จาก strain gauge บนผิวคอนกรีตในขาผนังข้างช่องเปิดที่ระดับกึ่งกลางความสูงของผนัง ดังในรูปที่ 7b ซึ่งเท่ากับ  $\epsilon_{cu}$  จากการทดสอบลูกปูน และการโก่งตัวสูงสุดของผนัง WO มีค่าเท่ากับ 10.9 mm ดังในรูปที่ 8



รูปที่ 6 รูปแบบการวิบัติของผนัง WO



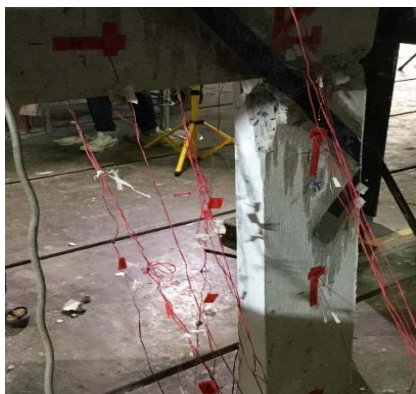
รูปที่ 7 ค่าเฉลี่ย Strain ในผนัง WO ณ กึ่งกลางความสูงผนัง  
a) ที่เหล็กเสริมในผนัง b) ที่ผิวผนังคอนกรีตด้านรับแรงอัด



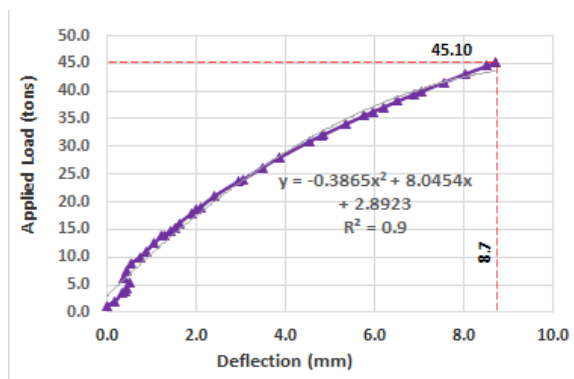
รูปที่ 8 ค่าการโก่งตัว (Deflection) ของผนัง WO

#### 4.5.3 ผนัง SWO

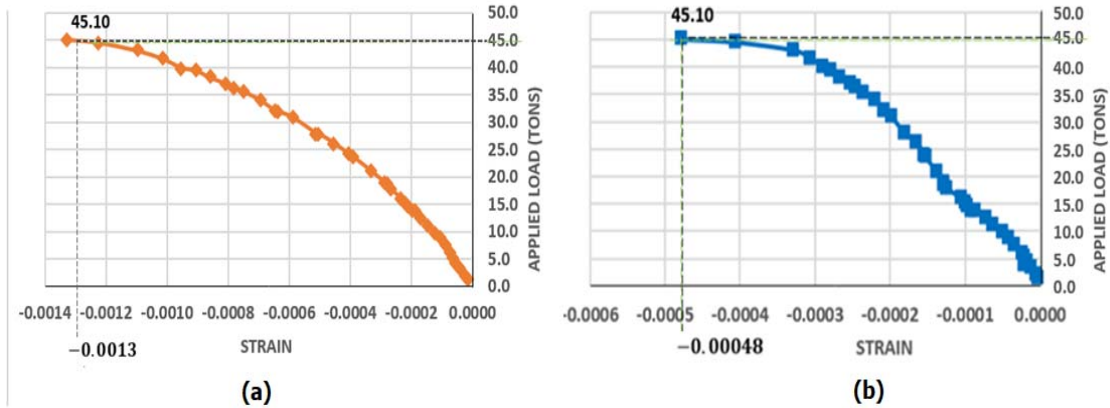
จากผลการทดสอบพบว่า ผนังเสริม CFRP เกิด first crack บริเวณกึ่งกลางขอบล่างเหนือช่องเปิดที่น้ำหนักบรรทุก 40 ตัน และสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุดถึง 45.10 ตัน จึงวิบัติด้วยแรงดัดแบบแรงอัดเป็นหลักในบริเวณขาทั้ง 2 ข้างของผนังข้างช่องเปิดดังแสดงในรูปที่ 9 และมีการโก่งตัวด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 8.7 mm ดังแสดงในรูปที่ 10 การวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลักนั้นยืนยันได้จากหน่วยการหดตัวของคอนกรีตด้านรับแรงอัด (GC38) เท่ากับ  $-0.0013$  ดังแสดงในรูปที่ 11a ซึ่งในขณะนั้นเหล็กเสริมภายในรับแรงอัดเพียงเล็กน้อย ดังแสดงจากหน่วยการหดตัวของเหล็ก ซึ่งในขณะนั้นเหล็กเสริมภายในรับแรงอัดเพียงเล็กน้อยดังแสดงจากหน่วยการหดตัวของเหล็ก (GS18) ในรูปที่ 11b นอกจากนี้หน่วยการยืดตัวใน CFRP ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงผนัง ขณะวิบัติวัดจาก strain gage GF46 มี ค่าเท่ากับ  $0.00117$  ดังแสดงในรูปที่ 12



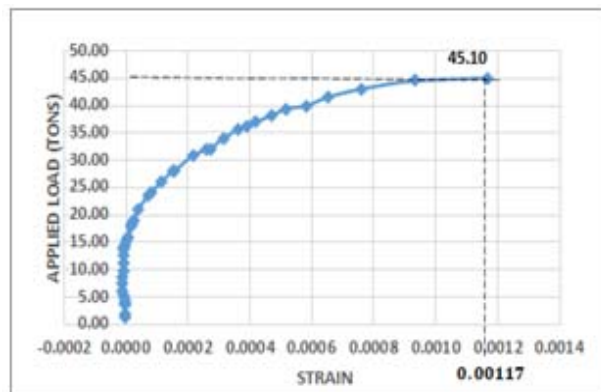
รูปที่ 9 พฤติกรรมวิบัติแบบแรงอัดเป็นหลักในผนัง SWO



รูปที่ 10 ค่าการโก่งตัว (deflection) ของผนัง SWO



รูปที่ 11 ค่าเฉลี่ย strain ผนัง SWO ณ กึ่งกลางความสูงผนัง  
 a) ที่ผิวผนังคอนกรีตด้านรับแรงอัด      b) ที่เหล็กเสริมในผนัง



รูปที่ 12 ค่า strain ใน CFRP ณ กึ่งกลางความสูงผนัง SWO

### 5. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผนัง CW วิกฤติแบบ buckling failure ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลหน่วยการหดตัวของคอนกรีตและเหล็กที่วัดได้ กล่าวคือขณะที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดนั้นหน่วยการหดตัวในคอนกรีตเกิด  $\epsilon_c = -0.00051$  ซึ่งยังไม่ถึงหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตขณะวิกฤติที่ได้จากการทดสอบลูกปูนชุดที่ 1 ( $\epsilon_{cu} = -0.0014$ ) นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ภายใต้แรงอัดซึ่งดูได้จากหน่วยการหดตัวของเหล็กจาก GS16 GS17 และ GS18 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $\epsilon_s = -0.00024$  เปรียบเทียบกับผนัง WO ซึ่งวิกฤติโดยแรงดัดแบบแรงอัดเป็นหลัก โดยขณะที่วิกฤติจะมีหน่วยการยืดตัวในเหล็กเท่ากับ 0.0012 เทียบเท่าหน่วยแรงดึง

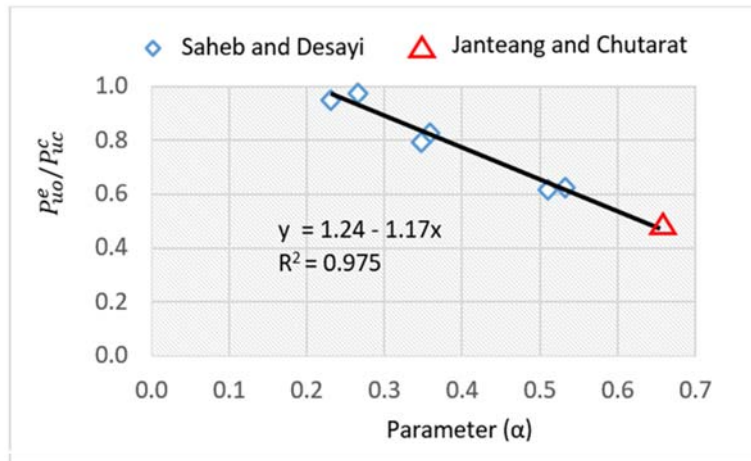
2,350 kg/cm<sup>2</sup> ยังไม่ถึงจุดคราก ขณะที่ Strain สูงสุดที่เกิดในคอนกรีตมีค่าเท่ากับ -0.0013 ซึ่งมีค่ามากกว่าหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตขณะวิบัติที่ได้จากการทดสอบลูกปูนชุดที่ 2 ( $\epsilon_{cu} = -0.0012$ ) จึงสรุปได้ว่าเป็นการวิบัติโดยแรงดัดแบบ Compression control

จากผลการทดสอบพบว่าผนัง CW สามารถรับกำลังที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 78.43 ตัน แต่เมื่อคำนวณตามสมการของ ACI Code [1], AS Code [2] และงานวิจัยของ Saheb and Desayi [3] ได้กำลังเท่ากับ 80.33 ตัน 67.34 ตัน และ 90.79 ตัน เท่ากับมีความคลาดเคลื่อน 2.4%, 14.1% และ 15.7% ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดสอบนี้จึงสรุปว่าสมการที่ใช้ทำนายกำลังผนังที่ไม่มีช่องเปิดได้ใกล้เคียงที่สุดคือมาตรฐาน ACI 318-19 [1] ดังสมการที่ 1

เนื่องจากการหล่อผนัง CW และ WO เป็นการเทคอนกรีตคนละครั้งทำให้  $f'_c$  ของผนัง CW และ WO มีค่าไม่เท่ากันคือ 306 และ 286 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ดังนั้นในการพิจารณาผลของช่องเปิดใน WO จึงต้องคำนวณจากกำลังผนังทึบที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 286 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งคำนวณตามมาตรฐาน ACI Code [1] ได้เท่ากับ 75.08 ตัน จากผลการทดลองพบว่าผนัง WO รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ 39.87 ตัน เท่ากับกำลังลดลง 47% ขณะที่ค่าทางทฤษฎีที่เสนอโดย Saheb and Desayi [3] สามารถคำนวณกำลังของผนังที่มีช่องเปิดได้เท่ากับ 36.91 ตัน คิดเป็นความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 7.4% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์สูง เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นผลมาจากที่มาของสมการถูกสร้างจากขนาดของช่องเปิดที่ถูกจำกัดไว้ไม่เกิน 27% ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเสนอปรับปรุงสมการ Empirical equation โดยเพิ่มผลการทดสอบของผู้วิจัยซึ่งเป็นผลของการทดสอบผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 45% (จำนวน 1 ชิ้น) ร่วมกับผลทดสอบของ Saheb and Desayi [3] ในรูปที่ 2 (จำนวน 6 ชิ้น) จากผลการทดสอบกำลังของผนังคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ( $P_{uo}^e$ ) สามารถสร้างความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างกำลังของผนังที่มีช่องเปิดที่ได้จากการทดสอบ ( $P_{uo}^e$ ) ส่วนด้วยกำลังของผนังทึบ ( $P_{uc}^c$ ) ที่ได้จากสมการที่ 4 ได้เท่ากับ 0.469 และ  $\alpha$  เท่ากับ 0.668 ดังโคออร์ดิเนต ( $\Delta$ ) ในรูปที่ 13 จากภาพซึ่งประกอบด้วยผลการทดสอบของ Saheb and Desayi [3] จำนวน 6 จุด ที่ได้จากตารางที่ 1 และจากผู้วิจัย 1 จุด สามารถสร้างสมการเพื่อทำนายกำลังผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มากถึง 45% ได้ดังสมการที่ 6 ซึ่งจะได้กำลังของผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เท่ากับ 38.98 ตันหรือมีความคลาดเคลื่อนเพียง 2.2%

$$P_{uo}^e = (1.24 - 1.17\alpha)P_{uc}^c$$

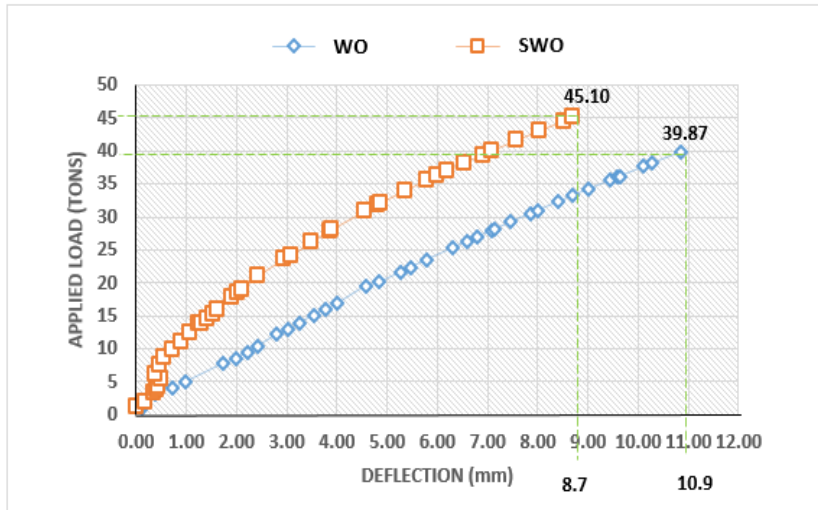
(6)



รูปที่ 13 ปรับปรุง Empirical equation โดยรวมผลการทดสอบทั้ง 7 ชิ้น

จากสัดส่วนของผนังที่คงอยู่หลังเจาะช่องเปิดขนาดใหญ่มากในผนัง WO ทำให้ Mode of failure เป็นการพังภายใต้แรงดัดแบบแรงอัดเป็นหลัก หรือ Compression control ของชาผนังที่เหลือด้านข้างช่องเปิด แทนที่จะพังภายใต้แรงดัดของแถบผนังที่เหลือของส่วนบนเหนือช่องเปิด ทำให้แผนการเสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งจะโดดเด่นด้านแรงดัดที่ตั้งใจจะเสริมไว้เหนือช่องเปิดขนาดใหญ่นั้น ต้องเปลี่ยนไปเป็นเสริมกำลังด้านรับแรงดัดในขาทั้งสองข้างช่องเปิดแทน ซึ่งโดยปกติแล้วถ้าหน้าตัดวิบัติแบบ Compression control การเสริมกำลังด้านรับแรงดัดอาจไม่เกิดประโยชน์สักเท่าใดนัก อย่างไรก็ตามการเสริมกำลังดังกล่าวในผนัง SWO ก็ยังสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกให้สูงขึ้นได้เป็น 45.10 ตัน หรือเพิ่มขึ้นเท่ากับ 13.1 % ได้ เนื่องจากเป็นการเพิ่ม Stiffness ให้แก่ชิ้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 14

จากรูปจะเห็นได้ว่าหลังจากเสริมกำลังด้วย CFRP ในผนัง SWO แล้ว ณ กำลังบรรทุกเท่ากัน ผนัง SWO มีการโก่งตัวด้านข้างน้อยกว่าผนัง WO ซึ่งในการนี้ทำให้เหล็กเสริมภายในผนังเปลี่ยนจากการรับแรงดัดในผนัง WO มาเป็นรับแรงอัดในผนัง SWO ในขณะวิบัติ ส่งผลให้หน้าตัดที่วิบัติแบบ Compression control สามารถเสริมกำลังด้วย CFRP แล้วทำให้รับน้ำหนักได้สูงขึ้นดังกล่าว



รูปที่ 14 ค่าการโก่งตัว (Deflection) ของผนัง WO และ SWO

## 6. สรุปผลการศึกษา

1. กำลังของผนังที่ไม่มีช่องเปิดสามารถใช้มาตรฐานของ ACI ในการคำนวณได้เหมาะสมที่สุดโดยมีความคลาดเคลื่อนเพียง 2.4%
2. ผนังคอนกรีตรับน้ำหนักที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มากถึง 45% สามารถรับกำลังได้ 39.87 ตัน หรือมีความสามารถในการรับกำลังลดลงเท่ากับ 47% เมื่อเทียบกับผนังที่ไม่มีช่องเปิด
3. เสนอสมการทำนายกำลังผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มากถึง 45% โดยปรับปรุง Empirical equation ซึ่งใช้ข้อมูลผนวกพร้อมกันทั้งจากผู้วิจัยและของ Saheb and Desayi [3] ได้สมการ  $P_{uo}^e = (1.24 - 1.17\alpha)P_{uc}^c$  ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเพียง 2.2%
4. ผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่และมีพฤติกรรมการวิบัติแบบ Compression control สามารถเสริมกำลังด้วย CFRP ได้ โดยอาจเพิ่มความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกได้ถึง 13.1%

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Smart and Bright Co., Ltd. ที่ให้การสนับสนุน CFRP ในการทดสอบ และ Asian Institute of Technology ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือทดสอบและบุคลากร ทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

## เอกสารอ้างอิงหรือบรรณานุกรม

- [1] ACI 318 - 19 (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Concrete Institute, Detroit, USA.
- [2] AS 3600-2009 (2009). *Concrete Structures*. Australian Standard, Sydney, Australia.
- [3] Saheb, S. M. & Desayi, P. (1990). Ultimate strength of RC wall panels with openings. *Journal of Structural Engineering*, 116(6), 565-77.
- [4] Fragomeni, S., Doh, J. H., & Lee, D. J. (2012). Behavior of axially loaded concrete wall panels with openings: An experimental study. *Advances in Structural Engineering, SAGE journals*, 15(8), 1345-1358.
- [5] Popescu, C., Sas, G., Sabău, C., & Blanksvärd, T. (2016). Effect of cut-out openings on the axial strength of concrete walls. *Journal of Structural Engineering*, 142(11).
- [6] Mohammed, B. S., Ean, L. W., & Hossain, K. M. A. (2010). *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, Vol. 1, Issue 4, pp.1841-1852.
- [7] Lima, M. M., Doh, J. H., & Hadi, M. N. S. (2019). Experimental study on RC walls with opening strengthened by Externally Bonded CFRP. *Journal of Composites for Construction*, 23.
- [8] Popescu, C., Sas, G., Blanksvärd, T., & Täljsten, B. (2017). Concrete walls with cutout openings strengthened by FRP confinement. *Journal of Composites for Construction*, 21(3).



## เกี่ยวกับผู้แต่งบทความ

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัชวาลย์ พูนลาภพานิช** เป็นหัวหน้าหลักสูตรวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีและปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย งานวิจัยที่สนใจด้านฐานรากเสาเข็มและระบบกำแพงกันดิน และการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายนอกด้วย CFRP

**ดร.ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์** สังกัดสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยซีราคิวส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา งานวิจัยที่สนใจด้าน การซ่อมเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

**เลิศภพ จันทรเทียง** เป็นผู้จัดการโครงการ บริษัทไรโกทองคอนสตรัคชั่นแอนด์เซอร์วิส จำกัด จบการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม งานวิจัยที่สนใจด้าน การเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย CFRP

## การอ้างอิงบทความ (citation)

ชัชวาลย์ พูนลาภพานิช, ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์ และ เลิศภพ จันทรเทียง (2565), "พฤติกรรมผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เสริมกำลังด้วย CFRP (Behavior of CFRP-reinforced concrete bearing wall panels with large opening)," *วารสารคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 3, บทความหมายเลข TCA\_M 160306, กันยายน-ธันวาคม, 17 หน้า.

Poonlappanish, C., Chutarat, N., & Janteang, L. (2022) "Behavior of CFRP-Reinforced concrete bearing wall panels with large opening," *TCA Magazine, Thailand Concrete Association*, Vol.16, Issue 3, Paper ID TCA\_M 160306, September - December, 17 pages.