กำลังของผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่

STRENGTH OF PRECAST CONCRETE BEARING WALLS WITH LARGE OPENING

เลิศภพ จันทร์เที่ยง[1,*], ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์[2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
[2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
*Corresponding author; E-mail address: Lertpob_1699@hotmail.co.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงกำลังของผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ โดยการย่อขนาดผนังให้เหลือกำลังเท่ากับ 1/3 ของกำลังรับน้ำหนักจริงแล้วทำการทดสอบ ชิ้นทดสอบมีขนาด กว้าง 175 ซม. สูง 175 ซม. และ หนา 7 ซม. จำนวน 2 ชิ้น โดยชิ้นที่หนึ่งเป็นผนังทึบ ชิ้นที่สองมีช่องเปิดขนาด 45% ทดสอบโดยการให้น้ำหนักในแนวดิ่งแบบแผ่กระจายเสม่ำเสมอตลอดความยาวผนัง และให้แรงกระทำเยื้องศูนย์เท่ากับ 1/6 ของความหนา ผลการทดสอบพบว่าผนังที่ไม่มีช่องเปิดรับกำลังได้ 78.43 ตัน โดยวิบัติแบบโก่งเดาะ ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนจากมาตรฐานของอเมริกาและออสเตรเลียเท่ากับ 2.4% และ 14.1% ตามลำดับ ส่วนผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่วิบัติแบบแรงอัดเป็นหลักและมีความสามารถในการรับน้ำหนักลดลง 47% และเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของผนังที่มีช่องเปิดที่คำนวณจากสมการที่มีในอดีต ซึ่งจำกัดขนาดช่องเปิดไว้เพียง 27% พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 7.4% จากสมการนี้ทางผู้วิจัยได้พัฒนาเพื่อทำนายกำลังผนังคอนกรีตรับน้ำหนักที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เท่ากับ 45% และทำให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยลงเหลือ 2.3% ซึ่งสามารถใช้ในการทำนายกำลังของผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ในอนาคตได้

คำสำคัญ: กำลังของผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูป, กำลังผนังคอนกรีตรับน้ำหนักที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่, สมการคำนวณกำลังผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่

Abstract

This research studied the strength of precast concrete bearing walls with large opening. The size of specimens was reduced to get the strength of 1/3 of the actual nominal wall's strength. Two specimens were constructed with the dimensions of 175 cm wide, 175 cm high and 7 cm thick. One of which was a solid wall, the other had a 45% opening. Tests were performed by applying the uniformly distributed load at the upper edge along the length of the wall. Test results showed that the wall without opening had a load carrying capacity of 78.43 tons with a buckling mode of failure. The ultimate testing load was found to be 2.4% and 14.1% different from the theoretical values according to the American and Australian standard respectively. For the wall with large opening, the failure mode was flexural failure with compression control. The load carrying capacity was 47% decrease. This experimental value compared to the theoretical value suggested by researcher was found to be 7.4% different. The discrepancy may result that the theoretical vale was formulated by the test results of wall with opening less than 27%. Therefore, from this research of wall with very large or 45% opening, the Empirical formula was developed using test results of researchers. The proposed formula can decrease the degree of discrepancy to be less than 2.3% which suitable for strength prediction of walls with large opening.

Keywords: Strength of precast concrete bearing wall, Strength of precast concrete bearing walls with large opening, Equation for strength of precast concrete walls with large opening

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประชากรในเมืองใหญ่ๆมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ ส่งผลให้ความต้องการในที่อยู่อาศัยเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพื่อความรวดเร็ว ในอุตสาหกรรมงานก่อสร้างได้มีการเริ่มเลือกใช้วัสดุโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป (Pre-Cast) มาเป็นระบบในการก่อสร้างและติดตั้ง ยกตัวอย่าง เช่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูปซึ่งจะมีทั้งระบบแบบ ทางเดียว (One-Way Walls) และ สองทาง (Two-Way Walls) โดยจะมีทั้งออกแบบเพื่อรับน้ำหนักและไม่รับน้ำหนัก ซึ่งจำแนกตามวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น ผนังคอนกรีตสำเร็จรูปของอาคารที่พักอาศัยสองชั้นโดยออกแบบให้เป็นผนังรับน้ำหนัก (Bearing walls) โดยเป็นผนังชั้นที่หนึ่งที่รับน้ำหนักพื้นชั้นที่สอง ถ้าพิจารณาที่ผนังแบ่งหน่วยที่พักอาศัย จะเป็นผนังทึบ (Solid Walls) ที่ไม่มีช่องเปิดแต่หากว่าผู้อยู่อาศัยต้องการที่จะเจาะช่องเปิดในผนัง เพื่อที่จะทำช่องแสงหรือช่องระบาย

อากาศ หรือแม้กระทั่งเจาะช่องเปิดขนาดใหญ่เพื่อเชื่อมต่อการใช้งาน 2 หน่วยที่พักที่ติดกันก็ทำได้ยากเนื่องจากโครงสร้างได้ถูกออกแบบเป็นผนังทึบที่รับแรงแนวดิ่งจากน้ำหนักบรรทุกในชั้นที่สอง

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษากำลังของผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปเนื่องจากผลของการเจาะช่องเปิดขนาดใหญ่

2. สร้างสมการทำนายกำลังในผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่เจาะช่องเปิดขนาดใหญ่

3. มาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่ใช้ในงานนี้จะเป็นทฤษฎีที่ว่าด้วยกำลังรับน้ำหนักของผนังที่ไม่มีช่องเปิดซึ่งกล่าวไว้ในมาตรฐาน ACI Code และมาตรฐาน AS Code ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเป็นงานวิจัยที่แสดงผลของการทดสอบผนังที่มีช่องเปิดและไม่มีช่องเปิด รายละเอียดดังแสดงดังต่อไปนี้

3.1 มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

การหากำลังผนังคอนกรีตรับแรงซึ่งในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงมาตฐานของ ACI 318-19 [1] และ AS-3600-2009 [2] โดยการคำนวณกำลังผนังคอนกรีตเสริมเหล็กที่พิจารณาตาม ACI ดังสมการที่ (1)

$$P_{nw} \quad f_c A_g \quad \frac{k l_c}{h} \tag{1}$$

กำหนดให้ 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), คือ ตัวคูณลดกำลัง, k คือ ตัวคูณประกอบความสูงผนัง, f_c คือ กำลังต้านแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน (k_g/cm^2), ในส่วนถัดมาจะเป็นการคำนวณกำลังของผนังรับแรงตามแนวดิ่งโดยมาตฐานของ AS-3600-2009 [2] จะมีการพิจารณาผลของระยะเยื้องศูนย์ของแรงที่กระทำ (e) โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลางตามความหนาของผนัง แต่ทั้งนี้ระยะเยื้องศูนย์ต้องไม่เกินกว่าหนึ่งในหกของความหนาผนัง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

$$N_u \quad t_w \quad e \quad e_a \quad f_c \tag{2}$$

กำหนดให้ N_u คือ กำลังรับแรงของผนังในแนวดิ่ง (kg/cm), t_w คือ ความหนาของผนังคอนกรีต (cm), e คือ ระยะเยื้องศูนย์โดยวัดจากศูนย์กลางของผนัง (cm) โดยระยะเยื้องศูนย์จะต้องไม่น้อยกว่า t_w, f_c คือ ค่ากำลังรับแรงอัดระบุของคอนกรีต (kg/cm^2), H_{we} คือ ความสูงประสิทธิผลของผนัง (cm) kH_w, e_a H_{we} t_w, , H_w คือ ความสูงของผนัง (cm), L คือ ความยาวผนัง (cm)

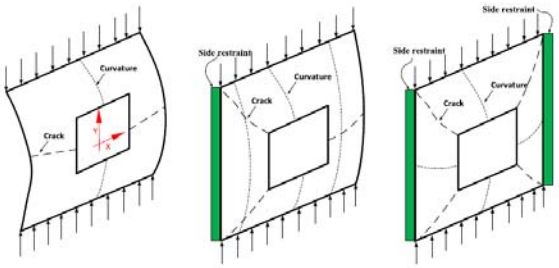
ระบบผนังทางเดียว k (เมื่อถูกจำกัดการหมุนด้านบนและด้านล่างของผนัง), k (เมื่อไม่ถูกจำกัดการหมุนด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน)

ระบบผนังสองทางถูกค้ำยัน 3 ด้าน k $\dfrac{}{\frac{H_w}{L}}$

ระบบผนังสองทางถูกค้ำยัน 4 ด้าน k $\dfrac{}{\frac{H_w}{L}}$ (สำหรับ H_w L), k $\frac{L}{H_w}$ (สำหรับ H_w L)

3.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผนังคอนกรีตรับน้ำหนัก (Bearing walls) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ ระบบผนังแบบทางเดียว One-Way Walls (โก่งตัวทิศทางเดียว) และระบบผนังแบบสองทาง Two-Way Walls (โก่งตัวสองทิศทาง) ดังในรูปที่ 1 (ก) พฤติกรรมผนังระบบทางเดียว, (ข) พฤติกรรมผนังระบบสองทางถูกค้ำยันสามด้าน, (ค) พฤติกรรมผนังระบบสองทางถูกค้ำยันสี่ด้าน



(ก) (ข) (ค)

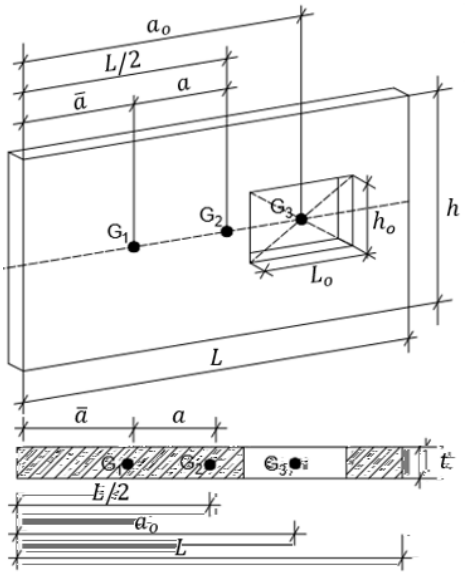
รูปที่ 1 การจำแนกระบบของผนังรับแรง [6]

Saheb and Desayi, (1990) [3] ได้ทดสอบผนังทั้งหมด 12 ชิ้น โดยผนังมีรูปแบบของช่องเปิดที่แตกต่างกัน 6 แบบแยกเป็น แบบ One-way action 6 ชิ้น และ Two-way action 6 ชิ้น โดยการคำนวณพิจารณาจากตัวแปรในรูปที่ 2 และสมการทำนายกำลังของผนังที่มีช่องเปิด ระบบผนังทางเดียว (One-Way Walls) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$P_{uoc}^{c} \quad k \quad k \quad P_{uc}^{c} \tag{3}$$

กำหนดให้ P_{uoc}^{c} คือ กำลังของผนังที่มีช่องเปิด (kg), P_{uc}^{c} คือ กำลังของผนังทึบ (kg), G_1 และ G_2 คือ จุดศูนย์ถ่วงของผนังที่มีช่องเปิดและไม่มีช่องเปิดตามลำดับ, G_3 คือ จุดศูนย์ถ่วงของช่องเปิด, คือ ค่าความแข็งของผนัง $\frac{A}{A}$ $\frac{a}{L}$, A คือ พื้นที่หน้าตัดตามความยาวของช่องเปิด L t, a คือ ระยะจุดศูนย์ถ่วงของผนังที่มีช่องเปิดถึงจุดศูนย์ถ่วงของผนังที่ไม่มี

ช่องเปิด $\frac{L}{}$ $\bar{a}$, A คือ พื้นที่หน้าตัดตามความยาวผนัง Lt , $\bar{a}$ คือ ระยะจากจุดศูนย์ถ่วงของผนังที่มีช่องเปิดถึงแนวแกนอ้างอิง $L\,t$ $L\,ta$ Lt $L\,t$



รูปที่ 2 ผนังคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด [3]

โดยที่กำลังของผนังทึบ (P_{uc}^{c}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) และสมการที่ (5)

$$P_{uc}^{c} \qquad Af_c \quad f_{yu} \quad f_c\,A_{sv} \qquad \frac{h}{t}$$

$$\frac{h}{L} \qquad (4)$$

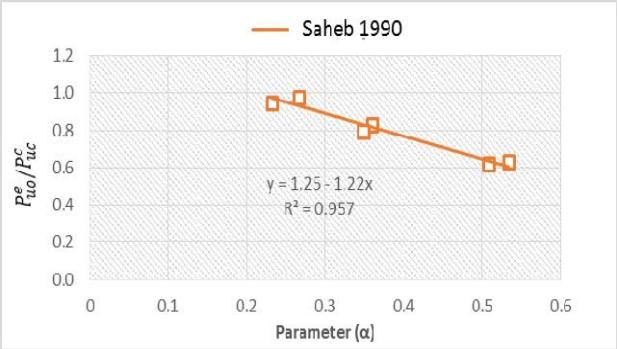
โดยที่ อัตราส่วนความสูงต่อความยาวจะต้องน้อยกว่า 2 หรือ $\frac{h}{L}$ ส่วนกำลังของผนังที่ไม่มีช่องเปิดที่มีอัตราส่วน $\frac{h}{L}$ จะแสดงในสมการที่ (5)

$$P_{uc}^{c} \qquad Af_c \quad f_{yu} \quad f_c\,A_{sv} \qquad \frac{h}{t} \qquad (5)$$

จากการทดสอบรอยร้าวที่เกิดขึ้นของผนัง one-way action อยู่ระหว่าง 33% - 72% ของกำลังประลัย รอยร้าวที่เกิดขึ้นของผนัง two-way action อยู่ระหว่าง 34% - 80% ของกำลังประลัย ความเครียดที่ผิวหน้าและการโก่งตัวทางด้านข้างพบว่ามีความแตกต่างอย่างเป็นสัดส่วน เมื่อมีการใช้น้ำหนักเพิ่มเป็น 60% - 70% ของน้ำหนักประลัยสูงสุดของชิ้นทดสอบ และพบว่าผนังแบบ two-way action มีประสิทธิภาพในการรับแรงที่มากกว่าแบบ one-way action จากตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของช่องเปิด ( ) และกำลังของผนังที่มีช่องเปิดต่อกำลังของผนังทึบ (P_{uo}^{e} P_{uc}^{c}) และเสนอค่า k ในสมการที่ (3) จากการทดสอบแบบ *one-way action* คือ k และ k ดังในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 แสดงผลการคำนวณในผนัง One-Way Walls [3]

No.	Panel designation	A A	a L	Parameter	$\frac{P_{uo}^{e}}{P_{uc}^{c}}$
1	WWO-1	0.267	0.000	0.267	0.9755
2	WWO-2	0.267	0.093	0.360	0.8253
3	WWO-3	0.534	0.000	0.534	0.6287
4	WWO-4	0.233	0.000	0.233	0.9466
5	WWO-5	0.233	0.116	0.349	0.7948
6	WWO-6	0.500	0.009	0.509	0.6141



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง และ P_{uo}^{e} P_{uc}^{c} [3]

Fragomeni. et al., (2012) [4] ได้ศึกษาผนังคอนกรีตรับกำลังจำนวณ 47 ตัวอย่างที่มีที่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์เท่ากับ $t_w/6$ เป็นการทดสอบโดยใช้ 1/2 Scale โดยมีการกำหนดการทดสอบเป็น One-Way Action และ Two-way Action ซึ่งมีค่า Slenderness ratio 30,35,40 โดยทำการศึกษา รูปแบบของรอยร้าว รูปแบบการวิบัติ และการโก่งตัว เนื่องจากน้ำหนักโดยมีการทดสอบจนวิบัติ โดยมีการคำนวณกำลังตามมาตรฐาน Australian standard ในการออกแบบ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถ ลว ิ ี ง ค ี อ

ÿgóÐ *® .7'lÀ À

ตามลำดับ ทั้งหมดทั้งมวลขนาดของช่องเปิดที่มีขนาดเล็กจะแข็งแรงกว่าช่องเปิดที่มีขนาดใหญ่

Lima et al., (2019) [6] ได้ดำเนินการทดสอบผนังคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาด 14% โดยรับแรงแบบแผ่กระจายเสม่ำเสมอและมีการเยื้องศูนย์เท่ากับ 1/6 ของความหนาภายใต้เงื่อนไขที่ต่างกันคือ ผนังทางเดียว ผนังสองทางถูกค้ำยันสามด้าน ผนังสองทางถูกค้ำยันสี่ด้าน ผลการทดสอบสรุปว่าผนังสองทางถูกค้ำยันสามด้านรับแรงได้มากกว่าผนังทางเดียว ส่วนผนังสองทางถูกค้ำยันสี่ด้านรับแรงได้มากมากที่สุด

Doh et al., (2006) [7] ได้ดำเนินการทดสอบผนังคอนกรีต 12 ชิ้นที่มีช่องเปิดในพฤติกรรม One-way และ Two-way action โดยมีขนาดช่องเปิดไม่เกิน 16% และได้พัฒนาสมการของน้ำหนักประลัยซึ่งเปรียบเทียบได้กับผลการทดสอบมีค่า R^2=0.985 สำหรับผนังคอนกรีตที่มีช่องเปิดโดยมีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 30

Doh et al., (2010) [8] ได้เสนอผลจากการศึกษาการทดสอบผนังคอนกรีตรับกำลัง 6 ชิ้นโดยการใช้ 1/2 มาตราส่วนจริงในผนังคอนกรีตรับกำลังที่มีฐานรองรับ 3 ด้านจากผลการทดสอบ ช่องเปิดที่มีขนาดเล็กผนังจะมีกำลังประลัยที่มากกว่าช่องเปิดที่มีขนาดใหญ่, ช่องเปิดที่เยื้องไปทางขวาใกล้กับผนังด้านที่ไม่มีฐานรองรับจะมีกำลังประลัยที่มากกว่าช่องเปิดที่เยื้องไปทางซ้ายจากศูนย์กลาง

Hatami. et al., (2014) [9] ได้วิเคราะห์กำลังของผนังคอนกรีตโดยใช้โปรแกรม LUSAS เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของผนังที่มีช่องเปิดขนาดที่แตกต่างกันโดยมีพื้นที่คอนกรีตเหนือช่องเปิดที่แตกต่างกันคือ 20, 30, และ 40 cm จากแบบจำลอง ผนังมีการวิบัติบริเวณคอนกรีตเหนือช่องเปิดเสมือนคานซึ่งมีพื้นที่คอนกรีตค่อนข้างน้อยและได้เสนอสมการในการคำนวณกำลัง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นได้ว่าการศึกษาการรับกำลังของผนังคอนกรีตเสริมเหล็กทีมีช่องเปิดที่มีขนาดเกิน 40% นั้นยังไม่มีการศึกษาและทดสอบ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาทางด้านงานก่อสร้างจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

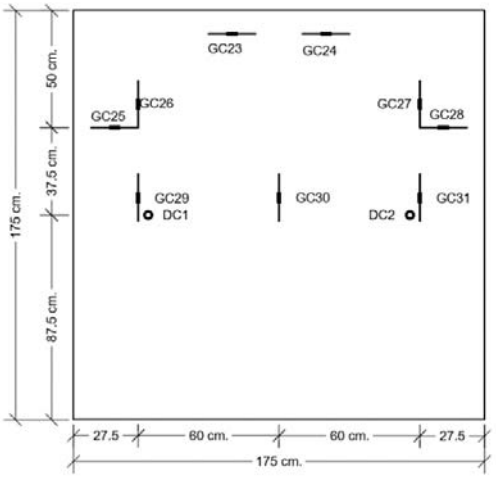
4. วิธีดำเนินงานวิจัย

4.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

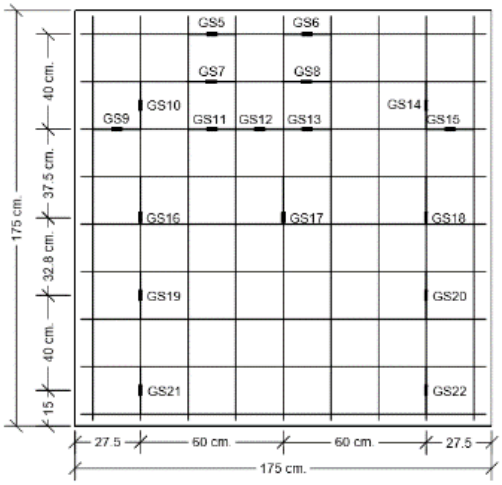
ในงานวิจัยนี้ใช้ผนังคอนกรีตรับน้ำหนัก (Bearing Wall) ทั้งหมด 2 ชิ้น โดยลดขนาดเท่ากับ 1/3 ของกำลังประลัย โดยทั้งหมดมีพฤติกรรมเป็นผนังทางเดียว (one-way action) แบบไม่ถูกจำกัดการหมุนทั้ง 2 ด้าน มีขนาดเท่ากันทุกชิ้น คือ ความยาว 175 เซนติเมตร ความสูง 175 เซนติเมตร และหนา 7 เซนติเมตร และเสริมด้วยเหล็กตะแกรงไวร์เมช (Wire mesh) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ระยะห่าง 20 เซนติเมตร ที่ผลิตตามมาตรฐาน มอก. 737-2549 ชิ้นที่ 1 ออกแบบเป็นผนังควบคุมซึ่งจะเป็นผนังทึบ (Control Wall), CW ชิ้นที่ 2 เจาะช่องเปิดบริเวณกึ่งกลางผนังขนาดกว้าง 117 เซนติเมตร สูง 117 เซนติเมตร หรือคิดเป็น 45 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผนัง (Wall with Opening), WO เนื่องจากผนังชิ้นนี้จำลองการเจาะช่องเปิดในผนังทึบจึงไม่มีเหล็กเสริมพิเศษที่บริเวณมุมช่องเปิดของผนังดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

4.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่า

อุปกรณ์วัดค่าประกอบด้วย Strain gauges ที่ใช้วัดค่าหน่วยการยืดหดตัว ของคอนกรีตและเหล็กเสริม และ Dial gauges ใช้วัดค่าการโก่งตัว ซึ่งในผนัง CW มีการติดตั้ง Strain gauges ที่ผิวคอนกรีตจำนวน 9 ตัว ใช้สัญลักษณ์เป็น GC23-GC31 ดังแสดงในรูปที่ 4 ส่วนที่ติดตั้งที่เหล็กเสริมนั้นให้สัญลักษณ์เป็น GS5-GS22 ซึ่งมีจำนวน 18 ตัวดังรูปที่ 5 ส่วน Dial gauges ใช้วัดระยะการโก่งตัวของผนังจำนวน 2 ตัวกำหนดเป็น DC1 และ DC2 โดยจะติดตั้งที่กึ่งกลางความสูงของผนังดังในรูปที่ 4 ในทำนองเดียวกันในผนัง WO มีการติดตั้ง Strain gauge ผิวคอนกรีตจำนวน 16 ตัว จะใช้สัญลักษณ์เป็น GC25-GC40 ดังในรูปที่ 6 ส่วนที่ติดตั้งที่เหล็กเสริมนั้นจะให้สัญลักษณ์เป็น GS3-GS20 มีจำนวน 21 ตัวดังในรูปที่ 7 ส่วน Dial gauges มีจำนวน 2 ตัวจะกำหนดเป็น DC1 และ DC2 โดยจะติดตั้งที่กึ่งกลางความสูงของช่องเปิดดังในรูปที่ 6



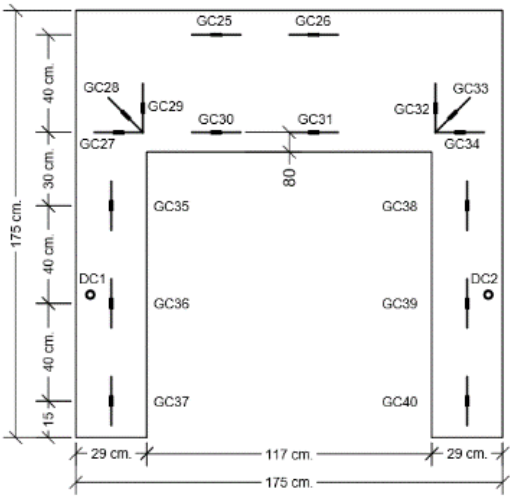
รูปที่ 4 ตำแหน่งติดตั้ง Strain gauges และ Dial gauges ที่ผิวคอนกรีตผนัง CW



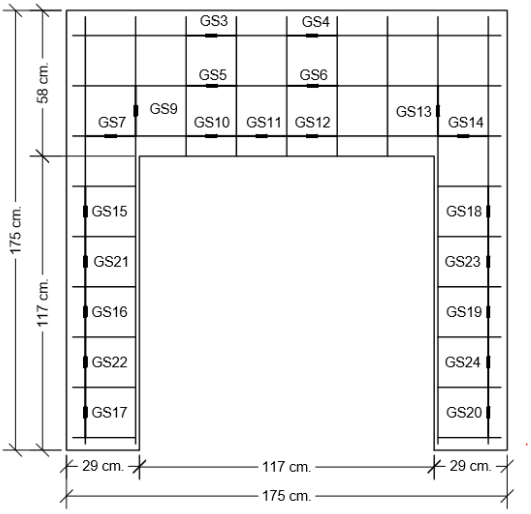
รูปที่ 5 ตำแหน่งติดตั้ง Strain gauges ที่เหล็กเสริมในผนัง CW

4.3 การทดสอบ

นำผนังขึ้นติดตั้งเพื่อเตรียมการทดสอบดังในรูปที่ 8 โดยให้แรงกระทำแบบแผ่กระจายตลอดความยาวของผนังซึ่งให้แรงกระทำเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 1/6 ของความหนาของผนัง ดังในรูปที่ 9 พร้อมทั้งติดตั้ง Dial gauges เพื่อวัดการโก่งตัวของผนังและตรวจสอบระบบส่งสัญญาณของเครื่องอ่านค่าที่ต่อเชื่อมกันกับอุปกรณ์วัดค่าและทำการทดสอบผนังโดยการ



รูปที่ 6 ตำแหน่งติดตั้ง Strain gauges และ Dial gauges ที่ผิวคอนกรีตผนัง WO

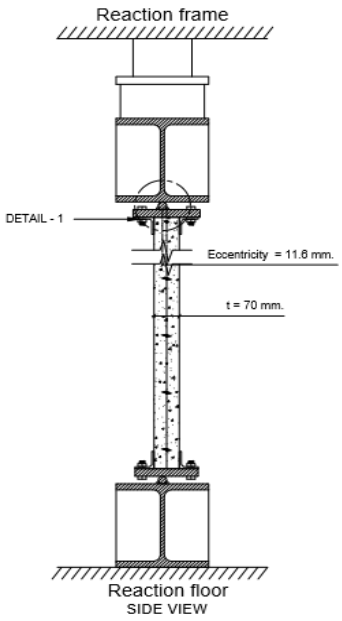


รูปที่ 7 ตำแหน่งติดตั้ง Strain gauges ที่เหล็กเสริมในผนัง WO

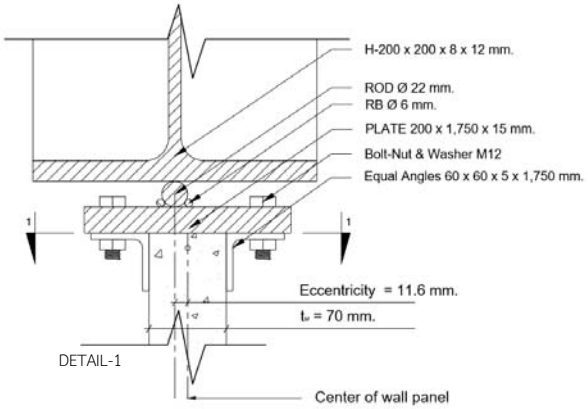
ให้น้ำบรรทุกกระทำต่อผนังเพิ่มน้ำหนักทีละ 1,000 kg พร้อมบันทึกค่า การโก่งตัวของผนังและค่า Strain ในเหล็กเสริมและคอนกรีตระหว่างที่ให้น้ำหนักบรรทุกจะบันทึกรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงน้ำหนักที่กระทำทดสอบจนกระทั่งผนังนั้นวิบัติ

4.4 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัดที่ 28 วันออกแบบไว้เท่ากับ 240 kg/cm^2 ค่าการยุบตัวเท่ากับ cm ซึ่งในการทดสอบผนัง CW และผนัง WO มีค่า f_c เท่ากับ 306 kg/cm^2 (ลูกปูนชุดที่ 1) และ 286 kg/cm^2 (ลูกปูนชุดที่ 2) ตามลำดับ และหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตขณะวิบัติ $_{cu}$ และ ตามลำดับ (หมายถึงหน่วยการหดตัว) ส่วนเหล็กไวร์เมชมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 mm ระยะห่าง 20 cm ที่ผลิตตามมาตรฐาน มอก. 737-2549 มีกำลังที่จุดประลัยเท่ากับ 4,275 kg/cm^2 ค่าหน่วยการยืดตัวสูงสุด $_{su}$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 1,961,538 kg/cm^2



รูปที่ 8 การติดตั้งผนังก่อนการทดสอบ



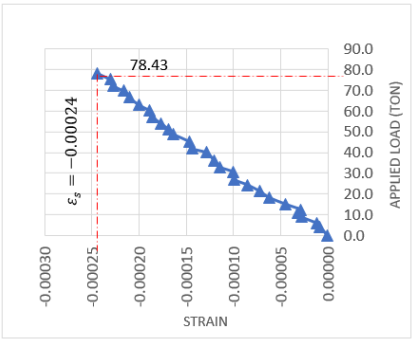
รูปที่ 9 ลักษณะการจับยึดผนังก่อนการทดสอบ

4.5 ผลการทดสอบ

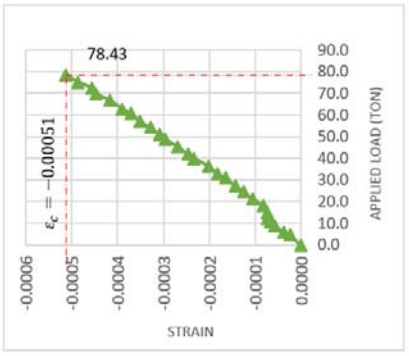
4.5.1 ผนัง CW

จากการทดสอบเมื่อให้น้ำหนักบรรทุกพบว่าผนังมีการโก่งตัวแต่ไม่เกิดรอยร้าวจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 78.43 ตัน ผนังจึงวิบัติโดยเป็นการวิบัติแบบโก่งเดาะ (Buckling Failure) ในทันทีทันใดจึงสิ้นสุดการทดสอบ โดยค่าเฉลี่ย Strain gauge หมายเลข GS16 GS17 และ GS18 ที่ติดตั้งที่เหล็กไวร์เมชบริเวณกึ่งกลางผนังขณะวิบัติเท่ากับ

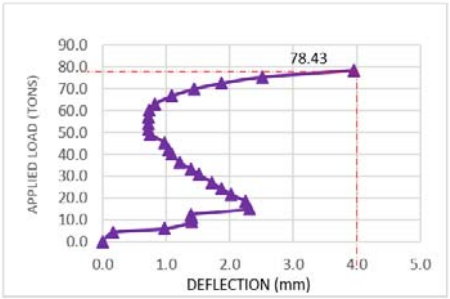
$_s$ ดังในรูปที่ 10 และที่ผนังคอนกรีตด้านรับแรงอัดมีค่า Strain เฉลี่ยขณะวิบัติเท่ากับ $_c$ จากค่าเฉลี่ย Strain gauge หมายเลข GC29 GC30 และ GC31 ดังในรูปที่ 11 ส่วนการโก่งตัวสูงสุดที่กลางผนังเท่ากับ 4 mm ดังในรูปที่ 12 จากรูปลักษณะเส้นกราฟมีการสลับทิศ อาจเป็นเพราะการจับยึดชิ้นงานด้านบนและด้านล่างจะมีการให้ตัวของ Bolt-nut สังเกตได้จากช่วงระยะแรง P =0 – 5 ตัน ซึ่งผนังรับแรง P ทำให้เกิดการโก่งตัวหลังจากนั้นอุปกรณ์จับยึดมีการคลายตัวทำให้ค่าการโก่งตัวลดลง จนเมื่อแรง P เท่ากับ 50 ตัน (สุดการคลายตัวของเกลียว Bolt-nut) ทำให้เกิดค่าการโก่งตัวจนผนังวิบัติ แต่เนื่องจากในผนัง CW จะใช้กำลังของผนังในการรายงานผลและสรุปในส่วนนี้การโก่งตัวจึงไม่ได้นำไปใช้ ส่วนในผนัง WO ได้ทำการแก้ไขโดยมีการขันเกลียว Bolt-nut ที่มากพอที่จะไม่เกิดการคลายตัว



รูปที่ 10 ค่าเฉลี่ย Strain ที่ติดตั้งที่เหล็กเสริมในผนัง CW



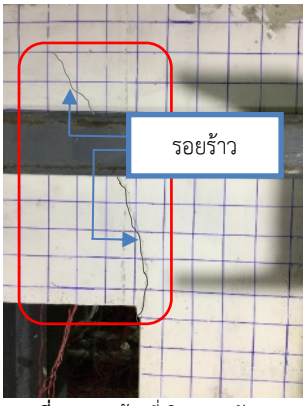
รูปที่ 11 ค่าเฉลี่ย Strain ที่ติดตั้งที่ผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดในผนัง CW



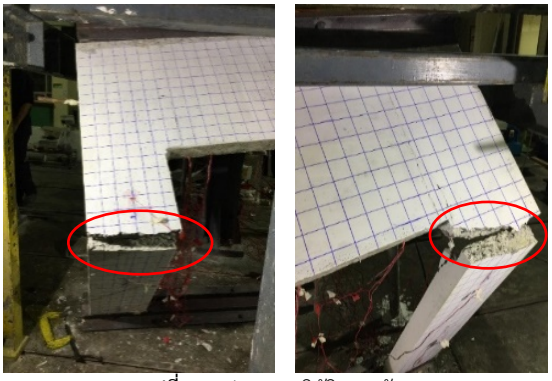
รูปที่ 12 แสดงค่าการโก่งตัว (Deflection) ของผนัง CW

4.5.2 ผนัง WO

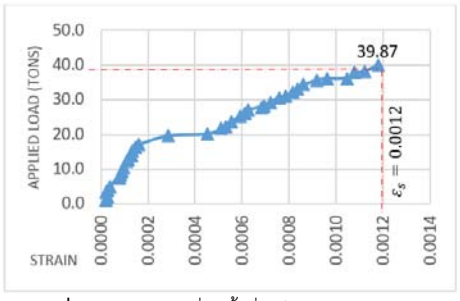
จากการทดสอบพบ first crack ที่แรงกด 27 ตัน บริเวณมุมบนด้านขวาของช่องเปิด ขึ้นไปในแนวดิ่งและค่อยๆเอียงเข้าหาบริเวณกึ่งกลางของยอดบนสุดของผนังและรอยร้าวปรากฏชัดเจนมากขึ้นเมื่อมีแรงกดที่เพิ่มขึ้นดังในรูปที่ 13 เมื่อเพิ่มแรงกดถึง 39.87 ตัน ผนังจึงเกิดการวิบัติโดยผนังก็เกิดการวิบัติแบบแรงดัดโดยแรงอัดเป็นหลักที่บริเวณขาทั้งสองด้านของช่องเปิด จึงสิ้นสุดการทดสอบดังในรูปที่ 14 โดยค่า Strain ขณะวิบัติ ณ GS15 มีค่าเท่ากับ $_s$ ดังในรูปที่ 15 และที่ผนังคอนกรีตด้านรับแรงอัดมีค่า Strain ขณะวิบัติเท่ากับ $_c$ จาก Strain gauge หมายเลข GC35 ดังในรูปที่ 16 และการโก่งตัวสูงสุดของผนัง WO มีค่าเท่ากับ 10.9 mm ดังในรูปที่ 17



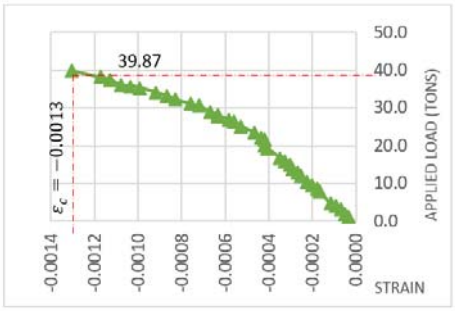
รูปที่ 13 รอยร้าวที่เกิดของผนัง WO



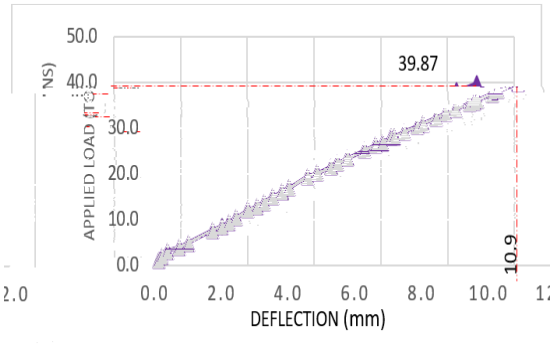
รูปที่ 14 รูปแบบการวิบัติของผนัง WO



รูปที่ 15 ค่า Strain ที่ติดตั้งที่เหล็กเสริมในผนัง WO



รูปที่ 16 ค่า Strain ที่ติดตั้งที่ผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดในผนัง CW



รูปที่ 17 ค่าการโก่งตัว (Deflection) ของผนัง WO

5. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบผนัง CW เกิดการวิบัติแบบ โก่งเดาะ (Buckling Failure) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลหน่วยการหดตัวของคอนกรีตและเหล็กที่วัดได้ กล่าวคือขณะที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดนั้นหน่วยการหดตัวในคอนกรีตของ GC29 GC30 และ GC31 เกิดเท่ากับ $_c$ ซึ่งยังไม่ถึงหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตขณะวิบัติที่ได้จากการทดสอบลูกปูนชุดที่ 1 ($_{cu}$) นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ภายใต้แรงอัดซึ่งดูได้จากหน่วยการหดตัวของเหล็กจาก GS16 GS17 และ GS18 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $_s$ เปรียบเทียบกับผนัง WO ซึ่งวิบัติโดยแรงดัดแบบอัดเป็นหลักที่ขณะวิบัติจะมีหน่วยการยืดตัวในเหล็กจาก GS15 เท่ากับ เทียบเท่าหน่วยแรงดึง 2,350 kg/cm^2 ยังไม่ถึงจุดคราก ขณะที่ Strain สูงสุดที่เกิดจาก GC35 มีค่าเท่ากับ ซึ่งมีค่ามากกว่าหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตขณะวิบัติที่ได้จากการทดสอบลูกปูนชุดที่ 2 ($_{cu}$) จึงสรุปได้ว่าเป็นการวิบัติโดยแรงดัดแบบ Compression control

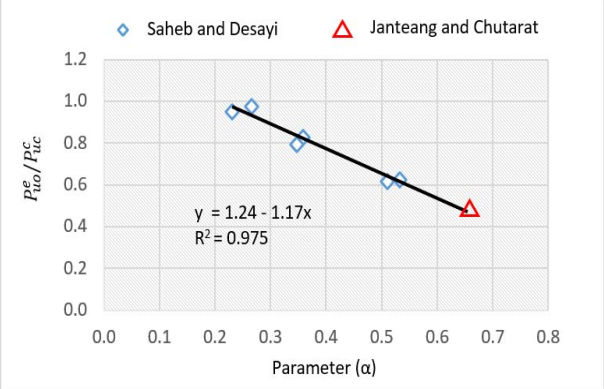
จากผลการทดสอบพบว่าผนัง CW สามารถรับกำลังที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 78.43 ตัน แต่เมื่อคำนวณตามสมการของ ACI Code [1], AS Code [2] และงานวิจัยของ Saheb and Desayi [3] ได้กำลังเท่ากับ 80.33 ตัน 67.34 ตัน และ 90.74 ตัน เท่ากับมีความคลาดเคลื่อน 2.4%, 14.1% และ 15.7% ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีของผนัง CW

	Experiment	ACI 318-19 (Eq.1)	AS-3600-2009 (Eq.2)	Saheb and Desayi (1990) (Eq.4)
Load capacity (tons)	78.43	80.33	67.34	90.74
	-	2.4	14.1	15.7

ดังนั้นจากผลการทดสอบนี้จึงสรุปได้ว่าสมการที่ใช้ทำนายกำลังผนังที่ไม่มีช่องเปิดที่ใช้งานได้ดีที่สุด คือมาตรฐาน ACI 318-19 [1] ซึ่งได้จากสมการที่ 1

เนื่องจากการหล่อผนังทั้ง 2 ชิ้น เป็นการเทคอนกรีตคนละครั้งทำให้ f_c ของผนัง CW และ WO มีค่าต่างกันคือ 306 และ 286 kg/cm^2 ตามลำดับ ดังนั้นในการพิจารณาผลของช่องเปิดจึงต้องคำนวณกำลังผนังทึบที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 286 kg/cm^2 ซึ่งคำนวณตามมาตรฐาน ACI Code [1] ได้กำลังเท่ากับ 75.08 ตัน จากผลการทดลองพบว่าผนัง WO รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ 39.87 ตัน เท่ากับกำลังลดลง 47% แต่ค่าทางทฤษฎีที่เสนอโดย Saheb and Desayi [3] สามารถคำนวณกำลังของผนังที่มีช่องเปิดได้เท่ากับ 36.91 ตัน โดยมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบอยู่ที่ 7.4% ซึ่งยังมีค่าที่สูง เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนนี้บ



รูปที่ 18 กราฟที่ได้จากการรวมผลการทดสอบ

$$P_{uo}^e \qquad P_{uc}^c \qquad (6)$$

6. สรุปผลการทดสอบ

1. ผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่ไม่มีช่องเปิดสามารถทำนายกำลังได้จากสมการของ ACI Code [1] มีความคลาดเคลื่อนเพียง 2.4% ดังนั้นการคำนวณกำลังของผนังที่ไม่มีช่องเปิดสามารถใช้มาตรฐานของ ACI ในการคำนวณกำลังของผนังทึบได้อย่างเหมาะสม

2. ผนังคอนกรีตรับน้ำหนักที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มากถึง 45% สามารถรับกำลังได้ 39.87 ตัน หรือมีความสามารถในการรับกำลังลดลงเท่ากับ 47% เมื่อเทียบกับผนังที่ไม่มีช่องเปิด

3. เสนอสมการทำนายกำลังผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่หรือมีขนาด 45% โดยปรับแก้ Empirical formula ซึ่งใช้ข้อมูลจากทางผู้วิจัยและของ Saheb and Desayi [3] ได้สมการ P_{uo}^e P_{uc}^c ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเพียง 2.3%

7. ข้อเสนอแนะ

ในประเทศไทยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจาะช่องเปิดในผนังคอนกรีตรับแรงถือว่ามีน้อยมากเมื่อเทียบกับงานก่อสร้างที่ใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่มีอยู่แพร่หลาย ในงานวิจัยนี้จึงเป็นจุดสำคัญในการต่อยอดของการพัฒนางานวิจัยในผนังคอนกรีตรับแรงสำเร็จรูปในด้านต่างๆ อันได้แก่ การหากำลังของผนังที่เจาะช่องเปิดในรูปแบบต่างๆ, การเพิ่มสมรรถนะของผนังที่ไม่รับแรงให้สามารถรับแรงได้, การพัฒนาการเสริมกำลังของผนังคอนกรีตที่เจาะช่องเปิดในรูปแบบวัสดุผสมเพื่อเพิ่มค่า Stiffness ให้มากขึ้น สิ่งเหล่านี้มีความสำคัญต่อการพัฒนาด้านโครงสร้างผนังคอนกรีตสำเร็จรูป ซึ่งผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยชิ้นนี้จะจุดประกายความก้าวหน้าของนักวิจัยที่สนใจต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆมาโดยตลอด ขอขอบคุณ Smart and Bright Co.,Ltd. ที่ให้การสนับสนุนการทดสอบ และ Asian Institute of Technology ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือทดสอบรวมทั้งบุคลากรจนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

9. เอกสารอ้างอิง

[1] ACI318-19 (2019). Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, USA.

[2] AS3600-2009 (2009). Concrete Structures, Standards Australia, Sydney, Australia.

[3] Saheb, SM., Desayi, P. (1990). Ultimate strength of RC wall panels with openings. J. Struct. Eng., 116(6):1565–77.

[4] Fragomeni, S., Doh, J.H., and Lee, D.J. (2012). Behaviour of axially loaded concrete wall panels with openings: An experimental study. Advances in Structural Engineering, 15(8), 1345-1358.

[5] Popescu, C., Sas, G., Sabau, C., and Blanksvärd, T. (2016). Effect of cut-out openings on the axial strength of concrete walls. J. Struct. Eng. 142 (11): 04016100.

[6] Lima, M.M., Doh, J.H., and Hadi, M.N.S. (2019). *Experimental study on RC walls with opening strengthened by Externally Bonded CFRP*. J. Compos. Constr. 23 (2): 04016106.

[7] Doh, J.H., Fragomeni, S., Loo, Y.C., and Lee, D.J. (2006). Design formula for walls with openings. M.S. thesis, Griffith University, Australia

[8] Doh, J.H., Loo, Y.C., and Fragomeni, S. (2010). Concrete walls with and without openings supported on three sides. In incorporating sustainable practice in mechanics and structures of materials, 209–214.

[9] Hatami, S., Abdullah, R., and Marsono, A.K. (2014). Parametric Study of Concrete Load Bearing Wall with Opening Based on Stress Criterion. J. Teknologi (Sciences & Engineering) 69:3 (2 014), 119–124