

กำลังของผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่

เลิศภพ จันทรเที่ยง^{1*}, ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

Received: 7 April 2022

Revised: 14 December 2022

Accepted: 15 December 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงกำลังของผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ โดยการย่อขนาดผนังให้เหลือกำลังเท่ากับ 1/3 ของกำลังรับน้ำหนักจริงแล้วทำการทดสอบ ขึ้นทดสอบมีขนาด กว้าง 175 ซม. สูง 175 ซม. และหนา 7 ซม. จำนวน 2 ชิ้น โดยชิ้นที่หนึ่งเป็นผนังทึบ ชิ้นที่สองมีช่องเปิดขนาด 45% ทดสอบโดยการให้น้ำหนักในแนวตั้งแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอตลอดความยาวผนัง และให้แรงกระทำเอียงศูนย์เท่ากับ 1/6 ของความหนา ผลการทดสอบพบว่าผนังที่ไม่มีช่องเปิดรับกำลังได้ 78.43 ตัน โดยวิบัติแบบโก่งเดาะ ซึ่งมีค่าความแตกต่างจากมาตรฐานสหรัฐอเมริกาและออสเตรเลีย เท่ากับ 2.4% และ 14.1% ตามลำดับ ส่วนผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่วิบัติเป็นแบบแรงอัดเป็นหลักและมีความสามารถในการรับน้ำหนักลดลง 47% และเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของผนังที่มีช่องเปิด โดยคำนวณจากสมการที่ถูกพัฒนาที่มีในปัจจุบันซึ่งจำกัดขนาดช่องเปิดไว้เพียง 27% พบว่ามีความแตกต่างจากการทดสอบ 7.4% จากสมการนี้ทางผู้วิจัยได้พัฒนาเพื่อทำนายกำลังผนังคอนกรีตรับน้ำหนักที่มีช่องเปิดใหญ่เท่ากับ 45% และทำให้มีความแตกต่างน้อยลงเหลือ 2.3% ซึ่งสามารถใช้ในการทำนายกำลังของผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ในอนาคตได้

คำสำคัญ: กำลังของผนังรับน้ำหนัก ผนังคอนกรีตสำเร็จรูป กำลังของผนังที่มีช่องเปิด ช่องเปิดในผนัง ช่องเปิดขนาดใหญ่

* ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: Lertpob_1699@hotmail.co.th

Strength of Precast Concrete Bearing Walls with Large Opening

Lertpob Janteang^{1,*}, Nuttawat Chutarat²

^{1,2}Civil Engineering and Urban Development School of Engineering,
Faculty of Engineering, Sripatum University

Received: 7 April 2022

Revised: 14 December 2022

Accepted: 15 December 2022

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 ACI and AS 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 was found to be 7.4% different. The discrepancy may result that the theoretical value 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 both of equations that are currently and 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: The Strength of The Load-Bearing Wall, Precast Concrete Wall, Strength of Walls with Openings, Opening in The Wall, Large Opening

* Corresponding Author; E-mail: Lertpob_1699@hotmail.co.th

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประชากรในเมืองใหญ่ๆ มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ ส่งผลให้ความต้องการที่อยู่อาศัยเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพื่อความรวดเร็วในการก่อสร้างอุตสาหกรรมงานก่อสร้างได้มีการเลือกใช้วัสดุโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป (Pre-Cast) มาเป็นระบบในการก่อสร้างและติดตั้ง ยกตัวอย่าง เช่น ผนังคอนกรีตสำเร็จรูป คานคอนกรีตสำเร็จรูป และเสาคอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น (Fragomeni et al., 2012) เนื่องจากโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปนี้มีข้อดี เช่น ประหยัดเวลาในการก่อสร้างเพราะชิ้นส่วนสามารถยกประกอบติดตั้งได้ สามารถคำนวณปริมาณวัสดุได้อย่างแม่นยำ สามารถควบคุมคุณภาพการผลิตได้ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ดีชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปก็มีข้อจำกัด เพราะชิ้นส่วนแต่ละชิ้นได้มีการออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยเฉพาะกล่าวคือ ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นได้มีการคำนวณ ออกแบบ การรับกำลังตามวัตถุประสงค์ของวิศวกรผู้ออกแบบ ทำให้เมื่อมีการติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูปในอาคารจะไม่สามารถดัดแปลงหรือเปลี่ยนรูปแบบการติดตั้งได้ (Popescu et al., 2016)

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงผนังคอนกรีตสำเร็จรูปในระบบผนังทางเดียว (One-Way Walls) (Saheb and Desayi, 1990) ที่มีการจำลองการเจาะช่องเปิดขนาดใหญ่ซึ่งคิดเป็น 45% ของพื้นที่ผนังโดยอ้างอิงจากผนังแบ่งหน่วยการใช้งานของอาคารที่พักอาศัย 2 ชั้นเพื่อให้สองหน่วยที่พักที่ติดกันใช้งานร่วมกันได้ โดยพิจารณาที่ผนังชั้นที่ 1 ซึ่งเป็นผนังคอนกรีตสำเร็จรูปปรับแรงในแนวดิ่งเพราะในผนังในส่วนนี้จะรับน้ำหนักที่กระทำจากชั้นบนจึงเป็นจุดที่จะใช้พิจารณาในการทดสอบ ทางผู้วิจัยคาดว่างานวิจัย “กำลังของผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่” นี้จะเป็นจุดสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมงานก่อสร้าง ในระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษากำลังของผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปเนื่องจากผลของการเจาะช่องเปิดสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ ณ บริเวณกึ่งกลางความยาวผนัง
2. สร้างสมการทำนายกำลังในผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่เจาะช่องเปิดขนาดใหญ่

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่ใช้ในงานนี้จะเป็นทฤษฎีที่ว่าด้วยกำลังรับน้ำหนักของผนังที่ไม่มีช่องเปิดซึ่งกล่าวไว้ในมาตรฐาน ACI Code และมาตรฐาน AS Code ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเป็นงานวิจัยที่แสดงผลของการทดสอบผนังที่มีช่องเปิดและไม่มีช่องเปิด รายละเอียดดังแสดงดังต่อไปนี้

1. มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

การหาลำดับผนังคอนกรีตรับแรงซึ่งในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงมาตรฐานของ ACI 318-19 และ AS-3600-2009 โดยการคำนวณกำลังผนังคอนกรีตเสริมเหล็กที่พิจารณาตาม ACI ดังสมการที่ 1

$$\phi P_{nw} = 0.55 \phi f_c A_g \left[1 - \left(\frac{k l_c}{32 h} \right)^2 \right] \quad (1)$$

กำหนดให้ P_{nw} คือ Nominal Strength หรือ กำลังระบุ (kg), A_g คือ เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของผนัง $= h l_w$

h คือ ความหนาของผนัง (cm), l_w คือ ความยาวของผนังในแนวนอน (cm)

l_c คือ ความสูงประสิทธิภาพของผนัง (cm), ϕ คือ ตัวคูณลดกำลัง, k คือ ตัวคูณประกอบความสูงประสิทธิภาพของผนัง

f'_c คือ กำลังรับแรงอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน (kg/cm^2)

ในส่วนถัดมาจะเป็นการคำนวณกำลังของผนังรับแรงตามแนวดิ่งโดยมาตรฐานของ AS-3600-2009 จะมีการพิจารณาผลของระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำ (e) โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลางวัดจากศูนย์กลางความหนาของผนัง แต่ทั้งนี้ระยะเยื้องศูนย์กลางต้องไม่เกินกว่าหนึ่งในหกของความหนาผนัง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

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

กำหนดให้ N_u คือ กำลังรับแรงของผนังในแนวดิ่ง (N/mm), t_w คือ ความหนาของผนังคอนกรีต (mm), e คือ ระยะเยื้องศูนย์กลางโดยวัดจากศูนย์กลางความหนาของผนัง (mm) โดยระยะเยื้องศูนย์กลางจะต้องไม่น้อยกว่า $0.05 t_w$, f'_c คือ ค่ากำลังรับแรงอัดระบุของคอนกรีต (N/mm^2), H_{we} คือ ความสูงประสิทธิภาพของผนัง (mm) $= k H_w$, $e_a = H_{we}^2 / (2500 t_w)$, $\phi = 0.6$, H_w คือ ความสูงของผนัง, L คือ ความยาวของผนัง

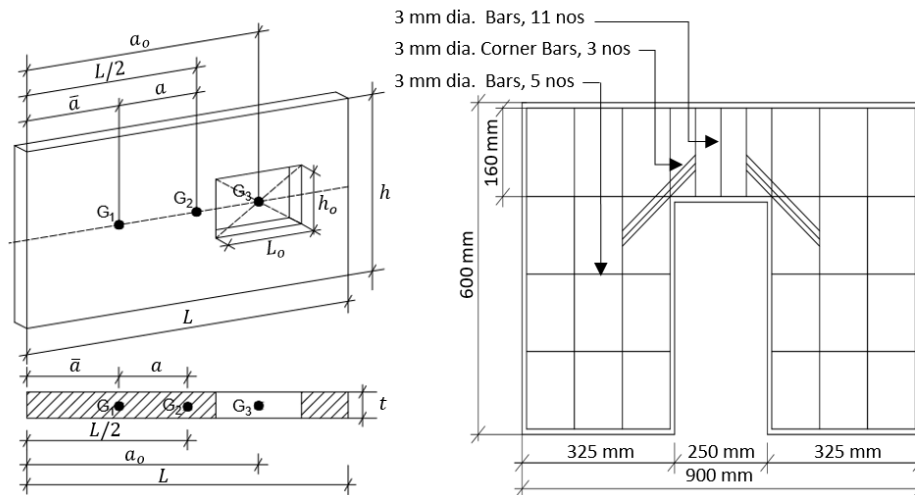
ในระบบผนังทางเดียว $k = 0.75$ (เมื่อถูกจำกัดการหมุนด้านบนและด้านล่างของผนัง)
 $k = 1.0$ (เมื่อไม่ถูกจำกัดการหมุนด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน)

ระบบผนังสองทางถูกค้ำยัน 3 ด้าน $k = \frac{1}{1 + \left(\frac{H_w}{3L}\right)^2} \geq 0.3$

ระบบผนังสองทางถูกค้ำยัน 4 ด้าน $k = \frac{1}{1 + \left(\frac{H_w}{L}\right)^2}$ (สำหรับ $H_w \leq L$), $k = \frac{L}{2H_w}$ (สำหรับ $H_w > L$)

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Saheb and Desayi, 1990) ได้ทดสอบผนังทั้งหมด 12 ชิ้น โดยผนังมีรูปแบบของช่องเปิดที่แตกต่างกัน 6 โดยการคำนวณพิจารณาจากตัวแปรใน ภาพที่ 1 ซึ่งแบบแยกเป็น แบบ One-way action 6 ชิ้น และ Two-way action 6 ชิ้น จากการทดสอบรอยร้าวที่เกิดขึ้นของผนัง one-way action เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกอยู่ระหว่าง 33% - 72% ของกำลังประลัย รอยร้าวที่เกิดขึ้นของผนัง two-way action เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกอยู่ระหว่าง 34% - 80% ของกำลังประลัย ความเครียดที่ผิวหน้าและการโก่งตัวทางด้านข้างพบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการใช้น้ำหนักเพิ่มเป็น 60% - 70% ของน้ำหนักประลัยสูงสุดของชิ้นทดสอบ และพบว่าผนังแบบ two-way action มีประสิทธิภาพในการรับแรงที่มากกว่าแบบ one-way action และได้เสนอค่า k จากการทดสอบแบบ one-way action คือ $k_1 = 1.25$ และ $k_2 = 1.22$ แสดงในสมการที่ 3 พร้อมทั้งเสนอค่ากำลังระบุของผนังที่บีบ (P_{uc}^c) ดังสมการที่ 4 (Popescu et al., 2016) ได้ทำการทดสอบผนัง



ภาพที่ 1 แสดงตัวแปรของผนังคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด Saheb และ Desayi (1990)

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

กำหนดให้ P_{uo}^c คือ กำลังของผนังที่มีช่องเปิดจากการคำนวณ (kg), P_{uc}^c คือ กำลังของผนังทึบ (kg)

$$\alpha = \frac{A_0}{A} + \frac{a}{L}, \quad A_0 = L_0 t, \quad A = L t, \quad a = \left[\left(\frac{L}{2} - \bar{a} \right) \right]$$

$$\bar{a} = [(L^2 t / 2 - L_0 t a_0) / (L t - L_0 t)]$$

โดยที่ กำลังของผนังทึบ (P_{uc}^c) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

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

คอนกรีตรับน้ำหนักจำนวน 3 ชั้นทดสอบ คือ ผนังทึบ (Solid wall) ผนังที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก (Wall with small opening) ผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ (Wall with large opening) ผลของการลดขนาดหน้าตัด 25% และ 40% ของพื้นที่ผนังโดยการตัดช่องเปิดนำไปสู่การรับน้ำหนักที่ลดลง 36% และ 50% ตามลำดับ ทั้งหมดทั้งมวลขนาดของช่องเปิดที่มีขนาดเล็กจะแข็งแรงกว่าช่องเปิดที่มีขนาดใหญ่ (Doh et al., 2006) ได้ดำเนินการทดสอบผนังคอนกรีต 12 ชั้นที่มีช่องเปิดในพฤติกรรม One-way และ Two-way action โดยมีขนาดช่องเปิดไม่เกิน 16% และได้พัฒนาสมการของน้ำหนักประลัยซึ่งเปรียบเทียบกับผลการทดสอบมีค่า $R^2=0.985$ สำหรับผนังคอนกรีตที่มีช่องเปิดโดยมีอัตราส่วนความละเอียดเท่ากับ 30 (Doh et al., 2010) ได้เสนอผลจากการศึกษาการทดสอบผนังคอนกรีตรับกำลัง 6 ชั้นโดยใช้ 1/2 มาตรฐานจริงในผนังคอนกรีตรับกำลังที่มีฐานรองรับ 3 ด้านจากผลการทดสอบ ช่องเปิดที่มีขนาดเล็กผนังจะมีกำลังประลัยที่มากกว่าช่องเปิดที่มีขนาดใหญ่, ช่องเปิดที่เอียงไปทางขวาใกล้กับผนังด้านที่ไม่มีฐานรองรับจะมีกำลังประลัยที่มากกว่าช่องเปิดที่เอียงไปทางซ้ายจากศูนย์กลาง (Fragomeni et al., 2012) ได้ศึกษาผนังคอนกรีตรับกำลังจำนวน 47 ตัวอย่างที่มีที่มีแรงกระทำเอียงศูนย์เท่ากับ $tw/6$ เป็นการทดสอบโดยใช้ 1/2 Scale โดยมีการกำหนดการทดสอบเป็น One-Way Action และ Two-way Action ซึ่งมีค่า Slenderness ratio 30,35,40 โดยทำการศึกษา รูปแบบของรอยร้าว รูปแบบการวิบัติ และการโก่งตัวเนื่องจากน้ำหนักโดยมีการทดสอบ

จนวิบัติ โดยมีการคำนวณกำลังตามมาตรฐาน Australian standard ในการออกแบบ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงน้ำหนักวิบัติที่ลดลงเมื่อมีช่องเปิดที่เพิ่มขึ้นจากหนึ่งช่องเป็นสองช่อง นอกจากนี้อัตราส่วนความแข็งแรงตามแนวแกนของผนัง One-way action และ Two-way action ค่อยๆ ลดลงเมื่ออัตราส่วนความขรุขระเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 40 (Hatami et al., 2014) ได้วิเคราะห์กำลังของผนังคอนกรีตโดยใช้โปรแกรม LUSAS เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของผนังที่มีช่องเปิดขนาดที่แตกต่างกันโดยมีพื้นที่คอนกรีตเหนือช่องเปิดที่แตกต่างกันคือ 20, 30, และ 40 cm จากแบบจำลอง ผนังมีการวิบัติบริเวณคอนกรีตเหนือช่องเปิดเสมือนคานซึ่งมีพื้นที่คอนกรีตค่อนข้างน้อยและได้เสนอสมการในการคำนวณกำลัง

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นได้ว่าการศึกษาการรับกำลังของผนังคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดที่มีขนาดเกิน 40% นั้นยังไม่มีการศึกษาและทดสอบ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาทางด้านการก่อสร้างจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

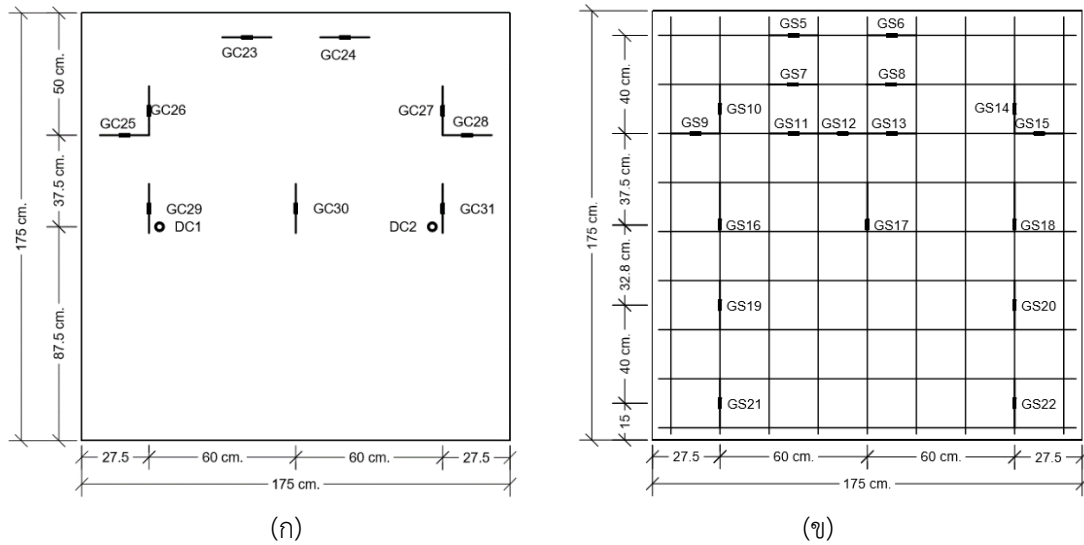
วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

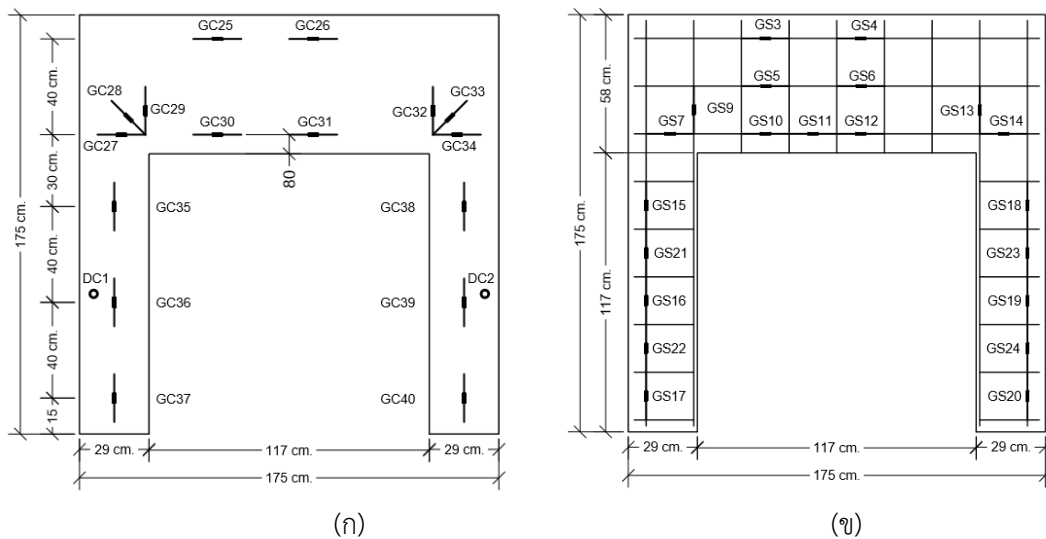
ในงานวิจัยนี้ใช้ผนังคอนกรีตรับน้ำหนัก (Bearing Wall) ทั้งหมด 2 ชั้นโดยลดขนาดเท่ากับ 1/3 ของกำลังประลัย โดยทั้งหมดมีพฤติกรรมเป็นผนังทางเดียว (one-way action) แบบไม่ถูกจำกัดการหมุนทั้ง 2 ด้าน มีขนาดเท่ากันทุกชั้น คือ ความยาว 175 เซนติเมตร ความสูง 175 เซนติเมตร และหนา 7 เซนติเมตร และเสริมด้วยเหล็กตะแกรงไวร์เมช (Wire mesh) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความหนาของผนัง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ระยะห่าง 20 เซนติเมตร ที่ผลิตตามมาตรฐาน มอก. 737-2549 ซึ่งตามข้อกำหนด ACI 318-19 ระบุว่าปริมาณเหล็กเสริมไวร์เมชต่อพื้นที่หน้าตัดคอนกรีต (ρ) สำหรับเหล็กตามแนวดิ่งและเหล็กตามแนวขวางต้องไม่น้อยกว่า 0.001 ในผนังหล่อสำเร็จรูปชั้นที่ 1 ออกแบบเป็นผนังควบคุมซึ่งจะเป็นผนังทึบ (Control Wall), CW ชั้นที่ 2 เจาะช่องเปิดขนาด 45 เปอร์เซ็นต์บริเวณกึ่งกลางผนัง (Wall with Opening), WO เนื่องจากผนังชั้นนี้จำลองเสมือนว่าเป็นผนังทึบที่เจาะช่องเปิดฉะนั้นจึงไม่พิจารณาเหล็กเสริมพิเศษที่มุมช่องเปิด

การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่า

อุปกรณ์วัดค่าประกอบด้วย Strain gauges ที่ใช้วัดค่าหน่วยการยืดหดตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริม และ Dial gauges ใช้วัดค่าการโก่งตัว ซึ่งในผนัง CW มีการติดตั้ง Strain gauges ที่ผิวคอนกรีตจำนวน 9 ตัว ใช้สัญลักษณ์เป็น GC23-GC31 ดังแสดงในภาพที่ 2 (ก) ส่วนที่ติดตั้งที่เหล็กเสริมนั้นให้สัญลักษณ์เป็น GS5-GS22 ซึ่งมีจำนวน 18 ตัวดังแสดงในภาพที่ 2 (ข) ส่วน Dial gauges ใช้วัดระยะการโก่งตัวของผนังจำนวน 2 ตัวกำหนดเป็น DC1 และ DC2 โดยจะติดตั้งที่กึ่งกลางความสูงของผนังดังแสดงในภาพที่ 2 (ก) ในทำนองเดียวกันในผนัง WO มีการติดตั้ง Strain gauge ผิวคอนกรีตจำนวน 16 ตัวจะใช้สัญลักษณ์เป็น GC25-GC40 ดังแสดงในภาพที่ 3 (ก) ส่วนที่ติดตั้งที่เหล็กเสริมนั้นจะให้สัญลักษณ์เป็น GS3-GS20 มีจำนวน 21 ตัวดังแสดงในภาพที่ 3 (ข) ส่วน Dial gauges มีจำนวน 2 ตัวจะกำหนดเป็น DC1 และ DC2 โดยจะติดตั้งที่กึ่งกลางความสูงของช่องเปิดดังแสดงในภาพที่ 3 (ก)



ภาพที่ 2 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าในผนัง CW, (ก) ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าที่ผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัด, (ข) ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าที่เหล็กเสริม



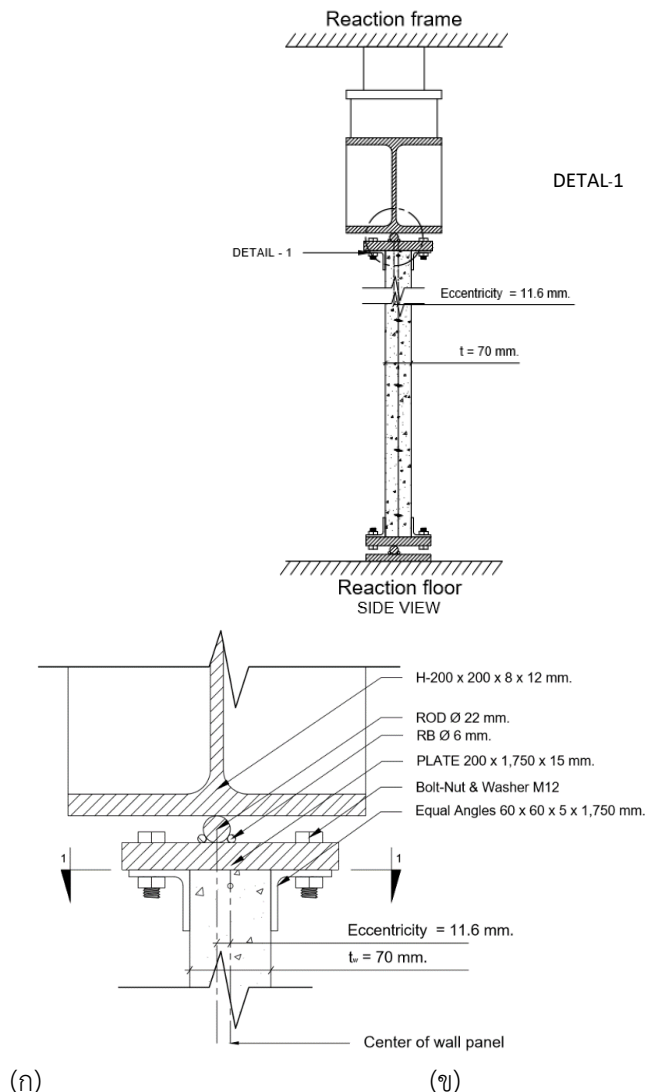
ภาพที่ 3 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าในผนัง WO, (ก) ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าที่ผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัด, (ข) ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าที่เหล็กเสริม

การทดสอบ

นำผนังขึ้นติดตั้งเพื่อเตรียมการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) โดยให้แรงกระทำเป็นบริเวณตามความยาวของผนัง (Uniformly Distributed Line Load) ซึ่งให้แรงกระทำเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ $1/6$ ของความหนาของผนัง ดังแสดงในภาพที่ 4 (ข) พร้อมทั้งติดตั้ง Dial gauges เพื่อวัดการโก่งตัวของผนังและตรวจสอบระบบส่งสัญญาณของเครื่องอ่านค่าที่ต่อเชื่อมกับกับอุปกรณ์วัดค่า ดังแสดงในภาพที่ 5 และทำการทดสอบผนังโดยการให้น้ำบรรทุกกระทำต่อผนังเพิ่มน้ำหนักทีละ 1,000 kg พร้อมบันทึกค่า การโก่งตัวของผนังและค่า Strain ในเหล็กเสริมและคอนกรีตระหว่างที่ให้น้ำหนักบรรทุกจะบันทึกรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงน้ำหนักที่กระทำ ทดสอบจนกระทั่งผนังนั้นวิบัติ

วัสดุที่ใช้ในงานทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัดที่ 28 วันโดยมีค่ากำลังอัดระบุรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm ที่ออกแบบไว้เท่ากับ 240 kg/cm^2 ค่าการยุบตัวเท่ากับ $10 \pm 2.5 \text{ cm}$ ซึ่งในการทดสอบผนัง CW และผนัง WO มีค่า f_c เท่ากับ 306 kg/cm^2 (ลูกปูนชุดที่ 1) และ 286 kg/cm^2 (ลูกปูนชุดที่ 2) ตามลำดับ และหน่วยการหัดตัวสูงสุดของคอนกรีตขณะวิบัติ $\epsilon_{cu} = -0.0014$ และ -0.0012 ตามลำดับ (— หมายถึงหน่วยการหัดตัว) ส่วนเหล็กไวร์เมชมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 mm ระยะห่าง 20 cm ที่ผลิตตามมาตรฐาน มอก. 737-2549 มีกำลังที่จุดประลัยเท่ากับ $4,275 \text{ kg/cm}^2$ ค่าหน่วยการยืดตัวสูงสุด $\epsilon_{su} = 0.0023$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ $1,961,538 \text{ kg/cm}^2$



ภาพที่ 4 (ก) แสดงการติดตั้งขึ้นทดสอบ (ข) แสดงการจับยึดผนังในการทดสอบแบบเยื้องศูนย์

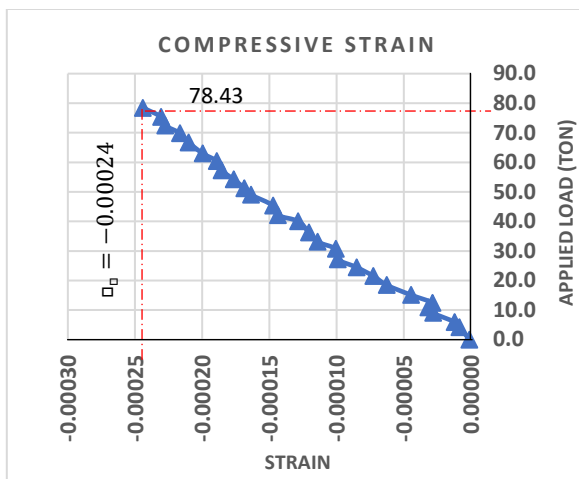


ภาพที่ 5 แสดงอุปกรณ์วัดค่าที่ถูกติดตั้ง

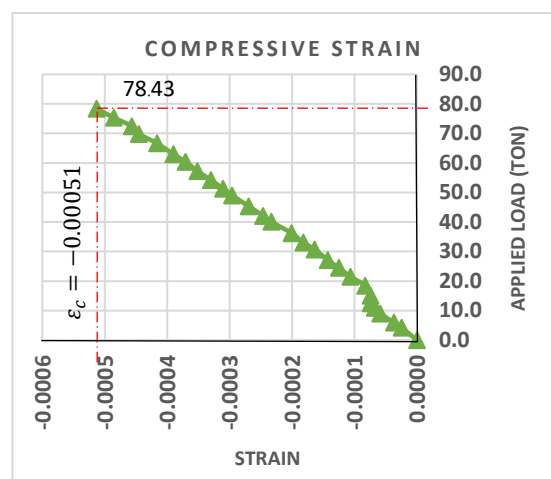
ผลการวิจัย

ผนัง CW

จากการทดสอบเมื่อให้น้ำหนักบรรทุกพบว่าผนังมีการโก่งตัวแต่ไม่เกิดรอยร้าวจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 78.43 ตัน ผนังจึงวิบัติโดยเป็นการวิบัติแบบโก่งเดาะ (Buckling Failure) ในทันทีทันใดจึงสิ้นสุดการทดสอบ โดยค่าเฉลี่ย Strain gauge หมายเลข GS16 GS17 และ GS18 ที่ติดตั้งที่เหล็กไวร์เมชบริเวณกึ่งกลางผนังขณะวิบัติเท่ากับ $\varepsilon_s = -0.00024$ ดังแสดงในภาพที่ 6 (ก) และที่ผนังคอนกรีตด้านรับแรงอัดมีค่า Strain เฉลี่ยขณะวิบัติเท่ากับ $\varepsilon_c = -0.00051$ จากค่าเฉลี่ย Strain gauge หมายเลข GC29 GC30 และ GC31 ดังแสดงในภาพที่ 6 (ข) ส่วนการโก่งตัวสูงสุดที่กลางผนังเท่ากับ 4 mm ดังแสดงในภาพที่ 7



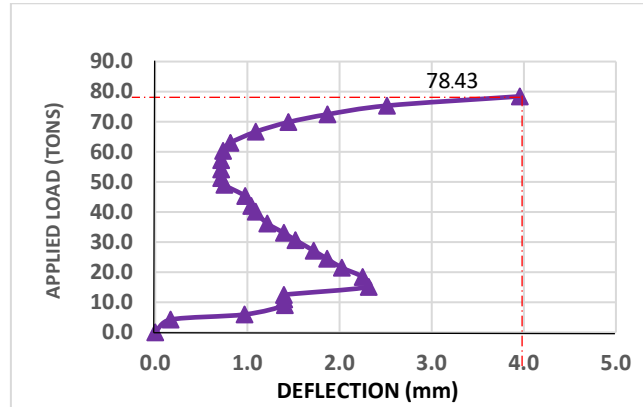
(ก)



(ข)

ภาพที่ 6 (ก) แสดงค่าเฉลี่ย Strain (GS16 GS17 GS18) ของไวร์เมชที่กึ่งกลางผนัง CW

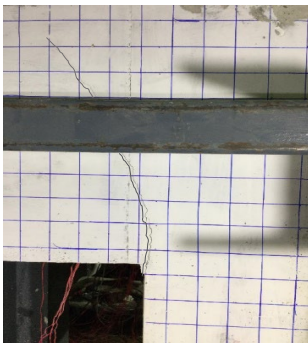
(ข) แสดงค่าเฉลี่ย Strain (GC29 GC30 GC31) ของคอนกรีตด้านรับแรงอัดที่กึ่งกลางผนัง CW



ภาพที่ 7 แสดงค่าการโก่งตัวด้านข้าง (Lateral Deflection) ของผนัง CW

ผนัง WO

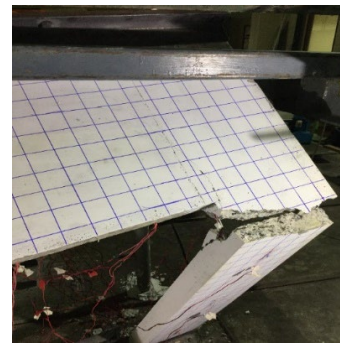
จากการทดสอบผนัง WO พบ first crack ที่แรงกด 27 ตัน บริเวณมุมบนด้านขวาของช่องเปิด ขึ้นไปในแนวตั้งและค่อยๆเอียงเข้าหาบริเวณกึ่งกลางของยอดบนสุดของผนัง เนื่องจากผนังไม่ได้ถูกออกแบบให้มีช่องเปิดจึงไม่มีเหล็กเสริมพิเศษรับแรงเฉือนที่มุม ทำให้เกิดรอยร้าวที่บริเวณมุมของช่องเปิดเนื่องจากแรงเฉือน



(ก)

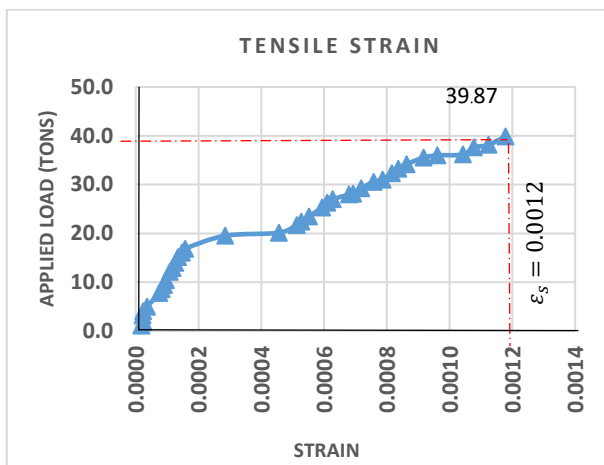


(ข)

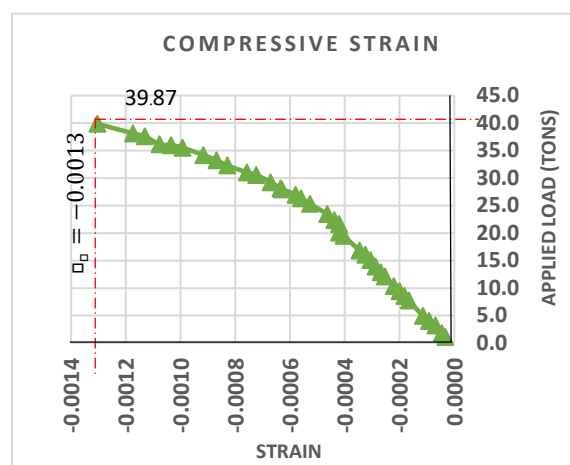


(ค)

ภาพที่ 8 (ก) แสดงรอยร้าวที่เกิดของผนัง WO, (ข)-(ค) แสดงลักษณะการวิบัติของผนัง WO



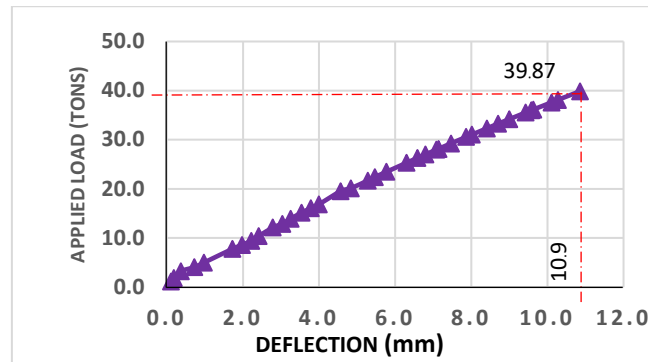
(ก)



(ข)

ภาพที่ 9 (ก) แสดงค่า Strain (GS15) ของไวร์เมชในผนัง WO, (ข) แสดงค่า Strain (GC35) ของคอนกรีตในผนัง WO ด้านรับแรงอัด

ร่วมกับแรงดัดที่เกิดจากการที่ผนังมีการโก่งตัว ทำให้อยู่ราวปรากฏชัดเจนมากขึ้นเมื่อมีแรงกดที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 8(ก) เมื่อเพิ่มแรงกดถึง 39.87 ตัน ผนังจึงเกิดการวิบัติโดยผนังก็เกิดการวิบัติเป็นแบบแรงอัดเป็นหลัก (Compression failure) ที่บริเวณขาทั้งสองด้านของช่องเปิด จึงสิ้นสุดการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 8(ข), (ค) โดยค่า Strain ขณะวิบัติ ณ GS15 มีค่าเท่ากับ $\varepsilon_s = 0.0012$ ดังแสดงในภาพที่ 9 (ก) และที่ผนังคอนกรีตด้านรับแรงอัดมีค่า Strain ขณะวิบัติเท่ากับ $\varepsilon_c = -0.0013$ จาก Strain gauge หมายเลข GC35 ดังแสดงในภาพที่ 9(ข) และการโก่งตัวสูงสุดของผนัง WO มีค่าเท่ากับ 10.9 mm ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แสดงค่าการโก่งตัวด้านข้าง (Lateral Deflection) ของผนัง WO

อภิปรายผล

จากการทดสอบผนัง CW เกิดการวิบัติแบบ โกงเดาะ (Buckling Failure) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลหน่วยการหดตัวของคอนกรีตและเหล็กที่วัดได้ กล่าวคือขณะที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดนั้นหน่วยการหดตัวเฉลี่ยในคอนกรีตของ GC29 GC30 และ GC31 เกิดเท่ากับ $\varepsilon_c = -0.00051$ ซึ่งยังไม่ถึงหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตขณะวิบัติที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกชุดที่ 1 ($\varepsilon_{cu} = -0.0014$) นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ภายใต้แรงอัดซึ่งดูได้จากหน่วยการหดตัวของเหล็กจาก GS16 GS17 และ GS18 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\varepsilon_s = -0.00024$ เปรียบเทียบกับผนัง WO ซึ่งวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลักที่ขณะวิบัติจะมีหน่วยการยืดตัวในเหล็กจาก GS15 เท่ากับ 0.0012 เทียบเท่าหน่วยแรงดึง 2,350 kg/cm² ยังไม่ถึงจุดคราก ขณะที่ Strain สูงสุดที่เกิดจาก GC35 มีค่าเท่ากับ -0.0013 ซึ่งมีค่ามากกว่าหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตขณะวิบัติที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกชุดที่ 2 ($\varepsilon_{cu} = -0.0012$) จึงสรุปได้ว่าเป็นการวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลัก (Compression failure)

จากผลการทดสอบพบว่าผนัง CW สามารถรับกำลังที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 78.43 ตัน แต่เมื่อคำนวณตามสมการของ ACI Code, AS Code และงานวิจัยของ (Saheb and Desayi, 1990) ได้กำลังเท่ากับ 80.33 ตัน 67.34 ตัน และ 90.74 ตัน เท่ากับมีความแตกต่างจากผลการทดสอบที่ 2.4%, 14.1% และ 15.7% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีของผนัง CW

	Experiment	ACI 318-19 Eq.1	AS-3600-2009 Eq.2	Saheb and Desayi Eq.4
Load capacity (P_{nw})	78.43	80.33	67.34	90.74
Different (%)	-	2.4	14.1	15.7

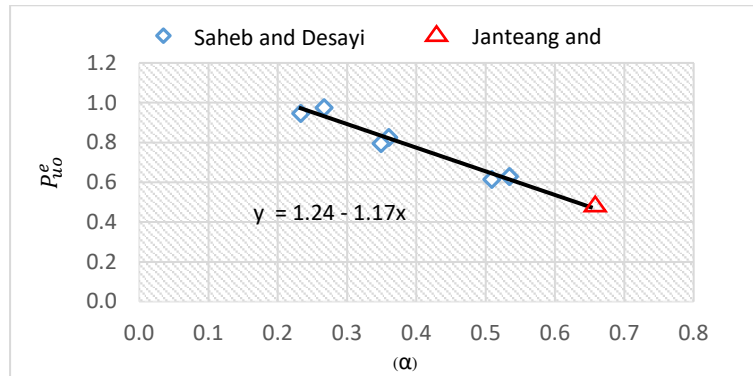
หมายเหตุ: (P_{nw}) คือ Nominal Strength หรือ กำลังระบุของผนัง (ton) โดยไม่ได้คูณตัวลดกำลัง (ϕ),

$k = 1$ เมื่อไม่มีการจำกัดการหมุนด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน

ดังนั้นจากผลการทดสอบนี้จึงสรุปได้ว่าสมการที่ใช้ทำนายกำลังผนังที่ไม่มีช่องเปิดที่ใช้งานได้ดีที่สุด คือ มาตรฐาน ACI 318-19 ซึ่งได้จากสมการที่ 1

เนื่องจากการหล่อผนังทั้ง 2 ชั้น เป็นการเทคอนกรีตไม่พร้อมกันทำให้ f_c ของผนัง CW และ WO มีค่าต่างกันคือ 306 และ 286 kg/cm² ตามลำดับ ดังนั้นในการพิจารณาผลของช่องเปิดจึงต้องคำนวณกำลังผนังที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 286 kg/cm² ซึ่งคำนวณตามมาตรฐาน ACI Code ได้กำลังเท่ากับ 75.08 ตัน จากผลการทดลองพบว่าผนัง WO รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ 39.87 ตัน เท่ากับกำลังลดลง 47% แต่ค่าทางทฤษฎีที่เสนอโดย (Saheb and Desayi, 1990) สามารถคำนวณกำลังของผนังที่มีช่องเปิดได้เท่ากับ 36.91 ตัน โดยมีความแตกต่างจากการทดสอบอยู่ที่ 7.4% ซึ่งยังมีค่าที่สูง เปรียบเทียบกับความต่างนี้อาจเป็นผลมาจากที่มาของสมการถูกสร้างจากขนาดของช่องเปิดที่ถูกจำกัดไว้ไม่เกิน 27% อย่างไรก็ตามทางผู้วิจัยได้ประมาณกำลังของผนังที่มีช่องเปิดขนาด 45% โดยใช้สมการที่ 1 กล่าวคือพิจารณาผนังบริเวณด้านข้างของช่องเปิด 1 ชั้นเสมือนกับเป็นผนังที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 29 cm และหนา 7 cm จากการคำนวณพบว่าเมื่อกำหนดค่า $l_c = 175$ cm (เท่ากับความสูงผนัง) และ $l_c = 117$ cm (เท่ากับความสูงช่องเปิด) ตามลำดับ ซึ่งคำนวณกำลังระบุได้เท่ากับ $P_{nw} = 12.44$ ตัน และ 23.22 ตัน ตามลำดับและมีความแตกต่างจากการทดสอบเท่ากับ 37.6% และ 16.5% ตามลำดับ โดยผนัง WO รับกำลังรับน้ำหนักจริงที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 39.87/2 หรือเท่ากับ 19.93 ตัน จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความต่างยังสูงทำให้การคำนวณกำลังโดยอาศัยสมการที่ 1 ยังไม่เพียงพอต่อการทำนายกำลังของผนัง WO

ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงได้เพิ่มเติมผลการทดสอบจากที่ได้ทดสอบมาซึ่งมีช่องเปิดขนาดใหญ่ถึง 45% และเสนอปรับแก้สมการ Empirical formula โดยเพิ่มผลการทดสอบของผู้วิจัยซึ่งเป็นผลของการทดสอบผนังที่มีช่องเปิดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นร่วมกับผลทดสอบของ (Saheb and Desayi, 1990) จากผลการทดสอบกำลังของผนังคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ (P_{uo}^e) สามารถสร้างความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างกำลังของผนังที่มีช่องเปิดที่ได้จากการทดสอบ (P_{uo}^e) ส่วนด้วยกำลังของผนังทึบ (P_{uc}^e) จะมีค่าเท่ากับ 0.469 และค่าความแข็งของหน้าตัด (α) เท่ากับ 0.668 ดังแสดงในภาพที่ 11 จากภาพซึ่งประกอบด้วยผลการทดสอบของ (Saheb and Desayi, 1990) จำนวน 6 จุด และจากทางผู้วิจัย 1 จุด สามารถสร้างสมการเพื่อทำนายกำลังผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่จากเดิม 27% เป็น 45% ได้ ซึ่งมีความแตกต่างจากการทดสอบเท่ากับ 2.3%



ภาพที่ 11 แสดงกราฟที่ได้จากการรวมผลการทดสอบ

สรุปผลการวิจัย

1. ผนังคอนกรีตรับน้ำหนักสำเร็จรูปที่ไม่มีช่องเปิดสามารถทำนายกำลังได้จากสมการของ ACI Code มีความแตกต่างจากผลการทดสอบที่ 2.4% ดังนั้นการคำนวณกำลังของผนังที่ไม่มีช่องเปิดสามารถใช้มาตรฐานของ ACI ในการคำนวณกำลังของผนังที่ปิดได้อย่างเหมาะสม
2. ผนังคอนกรีตรับน้ำหนักที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มากถึง 45% สามารถรับกำลังได้ 39.87 ตัน หรือมีความสามารถในการรับกำลังลดลงเท่ากับ 47% เมื่อเทียบกับผนังที่ไม่มีช่องเปิด
3. เสนอสมการทำนายกำลังผนังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่หรือมีขนาด 45% โดยปรับแก้ Empirical formula ซึ่งใช้ข้อมูลจากทางผู้วิจัยและของ Saheb and Desayi ได้สมการ $P_{uo} = (1.24 - 1.17 \alpha)P_{uc}$ ซึ่งมีความแตกต่างจากผลการทดสอบเพียง 2.3%

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

1.1 เนื่องจากการหาค่ากำลังของผนังที่มีช่องเปิดนั้นยังไม่มีมาตรฐานรองรับในการคำนวณฉะนั้นสมการที่ใช้คำนวณผนังที่มีช่องเปิดในงานวิจัยนี้จะใช้เพื่อประมาณค่าโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาและผลการทดสอบในงานวิจัยนี้เท่านั้น

1.2 จากสมการการคำนวณกำลังของผนังที่มีช่องเปิดในงานวิจัยนี้ได้จำกัดขนาดของช่องเปิดไว้ไม่เกิน 45%

2. ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

2.1 จากงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาการหาค่ากำลังของผนังที่เจาะช่องเปิดในรูปแบบต่างๆ หรือการพัฒนาการเสริมกำลังของผนังคอนกรีตที่เจาะช่องเปิดในรูปแบบวัสดุผสมเพื่อเพิ่มค่า Stiffness ให้มากขึ้น

2.2 จากค่าการโก่งตัวของผนังที่มีช่องเปิดสามารถนำไปพัฒนาการคำนวณกำลังของผนังโดยพิจารณาการโก่งตัวที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดและพิจารณาเสมือนเสารับแรงเยื้องศูนย์ที่มีความชะลูดก็อาจทำนายกำลังของผนังได้อีกรูปแบบหนึ่ง

กิตติกรรมประกาศ

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

เอกสารอ้างอิง

- ACI318-19. (2019). *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*. Detroit, USA: American Concrete Institute.
- AS3600-2009. (2009). *Concrete Structures, Standards Australia*, Sydney, Australia: Standards Association of Australia.
- Doh, J.H., Fragomeni, S., Loo, Y.C.; and Lee, D.J. (2006). Design formula for walls with openings. *Advances in Structural Engineering*, 9(1), 103-115.
- Doh, J.H., Loo, Y.C., and Fragomeni, S. (2010). Concrete walls with and without openings supported on three sides. *Advances in Structural Engineering*, 1-6.
- Fragomeni, S., Doh, J.H., and Lee, D.J. (2012). Behavior of axially loaded concrete wall panels with openings: An experimental study. *Advances in Structural Engineering*, 15(8), 1345-1358.
- 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), 119–124.
- 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.
- Popescu, C., Sas, G., Sabău, C., and Blanksvärd, T. (2016). Effect of cut-out openings on the axial strength of concrete walls. *J. Struct. Eng.*, 142(11), 04016100.
- Saheb, SM., Desayi, P. (1990). Ultimate strength of RC wall panels with openings. *J. Struct. Eng.*, 116(6), 1565–77.