

รหัสโครงการ SUT7-712-47-12-05



รายงานการวิจัย

การพัฒนสมการที่ใช้ในการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็ก
แบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดและแรงดัด
(Development of Design Equations for Mortarless Reinforced
Masonry Wall under Compression and Flexure)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-712-47-12-05



รายงานการวิจัย

การพัฒนาสมการที่ใช้ในการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็ก
แบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดและแรงดัด
(Development of Design Equations for Mortarless Reinforced
Masonry Wall under Compression and Flexure)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

สิทธิชัย แสงอาทิตย์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2547

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2547

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินโครงการวิจัย เรื่อง “การพัฒนาสมการที่ใช้ในการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดและแรงดัด” ได้รับการสนับสนุนงบประมาณโดยทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2547 ซึ่งได้รับการจัดสรรมาจากงบประมาณแผ่นดิน โดยผ่านการประเมินข้อเสนอโครงการจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นอย่างสูง นอกจากนี้แล้ว ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณนายสิทธิชัย เลิศวิชัย นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่ได้ช่วยเหลือในการทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่ออย่างขยันขันแข็งและอดทน สุดท้าย ขอขอบคุณในความอนุเคราะห์ของสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนา และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สิทธิชัย แสงอาทิตย์
หัวหน้าโครงการวิจัย
ตุลาคม 2547

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและแรงคัตของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ เปรียบเทียบค่าแรงสูงสุดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อที่ทดสอบได้กับค่าแรงที่ยอมให้ที่คำนวณได้จากของสมการออกแบบผนังวัสดุก่อของ American Concrete Institute ACI 530-92 และของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1005-18 และเพื่อพัฒนาสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบผนังดังกล่าว ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 ตัวแปรคือ อัตราส่วนเหล็กเสริม ความสูงของผนัง (ในกรณีทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน) ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (ในกรณีทดสอบแรงคัต) และรูปแบบการกรอกปูนกรอก จากการทดสอบพบว่า ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อมีพฤติกรรมในการรองรับแรงกดอัดในแนวแกนและแรงคัตในช่วงใช้งานเป็นแบบเชิงเส้นตรงและมีการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป สำหรับผนังรับแรงกดอัดในแนวแกนพบว่า สมการออกแบบควรอยู่ในรูป

$$P'_a = 0.225 f'_m A_n \left[1 - \left(\frac{h}{140r} \right)^2 \right] \quad \text{เมื่อ } \frac{h}{r} \leq 99$$

ซึ่งให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ระหว่าง 3.70 ถึง 5.95 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.78 และมีค่า COV เท่ากับ 0.21

ในกรณีของการทดสอบแรงคัตพบว่า หน่วยแรงคัตที่ยอมให้ของผนังในกรณีรับแรงคัตควรมีค่าเท่ากับหน่วยแรงคัตที่ยอมให้ของผนังในกรณีรับแรงกดอัด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.225 f'_m$ และสมการออกแบบของผนังดังกล่าวภายใต้แรงคัตยังคงอยู่ในรูปเดิม ซึ่งจะทำให้ผนังมีอัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ระหว่าง 2.36 ถึง 3.82 โดยมีค่าเฉลี่ย 2.82 และค่า COV เท่ากับ 0.17

Abstract

The objectives of this research are to study the behavior of mortarless reinforced concrete masonry wall subjected to axial compression and flexure, to compare the obtained ultimate loads with the allowable load, calculated by using design equations of American Concrete Institute ACI 530-92 and Engineering Institute of Thailand EIT 1005-18, and to develop the design equations for mortarless reinforced concrete masonry wall. The variables studied were the reinforcing steel ratios, the wall height (for axial compression test), the wall span (for flexural test) and the grouting patterns. From the tests, it was found that the mortarless reinforced concrete masonry wall had a linear behavior in the working range, both in axial compression and flexure and failed in progressive mode of failure. From the study, it was found that, the design equation for the mortarless reinforced concrete masonry wall subjected to axial compression should be in the form of

$$P'_a = 0.225 f'_m A_n \left[1 - \left(\frac{h}{140r} \right)^2 \right] \quad \text{when } \frac{h}{r} \leq 99$$

This equation gives the factor of safety of the wall in the range of 3.70 to 5.95 with an average of 4.78 and a COV of 0.21. In addition, the design equation for the mortarless reinforced concrete masonry wall under flexure should be the same. However, the flexural allowable compressive strength of F_b should be adjusted to be $0.225 f'_m$ which gives a factor of safety in the range of 2.36 and 3.82 with an average of 2.82 and a COV of 0.17.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 แบบแผนการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 หลักการ ทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	6
2.3 สมการออกแบบผนังวัสดุก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน	8
2.4 สมการวิเคราะห์กำลังรับแรงค้ำของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็ก ภายใต้แรงค้ำด	10
2.5 สรุป	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 การทดสอบวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	15
3.2 การทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้ แรงกดอัดในแนวแกน	18
3.3 การทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงค้ำด	23
บทที่ 4 ผลการศึกษา	
4.1 การทดสอบวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	26
4.2 ผลการทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้	

แรงกดอัดในแนวแกน	31
4.3 ผลการทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงดัด ..	47
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน ..	55
5.2 ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงดัด	56
5.3 ข้อจำกัดในงานวิจัยและข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป	57
บรรณานุกรม.....	59
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลกำลังรับแรงกดอัดของก้อนคอนกรีตบล็อก ปูนก่อ	
และปริซึม	61
ภาคผนวก ข. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	6
ประวัติผู้วิจัย	6

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและตัวแปรที่ใช้ในการทำการทดสอบ แรงกดอัด ในแนวแกน	20
3.2	รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบแรงคัต	24
4.1	คุณสมบัติทางกลเฉลี่ยของเหล็กเส้น	30
4.2	คุณสมบัติทางกลของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อและแบบมีปูนกรอก	30
4.3	ค่าแรงกดอัดที่เกิดรอยแตกร้าวแรกเฉลี่ย แรงกดอัดสูงสุดเฉลี่ย และความแกร่งเฉลี่ย ของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน	38
4.4	ค่าแรงกดอัดสูงสุดของผนังที่ได้จากการทดสอบและจากสมการออกแบบ และค่า อัตราส่วนความปลอดภัย	41
4.5	ค่าแรงกดอัดสูงสุดของผนังที่ได้จากการทดสอบ ค่าแรงกดอัดที่ยอมให้ จากสมการที่เสนอ และค่าอัตราส่วนความปลอดภัย	45
4.6	ค่าแรงกระทำที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกเฉลี่ย ค่าโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของ ช่วงเส้นตรงแรกเฉลี่ย และค่าความแกร่งคัตเฉลี่ยของผนังภายใต้แรงคัต	51
4.7	ค่าโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกของผนังที่ได้จากการทดสอบและ ค่าโมเมนต์ที่ยอมให้ และค่าอัตราส่วนความปลอดภัย	54
ก.1	ข้อมูลกำลังรับแรงกดอัดของก้อนคอนกรีตบล็อก	62
ก.2	ข้อมูลกำลังรับแรงกดอัดของปูนก่อ	63
ก.3	ข้อมูลกำลังรับแรงกดอัดของปริซึม	64

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและความเครียดในแนวแกนของ dry-stacked masonry wall และ mortar-jointed masonry wall	5
2.2	หน้าตัดที่ใช้วิเคราะห์ของผนังแบบกรอกปูนกรอกทุกช่องและมีเฉพะเหล็กเสริมรับแรงดึง	12
3.1	ลักษณะของคอนกรีตบล็อกที่ใช้ในงานวิจัย	15
3.2	การติดตั้งคอนกรีตบล็อกเข้ากับเครื่องทดสอบ	16
3.3	ลักษณะของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของปูนกรอก	16
3.4	การติดตั้งเหล็กตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ UTM	17
3.5	การติดตั้ง ตรีซึมคอนกรีตบล็อกเข้ากับเครื่องทดสอบ	18
3.6	เครื่องปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกไฟฟ้า	18
3.7	การติดตั้งผนังตัวอย่างทดสอบเพื่อทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน	22
3.8	การติดตั้ง ผนังตัวอย่างเข้ากับ loading frame เพื่อทดสอบแรงดึง	23
4.1	ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดของก้อนคอนกรีตบล็อก	27
4.2	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของคอนกรีตบล็อกภายใต้แรงกดอัด	27
4.3	ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดกับความเครียดกดอัดของปูนกรอก	28
4.4	ลักษณะการแตกร้าวของก้อนปูนกรอก	28
4.5	ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดึงและความเครียดดึงของเหล็กเส้น	29
4.6	ลักษณะการวิบัติของเหล็กเส้นที่ใช้ในการทดสอบ	30
4.7	ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อก	31
4.8	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของปริซึมคอนกรีตบล็อก	32
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับระยะหดตัวในแนวแกนของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.55% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง	33
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับระยะหดตัวในแนวแกนของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.47% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง	33
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับระยะหดตัวในแนวแกนของ	

	ผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.97% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง	34
4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับระยะหดรัดตัวในแนวแกนของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.83% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง	34
4.13	รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในช่วง preloading ของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ	34
4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.55% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง	35
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.47% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง	36
4.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.97% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง	36
4.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.83% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง	36
4.18	ตัวอย่างลักษณะการแตกร้าวของผนังแบบกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง	37
4.19	ตัวอย่างลักษณะการแตกร้าวของผนังตัวอย่างชนิดกรอกปูนกรอกทุกช่อง	38
4.20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดสูงสุดและอัตราส่วนความชะลูดของผนังภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน	39
4.21	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงกดอัดสูงสุดที่ทดสอบได้และกำลังรับแรงกดอัดของผนังกับอัตราส่วนความชะลูดของผนัง	43
4.22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.27% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง	47
4.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.23% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง	47
4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.48% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง	48
4.25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.41% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง	48

ณ

4.26	ลักษณะของรอยบดแตกที่เกิดขึ้นในด้านรับแรงกดอัดของผนัง	49
4.27	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติผนังภายใต้แรงดัด	49
4.28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกและอัตราส่วนเหล็กเสริม	52
4.29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งดัดและอัตราส่วนเหล็กเสริม	52

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_b	=	พื้นที่หน้าตัดสุทธิของวัสดุท่อ
A_c	=	พื้นที่หน้าตัดของปูนกรอก
A_n	=	พื้นที่หน้าตัดสุทธิของผนัง
A_s	=	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม
A_{st}	=	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมในแนวแกน
b_e	=	ความกว้างประสิทธิภาพของหน้าตัดผนัง
d	=	ระยะทางจากผิวนอกสุดของด้านที่รับแรงอัดของคอนกรีตถึงเหล็กรับแรงดึง
E_g	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของปูนกรอก
E_m	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุท่อ
E_s	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม
f_b	=	หน่วยแรงกดอัดรับ โดยวัสดุท่อ
f'_{cg}	=	กำลังรับแรงกดอัดของปูนกรอก
f'_m	=	หน่วยแรงกดอัดประลัยของปรีซึมวัสดุท่อ
f_s	=	หน่วยแรงดึงในเหล็กเส้น
f_{sy}	=	กำลังครากของเหล็กเสริม
F_a	=	หน่วยแรงกดอัดที่ยอมให้ของผนัง
F_b	=	หน่วยแรงกดอัดที่เกิดจากแรงดัดที่ยอมให้ของวัสดุท่อ
F_s	=	หน่วยแรงกดอัดหรือดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม
h	=	ความสูงของผนัง
k	=	อัตราส่วนระหว่างระยะทางจากผิวนอกสุดของผนังที่รับแรงอัดกับตำแหน่งของแกนสะเทิน
k_b	=	อัตราส่วนระหว่างระยะทางจากผิวนอกสุดของผนังที่รับแรงอัดกับตำแหน่งของแกนสะเทินที่สภาวะสมดุล
M_m	=	โมเมนต์ดัดที่ยอมให้ของผนังซึ่งถูกควบคุมโดยหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของวัสดุท่อ
M_t	=	โมเมนต์ดัดที่ยอมให้ของผนังซึ่งถูกควบคุมโดยหน่วยแรงดึง
n	=	อัตราส่วน โมดูลาร์ (modular ratio)
P_a	=	แรงกดอัดในแนวแกนที่ยอมให้ของผนัง
r	=	radius of gyration ของผนัง
R	=	slenderness reduction factor

ฉ

t	=	ความหนาของผนัง
ε_m	=	ความเครียดอัดสูงสุดของวัสดุก่อ
ε_s	=	ความเครียดดึงของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต
ρ	=	อัตราส่วนเหล็กเสริม
ρ_b	=	อัตราส่วนเหล็กเสริมสมดุล
ACI	=	American Concrete Institute
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
MDG.	=	Masonry Design Guide
UTM	=	Universal Testing Machine

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

โครงสร้างวัสดุก่อ (masonry structures) เป็นโครงสร้างที่ได้จากการนำก้อนอิฐดินเผา (brick masonry unit) หรือคอนกรีตบล็อก (concrete masonry unit) มาจัดเรียงในรูปแบบต่างๆ และใช้ปูนก่อ (mortar) เป็นตัวประสานก้อนอิฐดินเผาหรือคอนกรีตบล็อกเข้าด้วยกัน ในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศต่างๆ ในทวีปยุโรป โครงสร้างวัสดุก่อ นี้ได้รับความนิยมมากในการปลูกสร้างอาคารสำนักงาน และบ้านพักอาศัย เนื่องจากว่าถ้าโครงสร้างชนิดนี้ได้รับการออกแบบและก่อสร้างอย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรมแล้ว โครงสร้างชนิดนี้จะเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงและคงทน มีความทึบเสียงสูง มีความต้านทานต่อไฟไหม้สูง เก็บรักษาอุณหภูมิภายในตัวโครงสร้างได้ดี มีความสวยงาม เนื่องจากสามารถที่จะนำมาก่อสร้างให้มีรูปแบบใดๆ ได้ มีราคาค่อนข้างถูก ค่าบำรุงรักษาต่ำ และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมมากเท่าวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น คอนกรีตและเหล็ก เป็นต้น นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการก่อสร้างโครงสร้างวัสดุก่อกับรูปแบบการก่อสร้างระบบเสา-คานแล้ว พบว่ารูปแบบการก่อสร้างโครงสร้างวัสดุก่อสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโครงอาคารนั้นได้อย่างมาก เนื่องจากจะช่วยลดขั้นตอนการก่อสร้างลงและยังช่วยลดปริมาณการใช้ไม้ ที่ใช้ทำแบบหล่อคอนกรีต หรือทำโครงสร้างของอาคารลงอีกทางด้วย ซึ่งช่วยลดการตัดไม้ทำลายป่าโดยทางอ้อม

รูปแบบการก่อสร้างรูปแบบหนึ่งของโครงสร้างวัสดุก่อที่มีกำลังและความแกร่งเทียบได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือ ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็ก (reinforced concrete masonry wall) ซึ่งเป็นผนังแบบริับน้ำหนัก (load bearing wall) โดยคอนกรีตบล็อกจะถูกก่อขึ้นเป็นผนังด้วยปูนก่อ จากนั้น รอให้ปูนก่อมีอายุครบ 1 วัน ผนังดังกล่าวจะถูกเสริมเหล็กเข้าไปตรงกลางของหน้าตัดผนัง แล้วเทปูนกรอก (grout) ลงในโพรงช่องว่างของคอนกรีตบล็อก ซึ่งขั้นตอนการก่อปูนก่อเป็นขั้นตอนที่เสียเวลาในการก่อสร้างมาก นอกจากนั้นแล้ว การก่อปูนก่อจะต้องใช้แรงงานที่มีทักษะในการก่อสร้างค่อนข้างสูง ดังนั้น เพื่อเป็นการลดปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้เสนอการศึกษาและพัฒนา รูปแบบการก่อสร้าง โครงสร้างวัสดุก่อแบบใหม่คือ ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ (mortarless reinforced concrete masonry wall) ซึ่งเป็นรูปแบบการก่อสร้างที่มีแนวความคิดที่คล้ายคลึงกับแนวความคิดของผนังอิฐดินซีเมนต์ และผนังคอนกรีตบล็อกอัดแรง (Marzahn, 1992) อย่างไรก็ตาม ผนังอิฐดินซีเมนต์มีข้อด้อยเมื่อเทียบกับผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อคือ มีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้าง (lateral load) ที่ต่ำมาก และผนังคอนกรีตบล็อกอัดแรงมีข้อด้อยเมื่อเทียบกับผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อคือ ต้องใช้ความรู้ เทคนิค และทักษะของแรงงานที่ค่อนข้างสูง และมีค่าใช้จ่ายสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและแรงดัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ และเปรียบเทียบค่าแรงสูงสุดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อที่ทดสอบได้ กับค่าแรงที่ยอมให้ที่คำนวณได้จากสมการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กของ American Concrete Institute ACI 530-92 และของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1005-18
2. เพื่อพัฒนาสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.1 คอนกรีตบล็อกเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 57-2516
- 1.2 ปูนกรอกเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C476
- 1.3 เหล็กเส้นเป็นไปตามมาตรฐานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตของ ว.ส.ท.

2. วิธีทำการทดสอบวัสดุทำตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

3. การทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน (axially compressive test) และแรงดัด (flexural test) แบบแรงกระทำสี่จุด (four-point loading)

3. ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อมีรูปแบบการวางคอนกรีตบล็อกแบบ running bond โดยมีตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 ตัวแปรคือ อัตราส่วนเหล็กเสริม ความสูงของผนัง (ในกรณีทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน) ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (ในกรณีทดสอบแรงดัด) และรูปแบบการกรอกปูนกรอก โดยที่

3.1 อัตราส่วนเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกนมี 4 ค่าคือ 0.47% 0.55% 0.83% และ 0.97% และในการทดสอบแรงดัดมี 4 ค่าคือ 0.23% 0.27% 0.41% และ 0.48% โดยจะใช้เหล็กเสริม 2 เส้น (เหล็กบนและเหล็กล่าง) ต่อช่องที่กรอกปูนกรอก 1 ช่อง

3.2 ความสูงของผนังที่ใช้ในการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกนมี 3 ค่าคือ 0.76 m. 2.47 m. และ 2.85 m. และระยะห่างระหว่างจุดรองรับของผนังที่ใช้ในการทดสอบแรงดัดมี 2 ค่า คือ 2.37 m. และ 2.75 m. ซึ่งครอบคลุมความสูงของผนังคอนกรีตบล็อกที่ใช้งานก่อสร้างอาคารโดยทั่วไป

3.3 รูปแบบการกรอกปูนกรอกมี 2 รูปแบบคือ กรอกปูนกรอกทุกช่อง (fully grouted) และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง (partially grouted) ซึ่งเป็นรูปแบบการกรอกปูนที่มักใช้ในผนังคอนกรีตบล็อก

5. ผลการทดสอบผนังถูกเปรียบเทียบกับสมการออกแบบผนังวัสดุก่อเสริมเหล็กภายใต้แรงกดอัดและแรงดัด ACI 530-92 และ ว.ส.ท. 1005-18

1.4 แบบแผนการวิจัย

แบบแผนการวิจัยนี้เป็นการศึกษาทบทวนเอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้คือ การทดสอบแรงกดอัดของปูนกรอก การทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริม การทดสอบแรงกดอัดของก้อนคอนกรีตบล็อก และการทดสอบแรงกดอัดของปรีซึมของก้อนคอนกรีตบล็อก ทำการทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ สุดท้าย นำข้อมูลคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ได้แทนลงในสมการออกแบบผนังที่ได้จากการทบทวนเอกสาร จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบผนัง เพื่อเสนอสมการสำหรับการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อที่เหมาะสมต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดและแรงดัด
2. ได้สมการออกแบบ/วิเคราะห์ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดและแรงดัดได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2

หลักการ ทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

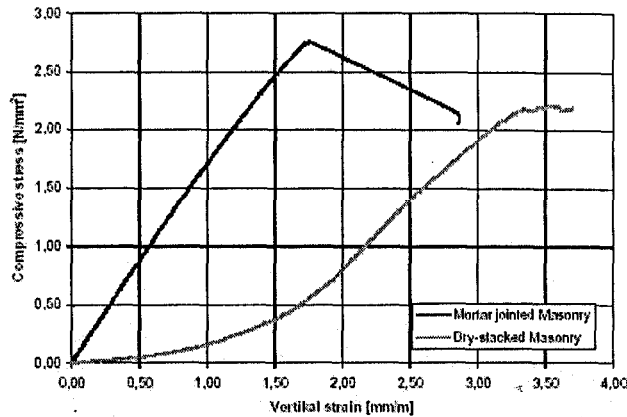
บทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนหลักการ ทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ โดยจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นการศึกษาและเข้าใจถึงงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปสู่การศึกษาในลำดับต่อไป จากนั้นจะกล่าวถึงวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ เพื่อให้ทราบถึงรายละเอียดโดยคร่าวๆ ของวัสดุ สุดท้ายจะกล่าวถึงสมการที่ใช้ในการออกแบบผนังวัสดุก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและสมการวิเคราะห์กำลังรับแรงคดของผนังคอนกรีตบล็อกภายใต้แรงคดตามมาตรฐานของ ACI และ ว.ส.ท. เพื่อเป็นการทบทวนสมการที่เกี่ยวข้องและใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาสมการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องและออกแบบการทดสอบ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทำปรัทัศน์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกับผนังคอนกรีตบล็อกพบว่า มีหลายงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศที่ได้ศึกษาพฤติกรรมของผนังคอนกรีตบล็อก ซึ่งเป็นแนวทางในงานวิจัยนี้

Marzahn (1997) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับผนัง dry-stacked masonry ซึ่งเป็นการก่อสร้างผนังโดยไม่ใช้ปูนก่อแต่ใช้การอัดแรงแทน เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกดอัดในแนวแกนของผนัง dry-stacked masonry และผนัง mortar-jointed masonry โดยใช้ตัวอย่างทดสอบที่สร้างขึ้นด้วยวัสดุก่อ 2 ชนิดคือ ก้อน calcium silicate แบบตันและ autoclaved aerated concrete block แบบ running bond โดยตัวอย่างทดสอบมี 2 ขนาดคือ ความกว้าง 1 ก้อนและ 2 ก้อน และมีความสูงเท่ากันคือ 5 ก้อน จากการศึกษาพบว่า คุณสมบัติของ dry-stacked masonry แตกต่างกันค่อนข้างสูงขึ้นอยู่กับชนิดและวิธีการผลิตก้อนวัสดุ ก่อสร้างของผนัง dry-stacked masonry ไม่ได้ขึ้นอยู่กับกำลังของวัสดุก่อเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับคุณภาพของระนาบของผิวของก้อนวัสดุก่อที่ใช้ในการเรียงก้อนวัสดุก่อด้วย เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนกับความเครียดในแนวแกนของผนัง dry-stacked masonry และผนัง mortar-jointed masonry ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พบว่า dry-stacked masonry จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงรับแรงกระทำเริ่มต้นสูงเนื่องจากก้อนวัสดุก่อจะต้องเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อให้ผิวสัมผัสของก้อนวัสดุแนบกันและรองรับแรงกระทำได้ และผนัง mortar-jointed masonry มีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดมากกว่าผนัง dry-stacked masonry ประมาณ 18 % ผนัง dry-stacked masonry มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึงกับคอนกรีต ถ้าผนัง dry-stacked masonry มีอัตราส่วนของความสูงต่อความหนาของผนังมากกว่า 2 การวิบัติของผนังตัวอย่างทดสอบจะวิบัติในลักษณะของการเฉือนในแนวทแยงมุมของผนัง ซึ่งแตกต่างจากในกรณีของผนัง mortar-jointed

masonry ที่รอยแตกกว้างเกิดขึ้นที่ขอบของปูนก่อที่อยู่ในแนวตั้ง (head joint) แล้วขยายตัวไปสู่ก้อน วัสดุก่อที่อยู่ด้านบนและด้านล่าง และการวิบัติจะเกิดขึ้นโดยการแตกของผนังในระนาบของผนัง



รูปที่ 2.1 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและความเครียดในแนวแกนของ dry-stacked masonry wall และ mortar-jointed masonry wall

Ramamurthy และ Ambalavanan (1997) ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงกดอัดของปริซึม วัสดุก่อโดยมีตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยคือ ลักษณะทางกายภาพของวัสดุก่อ และอัตราส่วนระหว่างความสูงและความหนาของวัสดุก่อ จากการวิจัยพบว่า รูปร่างของวัสดุก่อมีผลต่อรูปแบบการวิบัติและกำลังรับแรงกดอัดของปริซึมวัสดุก่อ และถ้าความหนาของชั้นปูนก่อมากขึ้นกำลังรับแรงกดอัดของของ ปริซึมวัสดุก่อจะลดลง นอกจากนั้นแล้ว กำลังรับแรงกดอัดของปริซึมวัสดุก่อจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน ระหว่างความสูงต่อความหนาของปริซึมวัสดุก่อเพิ่มขึ้น

Khalaf (1997) ได้ทำการพัฒนาการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงกดอัดของปริซึมวัสดุก่อให้ สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงได้แก่ ผนังคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนกรอก ซึ่งการทดสอบกำลังรับ แรงกดอัดของปริซึมวัสดุที่ใช้นั้นไม่ได้คำนึงถึงผลของปูนกรอกต่อกำลังรับแรงกดอัดของผนัง ดังกล่าว ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยคือ อัตราส่วนผสมของปูนกรอกและปูนก่อ การกรอกและไม่กรอก ปูนกรอกในปริซึมวัสดุก่อ โดยทำการทดสอบแรงกดอัดปริซึมวัสดุก่อ โดยให้แรงกระทำขนานกับ ระนาบผิวหน้าและตั้งฉากกับระนาบผิวหน้าของปริซึมวัสดุก่อ จากการทดสอบพบว่า การ เปลี่ยนแปลงส่วนผสมของปูนก่อมีผลเพียงเล็กน้อยต่อกำลังรับแรงกดอัดของปริซึมวัสดุก่อที่ไม่ได้ กรอกปูนกรอกที่ถูกกดทิศทางที่ขนานกับระนาบของผิวหน้าวัสดุก่อ เมื่อเปรียบเทียบกับกรอกแบบ ตั้งฉากกับระนาบผิวหน้าวัสดุก่อ

ปรีดาและอนุสรณ์ (2544) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของปูนกรอกต่อพฤติกรรมของกำแพง คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักกระทำเป็นจุด โดยกำแพงตัวอย่างมีความกว้าง 1050 mm. ความหนา 150

mm. และความสูง 890 และ 1490 mm. มีคานเอ็นในตำแหน่งบนสุดและล่างสุด ใช้ปูนก่อเสริมหน้าคอนกรีตบล็อก การทดสอบแรงกดอัดในแนวแกนกระทำเมื่ออายุกำแพงคอนกรีตบล็อกเกิน 28 วัน โดยใช้พื้นที่ถ่ายแรงขนาด 150×150 mm. จนกระทั่งกำแพงถึงจุดวิบัติ จากการศึกษาพบว่า กำแพงที่กรอกปูนกรอกได้ตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกทุกเป็นจุดกระทำสามารถรับน้ำหนักดังกล่าวได้มากกว่ากำแพงที่ไม่ได้กรอกปูนกรอกเล็กน้อยคือ 9% และ 16% ในกำแพงตัวอย่างที่มีความสูง 890 และ 1490 mm. ตามลำดับ นอกจากนั้นแล้ว ปูนกรอกยังช่วยป้องกันการแตกร้าวในระนาบที่ตั้งฉากกับผิวสัมผัสของกำแพงบริเวณใต้แผ่นเหล็กถ่ายแรง แต่จะไปแตกที่รอยต่อของปูนก่อแนวตั้งและบล็อกที่อยู่ถัดไปจากช่องกรอกปูนแทน

สิทธิชัย และจิรวัดน์ (2544) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตบล็อกและปริซึมคอนกรีตบล็อก งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบหาลำดับรับแรงกดอัดของคอนกรีตบล็อกและปริซึมคอนกรีตบล็อก และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับความสัมพันธ์ที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานสำหรับอาคารวัสดุของ ว.ส.ท. และของ ACI ในการศึกษาตัวอย่างคอนกรีตบล็อกจะถูกรวบรวมแบบสุ่มจาก โรงงานผลิตคอนกรีตบล็อกจำนวน 9 โรงงานในเขตจังหวัดนครราชสีมาและปริมณฑล จากนั้น คอนกรีตบล็อกและปริซึมคอนกรีตบล็อกซึ่งถูกก่อโดยปูนก่อชนิด N ตามมาตรฐาน ASTM C270 ได้ถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C67 และ ASTM E447 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดอัดเฉลี่ยของปริซึมคอนกรีตบล็อกและกำลังรับแรงกดอัดเฉลี่ยของก้อนคอนกรีตบล็อกที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ระบุไว้ในมาตรฐานสำหรับอาคารวัสดุของ ว.ส.ท. และของ ACI ถึง 40%

จากการปริทัศน์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นว่า ยังไม่พบงานวิจัยใดที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนและพฤติกรรมการรับแรงค้ำของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อโดยตรง ดังนั้นจึงสมควรที่จะศึกษาพฤติกรรมดังกล่าวของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ

2.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อประกอบด้วยคอนกรีตบล็อก (concrete masonry unit) ปูนกรอก (grout) และเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (reinforcing steel) ซึ่งมีรายละเอียดโดยคร่าวๆ ดังต่อไปนี้

2.2.1 คอนกรีตบล็อก

คอนกรีตบล็อกผลิตมาจากปูนซีเมนต์ หินปูน และน้ำ ผสมกันแล้วอัดขึ้นเป็นรูปแบบลักษณะต่างๆ ตามลักษณะการใช้งาน ในปัจจุบันคอนกรีตบล็อกเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ใช้สำหรับงานผนังรับน้ำหนักและไม่รับน้ำหนักภายในอาคาร หรือทำโครงสร้างอื่นๆ เช่น ผนังกันดิน เป็นต้น

มาตรฐานอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตบล็อกคือ มอก. 58-2516 สำหรับคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก และ มอก. 57-2516 สำหรับคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก

คอนกรีตบล็อกที่ใช้กันทั่วไปแบ่งออกเป็นชนิดหน้าตัดตัน(solid section) และชนิดหน้าตัดกลวง (hollow section) คอนกรีตบล็อกชนิดหน้าตัดตันเป็นคอนกรีตบล็อกที่มีพื้นที่กลวงไม่เกิน 25% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (gross area) และคอนกรีตบล็อกชนิดหน้าตัดกลวงเป็นคอนกรีตบล็อกที่มีพื้นที่กลวง 25-60% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด

2.2.2 ปูนกรอก (grout)

โดยทั่วไปแล้ว ปูนกรอกเป็นวัสดุที่ใช้ในการเติมช่องว่างระหว่างโครงสร้างคอนกรีตให้เต็มหรืออุดรอยร้าวที่เกิดขึ้นภายในองค์อาคาร ส่วนผสมของปูนกรอกคือปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวมมาตรฐาน ASTM C476 แบ่งปูนกรอกออกเป็น 2 ประเภทคือ ปูนกรอกหยาบ (coarse grout) และปูนกรอกละเอียด (fine grout) โดยที่ปูนกรอกละเอียดใช้สำหรับงานที่มีความกว้างของช่องที่ต้องการเทปูนกรอกอย่างต่ำ 38.1 mm. (1.5 in.) สำหรับผนัง 2 ชั้น หรือในคอนกรีตบล็อกกลวงขนาดของช่องว่างอย่างต่ำ 38.1 x 50.8 mm. (1.5 x 2 in.) และปูนกรอกหยาบใช้สำหรับงานที่มีความกว้างของช่องที่ต้องการจะเทปูนกรอกอย่างต่ำ 50.8 mm. (2 in.) สำหรับผนัง 2 ชั้น หรือในคอนกรีตบล็อกกลวงขนาดของช่องว่างอย่างต่ำ 63.5 x 76.2 mm. (2.5 x 3 in.)

โดยทางกายภาพแล้ว ปูนกรอกหรือคอนกรีตเหลว (pour concrete) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างคอนกรีตและมอร์ตาร์ ซึ่งความแตกต่างระหว่างคอนกรีต มอร์ตาร์ และปูนกรอกคือ ความข้นเหลว (fluidity) ในสถานะเริ่มต้นที่วัดได้จากการทดสอบการหาค่าการยุบตัว (slump test) โดยที่คอนกรีตมีค่าการยุบตัว 50-150 mm. มอร์ตาร์มีค่าการยุบตัว 120-200 mm. ปูนกรอกมีค่าการยุบตัว 200-250 mm. ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างน้ำและซีเมนต์ (water-cement ratio) ในการใช้ปูนกรอกในงานก่อสร้างผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กนั้น ปูนกรอกต้องมีความข้นเหลวเพียงพอที่จะสามารถเทใส่ลงในช่องว่างที่ต้องการกรอกได้และสามารถที่จะหุ้มเหล็กเสริมได้อย่างทั่วถึง โดยที่หน้าที่หลักของปูนกรอกที่สำคัญๆ คือ

1. เพื่อที่จะเชื่อมระหว่างผนังด้วยกันในกรณีที่สร้างผนัง หลายแถว (multiwythe wall)
2. เพื่อสร้างพันธะระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตบล็อกทำให้วัสดุทั้ง 2 ประเภท ให้มีการทำงานในลักษณะที่เป็นวัสดุเนื้อเดียว (homogeneous material) ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการที่จะช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อแรงดัดให้กับผนัง (Schneider and Dickey, 1994)
3. เพื่อเพิ่มปริมาตรของหน้าตัดของผนังในการป้องกันไฟ

2.2.3 เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปจะเป็นเหล็กกล้าละมุน โดยมีทั้งหน้าตัดกลมเรียบและกลมข้อย้อย เหล็กเส้นมีน้ำหนักประมาณ $7,850 \text{ kg/m}^3$ และมีความยาวมาตรฐาน

10 m. และ 12 m. โดยที่เหล็กทุกเส้นจะมีขนาด ชื่อย่อ และเครื่องหมายการค้าของบริษัทผู้ผลิตหล่อเป็นตัวนูนติดกับผิวเหล็ก คุณสมบัติที่สำคัญของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่ใช้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดไว้ได้แก่

- โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity, E) มีค่า 206 GPa ($2.1(10^6)$ kg/cm²)
- หน่วยแรงดึงตราบ (yield stress, σ_y) มีค่า 294.3 MPa (3,000 kg/cm²) และ 392.4 MPa (4,000 kg/cm²) สำหรับเหล็กมาตรฐาน SD30 และ SD40 ตามลำดับ
- เปอร์เซ็นต์การยืด (percent elongation) เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องมีเปอร์เซ็นต์การยืดไม่ต่ำกว่า 21%

2.3 สมการออกแบบผนังวัสดุก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

ACI และ ว.ส.ท. ได้แบ่งสมการออกแบบผนังวัสดุก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนออกตามลักษณะการเสริมเหล็กคือ ผนังวัสดุก่อไม่เสริมเหล็กและผนังวัสดุก่อเสริมเหล็ก

2.3.1 ผนังวัสดุก่อไม่เสริมเหล็ก

ACI 530-92 กำหนดสมการออกแบบผนังวัสดุก่อไม่เสริมเหล็กภายใต้แรงกดอัดในรูป

$$F_a = 0.25 f'_m \quad (2.1)$$

โดยที่ F_a คือหน่วยแรงกดอัดที่ยอมให้ (allowable compressive stress) ของผนัง

f'_m คือกำลังรับแรงกดอัดระบุ (specified compressive strength) ของวัสดุก่อหรือกำลังรับแรงกดอัดของปริซึมวัสดุก่อที่ได้จากการทดสอบปริซึมวัสดุก่อตามมาตรฐาน ASTM E 447 Method B

จากสมการที่ (2.1) จะเห็นได้ว่า ค่าหน่วยแรงกดอัดที่ยอมให้หาได้โดยการลดค่ากำลังรับแรงกดอัดของปริซึมวัสดุก่อด้วยอัตราส่วนความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 4.0 เพื่อป้องกันการบดแตก (crushing) ของวัสดุก่อ อย่างไรก็ตาม ถ้าผนังเป็นผนังที่สูงแล้ว ค่าหน่วยแรงกดอัดที่ยอมให้ของผนังยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความชะลูดของผนัง (h/r) อีกด้วย ดังนั้นในกรณีดังกล่าว ACI จึงได้กำหนดให้สมการที่ (2.1) ต้องถูกคูณที่เรียกว่า slenderness reduction factor (R) โดยที่

$$\text{เมื่อ } h/r \leq 99 \text{ แล้ว } F_a = 0.25 f'_m \left[1 - \left(\frac{h}{140r} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

$$\text{เมื่อ } h/r > 99 \text{ แล้ว } F_a = 0.25 f'_m \left[\frac{70r}{h} \right]^2 \quad (2.3)$$

โดยที่ h/r คือค่าอัตราส่วนความชะลูดของผนัง

h คือความสูงของผนัง

r คือ radius of gyration ของผนัง โดยที่ $r = \sqrt{t^2/12}$ เมื่อ t คือความหนาของผนัง

มาตรฐาน ว.ส.ท. 1005-18 กำหนดให้หน่วยแรงกดอัดที่ยอมให้ของผนังวัสดุก่อไม่เสริมเหล็กภายใต้แรงกดอัดมีค่าได้ไม่เกิน

$$F_a = 0.20 f_m' \left[1 - \left(\frac{h}{40t} \right)^3 \right] \quad (2.4)$$

โดยที่ f_m' คือกำลังรับแรงกดอัดของปริซึมวัสดุก่อ (ดู ว.ส.ท. 1005-18 ข้อ 3202) โดยให้คำนวณโดยหารแรงกดอัดสูงสุดด้วยพื้นที่สุทธิของปริซึม ซึ่งทำขึ้นด้วยวัสดุก่อคอนกรีตกลาง และด้วยพื้นที่รวมสำหรับปริซึมงานก่อสร้างที่ใช้ก่อนต้นหรือกรอกปูนก่อเต็มช่อง

จากสมการที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า ว.ส.ท. ใช้อัตราส่วนความปลอดภัยในการลดค่ากำลังรับแรงกดอัดของปริซึมวัสดุก่อด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยของผนังเท่ากับ 5.0 ซึ่งสูงกว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ ACI ใช้ซึ่งนี้น่าจะมีสาเหตุมาจากคุณภาพของวัสดุ (สิทธิชัย และจิรวัดณ์, 2544) และมีมือแรงงานที่ต่ำ นอกจากนั้นแล้ว ยังลดหน่วยแรงกดอัดของผนังลงเนื่องจากอัตราส่วนความชะลูดของผนังด้วย

2.3.2 ผนังวัสดุก่อเสริมเหล็ก

มาตรฐาน ACI 530-92 ได้เสนอสมการออกแบบผนังวัสดุก่อเสริมเหล็กแบบใช้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (working stress design) ดังนี้

$$\text{เมื่อ } h/r \leq 99 \text{ แล้ว } P_a = \left(0.25 f_m' A_n + 0.65 A_{sr} F_s \right) \left[1 - \left(\frac{h}{140r} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

$$\text{เมื่อ } h/r > 99 \text{ แล้ว } P_a = \left(0.25 f_m' A_n + 0.65 A_{sr} F_s \right) \left(\frac{70r}{h} \right)^2 \quad (2.6)$$

โดยที่ P_a คือแรงกดอัดที่ยอมให้ของผนังวัสดุก่อเสริมเหล็กเนื่องจากแรงกดอัดในแนวแกน

A_n คือพื้นที่หน้าตัดสุทธิของวัสดุก่อ

A_{sr} คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมในแนวแกน

F_s คือหน่วยแรงกดอัดหรือดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม ซึ่งมีค่าได้ไม่เกิน 165.5 MPa สำหรับเหล็ก grade 60

ขอให้สังเกตด้วยว่า สมการที่ (2.5) และ (2.6) นี้ไม่มีพจน์ที่แสดงกำลังรับแรงกดอัดของปูนกรอกปรากฏอยู่เนื่องจากมาตรฐาน ACI พิจารณาว่าให้ปูนกรอกมีกำลังรับแรงกดอัดเท่ากับกำลังรับแรงกดอัดของปริซึมวัสดุก่อ โดยพิจารณาให้พื้นที่หน้าตัดสุทธิของวัสดุก่อมีค่าเท่ากับพื้นที่ของก้อนคอนกรีตบล็อกบวกพื้นที่ปูนก่อ

ในการคำนวณพื้นที่หน้าตัดสุทธิของผนังที่ใช้ในการรองรับแรงกระทำเป็นจุด มาตรฐาน ACI กำหนดให้ผนังวัสดุก่อที่ก่อสร้างแบบ running bond สามารถกระจายหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนเนื่องจากแรงกระทำเป็นจุดได้ตามความกว้างของผนัง โดยให้ความกว้างประสิทธิภาพของการกระจายแรงมีค่าเท่ากับความยาวของแผ่นรับแรงแบกทานบวก 4 เท่าของความหนาของผนัง แต่ในกรณีที่ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของแผ่นรับแรงแบกทานมีค่าน้อยกว่าค่าความกว้างประสิทธิภาพดังกล่าว ให้ใช้ค่าระยะระหว่างจุดศูนย์กลางเป็นความกว้างของการกระจายแรงแทน ข้อกำหนดนี้ถูก

กำหนดขึ้นเนื่องจากข้อมูลพื้นฐานที่ว่า ปูนก่อในแนวตั้งระหว่างก้อนวัสดุก่อของผนังวัสดุก่อที่ก่อสร้างแบบ running bond สามารถถ่ายแรงข้ามก้อนวัสดุก่อได้ แต่ถ้าผนังวัสดุก่อถูกก่อสร้างแบบอื่นๆ แล้ว ความกว้างประสิทธิภาพของการกระจายแรงจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับความยาวของก้อนวัสดุก่อเพียงก้อนเดียวเท่านั้น ยกเว้นใช้คานทับหลังหรือ bond beam หรือเทคนิคอื่นๆ มาช่วยกระจายแรงดังกล่าว

อย่างไรก็ตาม ขอให้ทราบด้วยว่า มาตรฐานการออกแบบของประเทศอื่นเช่น Australian Standard (AS3700-98) ได้พิจารณากำลังของปูนกรอกในการคำนวณหาแรงกดอัดที่ยอมให้ของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กด้วย

มาตรฐาน ว.ส.ท. 1005-18 กำหนดให้หน่วยแรงกดอัดที่ยอมให้ของวัสดุก่อเสริมเหล็กภายใต้แรงกดอัดมีค่าได้ไม่เกินค่าที่หาได้จากสมการ

$$F_a = 0.225 f_m' \left[1 - \left(\frac{h}{40t} \right)^3 \right] \quad (2.7)$$

โดยต้องใช้ปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดตามที่กำหนดในข้อ 31009-5 หรือไม่น้อยกว่า 0.0020 ของเนื้อที่หน้าตัดของผนังและจะต้องมีความหนาแน่นไม่น้อยกว่า 1/30 ของความสูงหรือความกว้างระหว่างที่รองรับแล้วแต่ค่าไหนจะน้อยกว่ากัน แต่จะต้องไม่บางกว่า 140 mm.

2.4 สมการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กภายใต้แรงดัด

นอกจากผนังวัสดุก่อถูกกระทำโดยแรงกดอัดในแนวแกนแล้ว ในหลายกรณีผนังวัสดุก่อถูกกระทำโดยแรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสของผนังเช่น ผนังกำแพงกันดินและผนังที่อยู่ภายนอกของอาคารสูงที่ได้รับแรงกระทำจากลม เป็นต้น ซึ่งแรงเหล่านี้ทำให้เกิด โมเมนต์ดัดขึ้นในผนัง โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะทำให้ผนังด้านหนึ่งรับแรงกดอัดและอีกด้านหนึ่งรับแรงดึง

กำลังรับ โมเมนต์ดัดของหน้าตัดของผนังคอนกรีตบล็อกขึ้นอยู่กับรูปแบบการรอกปูนกรอกว่าเป็นแบบกรอกปูนกรอกทุกช่องหรือกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง และการวางเหล็กเสริมว่าเป็นแบบเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวหรือเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงกดอัด

ในงานวิจัยนี้ รูปแบบของการวางเหล็กเสริมบนหน้าตัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กจะมีทั้งเหล็กบนและเหล็กล่าง 2 เส้นต่อ 1 ช่องกลวงของก้อนคอนกรีตบล็อกที่ต้องเสริมเหล็ก (ดู subsection ที่ 3.2) โดยเหล็กเสริมจะถูกฝังอยู่ในปูนก่อโดยทั่วถึง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมาตรฐานออกแบบทั้ง ACI และ ว.ส.ท. กำหนดให้เหล็กเสริมดังกล่าวจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุก่ออย่างน้อย 40 mm. สำหรับเหล็กที่มีขนาดใหญ่กว่า 15 mm. และ 30 mm. สำหรับเหล็กที่มีขนาดตั้งแต่ 15 mm. ลงมา เพื่อป้องกันเหล็กเสริมจากดินฟ้าอากาศ ดังนั้น ตำแหน่งของเหล็กบนจึงอยู่ห่างจากเส้นตรงที่ลากผ่านจุด centroid ของหน้าตัดของผนังเพียง 30 mm. เท่านั้น ซึ่งจะทำให้เหล็กบนช่วยรับแรงกดอัดไม่มากนัก นอกจากนั้นแล้ว ตามมาตรฐานการออกแบบ ACI 530-92 เหล็กบนจะถือว่าเป็นเหล็กที่

สามารถรับแรงกดอัดได้นั้น การวางเหล็กจะต้องเป็นไปตามข้อ 5.9.1.6 ก็จะต้องมีเหล็กยึดตามขวาง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า $\frac{1}{4}$ เท่าของเหล็กรับแรงกดอัดและจะต้องมีระยะห่างไม่เกิน ค่าที่น้อยที่สุดของ 16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กรับแรงกดอัด 48 เท่าของเหล็กยึดตามขวาง และความหนาของผนัง ดังนั้น ในการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของผนังในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเฉพาะ ของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบกรอกปูนกรอกทุกช่องและแบบกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง และมีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง

อย่างไรก็ตาม ขอให้ทราบด้วยว่า การใส่เหล็กบนดังกล่าวมักจะทำเพื่อจุดประสงค์อื่น เช่น ทำหน้าที่รับแรงดึงในกรณีที่แรงดัดจากที่กระทำต่อผนังมีการกลับทิศทาง ซึ่งเกิดขึ้นเสมอในกรณีของ แรงลม และทำหน้าที่รับแรงกดอัดเมื่อผนังถูกกระทำโดยแรงกดอัดในแนวแกน เป็นต้น ดังนั้น ในบาง กรณี จึงต้องใส่เหล็กบนดังกล่าวให้แก่ผนัง

จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่า Masonry Design's Guide ซึ่งอ้างอิงกับมาตรฐาน การออกแบบ ACI 530-92 ได้เสนอสมการสำหรับวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของผนังคอนกรีตบล็อก เสริมเหล็กรับแรงดึงไว้แล้ว ซึ่งสามารถใช้ได้กับผนังแบบกรอกปูนกรอกทุกช่องและแบบกรอกปูน กรอกช่องเว้นช่อง โดยกำหนดให้ความกว้างประสิทธิภาพต่อเหล็กเสริม 1 เส้น, b_e , ที่จะใช้ในการ คำนวณต้องมีค่าไม่เกินค่าความกว้างที่กำหนดไว้ในข้อ 7.3.2 โดยที่ควรเป็นค่าที่น้อยที่สุดของ

1. ระยะ center-to-center ของเหล็กเสริม
2. 6 เท่าของความหนาของผนัง
3. 72 นิ้ว (1.80 m.)

นอกจากนั้นแล้ว มาตรฐานของ ว.ส.ท. 1005-18 ไม่ได้เสนอสมการดังกล่าว แต่ได้กล่าวถึง การคำนวณออกแบบวัสดุก่อคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับแรงดัดไว้ในหัวข้อ 3901 ของมาตรฐาน ดังกล่าว

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของผนังทั้งสองกรณีข้างต้นมีดังนี้

1. หน้าตัดซึ่งเป็นระนาบก่อนรับแรงดัดยังคงเป็นระนาบอยู่หลังจากรับแรงดัดแล้ว
2. วัสดุที่ใช้ทำวัสดุก่อทำงานด้วยกันเสมือนเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (homogeneous material)
3. หน่วยแรงและความเครียดเป็นสัดส่วนกันโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทิน
4. โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของวัสดุก่อและของเหล็กเสริมมีค่าคงที่ตลอด ค่าแรงกระทำใช้งาน
5. แรงดึงถูกต้านด้วยเหล็กเสริมรับแรงดึงเท่านั้น คอนกรีตบล็อกและปูนกรอกไม่รับแรงดึง
6. เหล็กเสริมถูกห่อหุ้มและยึดด้วยปูนกรอกอย่างสมบูรณ์ จึงทำให้ความเครียดที่ตำแหน่ง เดียวกันของเหล็กเสริมและปูนกรอกมีค่าเท่ากัน

Masonry Design's Guide ซึ่งอ้างอิงกับมาตรฐานการออกแบบของ ACI 530-92 ได้เสนอให้หน้าตัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กในกรณีนี้มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2

จากสมมุติฐานข้อที่ 5 ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กจะถูกสมมุติให้เกิดการแตกร้าวจากผิวนอกสุดของด้านที่รับแรงดึงถึงแกนสะเทินของหน้าตัด และจากสมมุติฐานข้อที่ 1 และจากสามเหลี่ยมคล้ายในรูปที่ 2.2(b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกดอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุก่อ (ในก้อนคอนกรีตบล็อก) ϵ_m และความเครียดดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม ϵ_s จะอยู่ในรูป

$$\frac{\epsilon_m}{\epsilon_s} = \frac{k}{1-k} \tag{2.8}$$

เมื่อผนังถูกกระทำโดยแรงดัดเท่านั้น แรงกดอัดที่เกิดขึ้นในวัสดุก่อจะมีค่าเท่ากับแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม ดังนั้น จากสมดุลของแรงจะได้

$$\frac{f_b b_e k d}{2} = A_s f_s \tag{2.9}$$

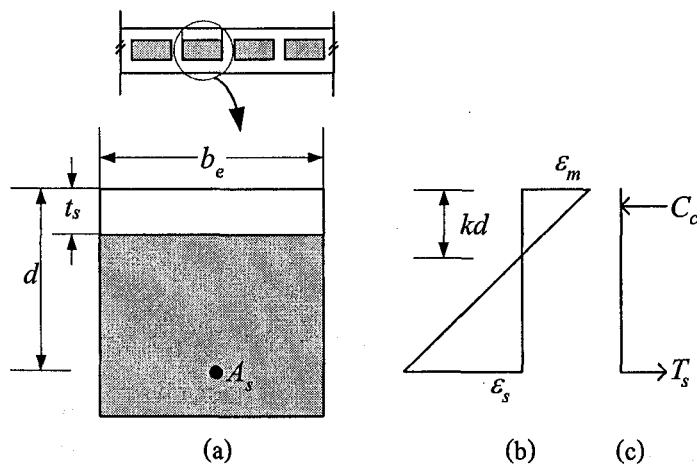
โดยที่ f_b คือหน่วยแรงกดอัดในวัสดุก่อเนื่องจากแรงดัด $= E_m \epsilon_m$

b_e คือความกว้างประสิทธิผลของหน้าตัดผนัง

d คือระยะจากผิวนอกสุดของด้านที่รับแรงกดอัดของหน้าตัดถึงจุด centroid ของเหล็กเสริมรับแรงดึง

A_s คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

f_s คือหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม $= E_s \epsilon_s$



รูปที่ 2.2 หน้าตัดที่ใช้วิเคราะห์ของผนังแบบกรอกปูนกรอกทุกช่องและมีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง
 (a) รูปขยายของส่วนหนึ่งของหน้าตัดผนังที่พิจารณา (b) การกระจายความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดัด
 (c) แรงกดอัดและแรงดึงลัพธ์ที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด

แทนค่าสมการที่ (2.9) ในสมการที่ (2.8) จะได้

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_s} = \frac{2A_s E_s}{kE_m b_e d} \quad (2.10)$$

กำหนดให้อัตราส่วนเหล็กเสริมและ modular ratio อยู่ในรูป $\rho = A_s / b_e d$ และ $n = E_s / E_m$ และแทนลงในสมการที่ (2.10) จากนั้น นำผลลัพธ์ที่ได้แทนลงในสมการที่ (2.8) จะได้ความสัมพันธ์ในรูป

$$\frac{k}{1-k} = \frac{2n\rho}{k} \quad (2.11)$$

ทำการจัดเทอมสมการที่ (2.11) ใหม่ในรูป $k^2 + 2n\rho k - 2n\rho = 0$ ซึ่งเป็นสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง และค่า k จะหาได้จาก

$$k = \sqrt{(n\rho)^2 + 2n\rho} - n\rho \quad (2.12)$$

ค่า k ที่ได้จากสมการที่ (2.12) ทำให้ได้ระยะจากผิวบนสุดของคานที่รับแรงกดอัดของหน้าตัดถึงแกนสะเทินซึ่งมีค่าเท่ากับ kd เมื่อทำการรวมโมเมนต์รอบจุด centroid ของแรงดึงแล้ว จะได้โมเมนต์ดัดที่ยอมให้ของผนังซึ่งถูกควบคุมโดยหน่วยแรงกดอัดที่ยอมให้เนื่องจากแรงดัดของวัสดุก่อ, M_m , ในรูป

$$M_m = \frac{b_e d^2 k j F_b}{2} \quad (2.13)$$

โดยที่ $j = 1 - (k/3)$

F_b คือหน่วยแรงกดอัดเนื่องจากแรงดัดที่ยอมให้ของวัสดุก่อ มาตรฐาน ACI. 530-92 กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $(1/3)f'_m$ เมื่อ f'_m คือ กำลังรับแรงกดอัดของปริซึมวัสดุก่อ

เมื่อทำการรวมโมเมนต์รอบจุด centroid ของแรงกดอัดแล้ว จะได้โมเมนต์ดัดที่ยอมให้ของผนังซึ่งถูกควบคุมโดยหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม, M_s , ในรูป

$$M_s = A_s j d F_s \quad (2.14)$$

โดยที่ F_s คือหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม มาตรฐาน ACI. 530-92 กำหนดให้ใช้ค่า 140 MPa (20,000 psi) สำหรับเหล็กเกรด 40 และ 50 และไม่เกิน 165.5 MPa (24,000 psi) สำหรับเหล็กเสริม grade 60

จากสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) จะเห็นได้ว่า โมเมนต์ดัดของผนังที่คำนวณได้จากสมการทั้งสองขึ้นอยู่กับหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุ กล่าวคือ สมการที่ (2.13) เป็นสมการที่ป้องกันการเกิดการวิบัติในวัสดุก่อ และสมการที่ (2.14) เป็นสมการที่ป้องกันการวิบัติโดยการครากของเหล็กเสริม ดังนั้น กำลังรับแรงดัดที่ยอมให้ของผนังในกรณีนี้จะเป็นค่าที่น้อยกว่าระหว่างค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.13) และ (2.14)

2.5 สรุป

จากการทบทวนหลักการ ทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อนทำให้เข้าใจในพื้นฐานของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย และสมการออกแบบผนัง วัสดุก่อเสริมเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและสมการออกแบบ/วิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบกรอกปูนกรอกทุกช่องและแบบกรอกปูนช่องเว้นช่องและมีเหล็กเสริมรับแรงดัดภายใต้แรงดัด ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาวิธีการดำเนินการศึกษาต่อไป

บทที่ 3

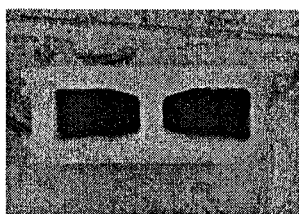
วิธีการดำเนินการวิจัย

พฤติกรรมการรับแรง กำลังรับแรง และลักษณะการวิบัติของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและแรงดัดจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการรับแรง กำลังรับแรงกดอัดของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างผนังดังกล่าว ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ พฤติกรรมการรับแรง กำลังรับแรง และลักษณะการวิบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างผนังตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบจะถูกทดสอบหาตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำค่าคุณสมบัติที่ได้ไปออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อที่จะใช้ในการทดสอบ โดยใช้สมการของ ACI ที่ไม่พิจารณาตัวคูณลดกำลังของวัสดุ จากนั้น ตัวอย่างทดสอบผนังจะถูกทดสอบภายใต้แรงกดอัดและแรงดัด เพื่อศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรง และลักษณะการวิบัติ จากนั้น ทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ทดสอบได้กับกำลังรับแรงกดอัดและแรงดัดที่ยอมรับของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. เพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ สุดท้าย นำผลการเปรียบเทียบที่ได้ไปพิจารณาหาสมการ ออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อที่เหมาะสมต่อไป

3.1 การทดสอบวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 การทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีตบล็อก

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้คือ เพื่อหาพฤติกรรมการรับแรง กำลังรับแรง และลักษณะการวิบัติของคอนกรีตบล็อกภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C140 คอนกรีตบล็อกที่ใช้ในงานวิจัยมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 แสดงการติดตั้งคอนกรีตบล็อกเข้ากับเครื่องทดสอบ universal testing machine (UTM) ยี่ห้อ SHIMADZU ที่มีกำลังทดสอบสูงสุด 2,000 kN

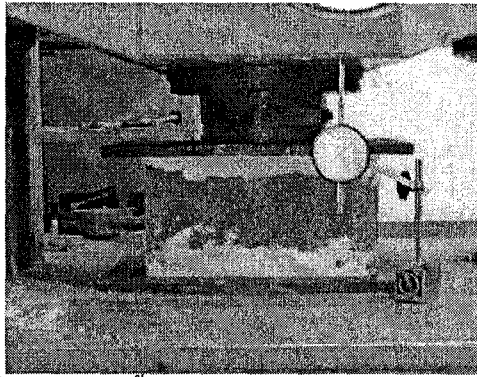


รูปที่ 3.1 ลักษณะของคอนกรีตบล็อกที่ใช้ในงานวิจัย

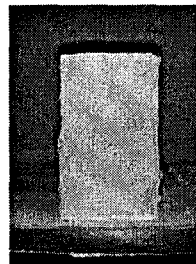
3.1.2 การทดสอบแรงกดอัดของปูนกรอก

จุดประสงค์ของการทดสอบนี้คือ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรง กำลังรับแรง และลักษณะการวิบัติของปูนกรอกภายใต้แรงกดอัด โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1019-89a รูปที่ 3.3

แสดงลักษณะของตัวอย่างทดสอบ ปูนกรอกที่ใช้ในการศึกษานี้มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์: ทราย : หิน เท่ากับ 1: 2.25: 3.5 โดยปริมาตร ซึ่งตามมาตรฐาน ACI 530.1-92 ตารางที่ 4.2.2.1 จัดว่าเป็นปูนกรอกชนิดหยาบ โดยค่าการยุบตัวของปูนกรอก (slump) ถูกควบคุมให้มีค่าอยู่ระหว่าง 250-280 mm. ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C143-96



รูปที่ 3.2 การติดตั้งคอนกรีตบล็อกเข้ากับเครื่องทดสอบ



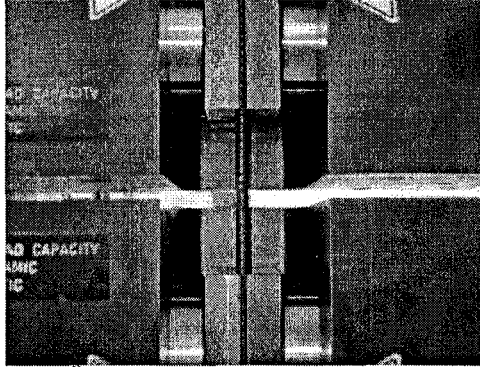
รูปที่ 3.3 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของปูนกรอก

3.1.3 การทดสอบแรงดึงของเหล็กเส้น

ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน เหล็กเส้นที่อยู่ในผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กจะถูกกระทำโดยแรงกดอัด แต่เนื่องจากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นภายใต้แรงกดอัดทำได้ยาก และเหล็กเหนียวมีพฤติกรรมและคุณสมบัติทางกลภายใต้แรงกดอัดในช่วงยืดหยุ่น (elastic) และช่วงคราก (yielding) ที่คล้ายคลึงกับพฤติกรรมและคุณสมบัติทางกลภายใต้แรงดึง ดังนั้น ในการศึกษานี้ เหล็กเส้นจะถูกทดสอบแรงดึงแทนการทดสอบแรงกดอัด

จุดประสงค์การทดสอบนี้คือ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้น โดยเฉพาะในในช่วงยืดหยุ่นและช่วงคราก โดยคุณสมบัติทางกลที่สนใจคือ หน่วยแรงคราก (yielding stress) หน่วยแรงสูงสุด (ultimate stress) โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และเปอร์เซ็นต์การยืด การทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM E8 โดยใช้เครื่องทดสอบ UTM ยี่ห้อ Instron ซึ่งมีกำลัง

ทดสอบสูงสุด 1,000 kN รูปที่ 3.4 แสดงการติดตั้งเหล็กตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ โดยการยึดตัวของเหล็กเส้นจะถูกวัดโดยใช้ extensometer

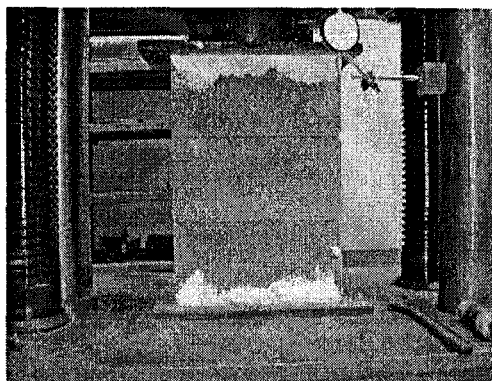


รูปที่ 3.4 การติดตั้งเหล็กตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ UTM

3.1.4 การทดสอบแรงกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อ

ปริซึมคอนกรีตบล็อกที่ใช้ในการทดสอบได้จากการนำก้อนคอนกรีตบล็อกมาก่อเรียงกันในแนวดิ่งโดยใช้ปูนก่อเป็นตัวประสาน มาตรฐาน ACI 530.1-92 กำหนดให้อัตราส่วนของความสูงต่อความหนาของปริซึมคอนกรีตบล็อกต้องอยู่ในช่วง 1.33 ถึง 5.0 และสำหรับคอนกรีตบล็อกกลวงต้องมีปูนก่อที่ประสานก้อนคอนกรีตบล็อกหนึ่งแนว เนื่องจากตัวอย่างทดสอบมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับผนัง ดังนั้น การทดสอบแรงกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกจะให้พฤติกรรมการรับแรง กำลังรับแรง และลักษณะการวิบัติที่ใกล้เคียงกับผนังที่ใช้งานจริงมากกว่าการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีตบล็อก ในการทดสอบนี้ปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อถูกแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ แบบไม่กรอกปูนกรอก แบบกรอกปูนกรอก 1 ช่อง และแบบกรอกปูนกรอก 2 ช่อง นอกจากนั้นแล้ว ปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบมีปูนก่อทั้งแบบกรอกปูนกรอก 1 ช่อง และแบบกรอกปูนกรอก 2 ช่อง ได้ถูกทดสอบด้วยเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและกำลังรับแรงกดอัด โดยปูนก่อ (mortar) ที่ใช้เป็นปูนก่อชนิด N ตามมาตรฐาน ASTM C270 ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์: ทราย เท่ากับ 1: 3.0 โดยปริมาตร และมีเปอร์เซ็นต์การไหล 120%

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้คือ เพื่อหาพฤติกรรมการรับแรง กำลังรับแรง และลักษณะการวิบัติของปริซึมคอนกรีตบล็อก โดยทำการทดสอบให้ใกล้เคียงกับมาตรฐาน ASTM E447-92 วิธีการ B ให้มากที่สุด โดยตัวอย่างทดสอบจะเป็นปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อเพื่อให้สอดคล้องกับผนังที่ใช้ในงานวิจัยนี้และกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดที่ได้จะไม่ถูกนำไปปรับแก้โดยใช้ตัวปรับแก้เนื่องจากอัตรา ความสูงต่อความหนา ทั้งนี้เนื่องจากปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อมี stress concentration เนื่องจากผิวสัมผัสที่ไม่สมบูรณ์ก่อนข้างสูงมาก รูปที่ 3.5 แสดงการติดตั้งปริซึมคอนกรีตบล็อกเข้ากับเครื่องทดสอบ



รูปที่ 3.5 การติดตั้งปริซึมคอนกรีตบล็อกเข้ากับเครื่องทดสอบ

3.2 การทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

จุดประสงค์การทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนคือ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรง กำลัง และลักษณะการวิบัติของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเสนอสมการออกแบบผนังดังกล่าวในภายหลัง การจัดทำผนังตัวอย่างทดสอบและการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกนถูกดำเนินการในห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีคอนกรีต อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แรงกดอัดที่กระทำต่อผนังถูกออกแบบให้อยู่ในรูปแรงกระทำแบบเป็นจุดกระทำผ่าน hydraulic jack ที่ติดตั้งปลายด้านหนึ่งเข้ากับคานของ loading frame และปลายอีกด้านหนึ่งติดตั้งแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน (bearing plate) ขนาด 150 x 150 x 15 mm. โดยแรงกดอัดจาก hydraulic jack ได้จากเครื่องปั้มน้ำมันไฮดรอลิกไฟฟ้า ยี่ห้อ ENERPAC ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.6 ซึ่งมีความดันปลอดภัยสูงสุดเท่ากับ 68.9 MPa (10,000 psi) ให้ความดันน้ำมันไฮดรอลิกแก่ hydraulic jack แบบลำดับขั้น (step) โดย hydraulic jack โดยให้แรงกดอัดในแนวแกนสูงสุด 250 kN



รูปที่ 3.6 เครื่องปั้มน้ำมันไฮดรอลิกไฟฟ้า

การออกแบบผนังตัวอย่างทดสอบจะต้องใช้ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. แรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดของ hydraulic jack และความสามารถรับแรงกระทำสูงสุดของ loading frame เพื่อให้แน่ใจว่าผนังตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติภายใต้แรงกระทำที่ไม่สูงกว่าความสามารถของเครื่องมือที่มีอยู่ในงานวิจัยนี้ แรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดของ hydraulic jack จะเป็นตัวควบคุม เนื่องจากมีค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุด 250 kN น้อยกว่าความสามารถรับแรงกระทำสูงสุดของ loading frame ซึ่งมีค่า 800 kN

2. เนื่องจากกำลังของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อในเบื้องต้นจะถูกประมาณจากสมการออกแบบผนังวัสดุก่อเสริมเหล็กของ ACI (สมการที่ 2.5) เมื่อไม่พิจารณาอัตราส่วนความปลอดภัย ดังนั้น คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยจะต้องถูกทดสอบก่อนการออกแบบการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังที่แสดงใน section ที่ 4.1

3. ปริมาณเหล็กเสริมในช่องที่กรอกปูนกรอก 1 ช่องถูกกำหนดขึ้นให้มีอัตราส่วนเหล็กเสริมอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์ที่มักใช้ในผนังคอนกรีตบล็อก (Masonry Design's Guide, 1993)

ผนังตัวอย่างทดสอบถูกก่อสร้างโดยการวางเรียงก้อนคอนกรีตบล็อกแบบสลับกึ่งกลางความกว้าง (running bond) โดยมี

1. ความหนาเท่ากับก้อนคอนกรีตบล็อกหรือ 140 mm.

2. ความกว้างเท่ากับความยาวของก้อนคอนกรีตบล็อก 3 ก้อนหรือ $3 \times 390 = 1,170$ mm. เนื่องจากเป็นความกว้างที่มากกว่าความกว้างประสิทธิผลของการกระจายแรงกดอัดจากแผ่นเหล็กรับแรงแบกทานตามมาตรฐาน ACI ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับความกว้างของแผ่นรับแรงแบกทานบวก 4 เท่าของความหนาของผนังหรือ $150 + 4 \times 140 = 710$ mm.

3. ความสูงสูงสุดของผนังมีค่าได้ไม่เกิน 900 mm. ในกรณีที่ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง UTM และไม่เกิน 3,000 mm. ในกรณีที่ทำการทดสอบโดยใช้ loading frame เนื่องจากข้อจำกัดความสูงของเครื่อง UTM และ loading frame ตามลำดับ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้ความสูงของผนัง 3 ค่าคือ 760, 2,470 และ 2,850 mm. ซึ่งได้จากการจัดเรียงก้อนคอนกรีตบล็อกในแนวค้ำ 4, 13 และ 15 ก้อนตามลำดับ โดยที่ความสูงของผนัง 2,470 และ 2,850 mm. เป็นความสูงที่มักใช้ในการก่อสร้างอาคารขนาดเล็ก

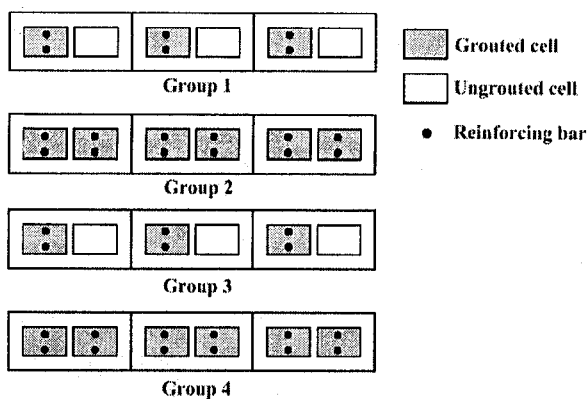
จากรูปแบบของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อที่ใช้และจากข้อมูลผลการทดสอบวัสดุดังที่แสดงใน section ที่ 4.1 พบว่า ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อที่มีการกรอกปูนทุกช่องมีพื้นที่หน้าตัดรวมเฉลี่ย $140(3 \times 390) = 163,800$ mm² มี moment of inertia รอบเส้นกึ่งกลางความหนาของผนัง $267.54(10^6)$ mm⁴ และมี radius of gyration รอบเส้นกึ่งกลางความหนาของผนัง 40.41 mm. และผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อที่มีการกรอกปูนช่องเว้นช่องมีพื้นที่หน้าตัดรวมเฉลี่ย $3 \times 41289 = 123,870$ mm² มี moment of inertia รอบเส้นกึ่งกลางความ

หนาของผนัง $237.78(10^6)$ mm⁴ และมี radius of gyration รอบเส้นกึ่งกลางความหนาของผนัง 43.81 mm. ดังนั้น จากคุณสมบัติทางกลของวัสดุและข้อมูลข้างต้น ผนังตัวอย่างทดสอบจะมีอัตราส่วนเหล็กเสริมและอัตราส่วนความชะลูดของผนัง ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1

จากตารางที่ 3.1 ชื่อตัวอย่างถูกตั้งขึ้นโดยมีความหมายดังนี้ ตัวอักษร “C” ตัวแรกหมายถึง การทดสอบแรงกดอัด (Compression test) ตัวเลขถัดไปบอถึงอัตราส่วนเหล็กเสริม โดยที่ “1” หมายถึงอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.55% “2” หมายถึงอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.47% “3” หมายถึงอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.97% และ “4” หมายถึงอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.83% ชุดของตัวเลขลำดับถัดมาบอถึงความสูงของผนังตัวอย่างทดสอบ เช่น 076 หมายถึงผนังตัวอย่างทดสอบสูง 0.76 m. เป็นต้น ตัวอักษรตัวสุดท้ายบอถึงรูปแบบการกรอกปูนกรอก โดยที่ “P” หมายถึง ผนังแบบกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง (partially grouted wall) และ “F” หมายถึง ผนังแบบกรอกปูนกรอกทุกช่อง (fully grouted wall) และรูปที่ 3.7 แสดงรูปหน้าตัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อก่อที่ใช้ในการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและตัวแปรที่ใช้ในการทำการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	เหล็กเสริมในช่องที่กรอกปูนกรอก 1 ช่อง	อัตราส่วนเหล็กเสริม (%)	อัตราส่วนความชะลูด	รูปแบบการกรอกปูนกรอก	จำนวน
C1-076-P	2-DB12	0.55	17.3	ช่องเว้นช่อง	2
C1-247-P	2-DB12	0.55	56.4	ช่องเว้นช่อง	2
C1-285-P	2-DB12	0.55	65.0	ช่องเว้นช่อง	2
C2-076-F	2-RB9	0.47	18.8	ทุกช่อง	2
C2-247-F	2-RB9	0.47	61.1	ทุกช่อง	2
C2-285-F	2-RB9	0.47	70.5	ทุกช่อง	2
C3-076-P	2-DB16	0.97	17.3	ช่องเว้นช่อง	2
C3-247-P	2-DB16	0.97	56.4	ช่องเว้นช่อง	2
C3-285-P	2-DB16	0.97	65.0	ช่องเว้นช่อง	2
C4-076-F	2-DB12	0.83	18.8	ทุกช่อง	2
C4-247-F	2-DB12	0.83	61.1	ทุกช่อง	2
C4-285-F	2-DB12	0.83	70.5	ทุกช่อง	2



รูปที่ 3.7 รูปหน้าตัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบ ไร้ปูนก่อที่ใช้ในการทดสอบ
แรงกดอัดในแนวแกนและแรงค้ำ

ขั้นตอนการก่อสร้างผนังตัวอย่างมีดังต่อไปนี้

1. ทำการคัดเลือกก้อนคอนกรีตบล็อกที่เหมาะสมให้มีจำนวนเพียงพอที่จะใช้ทำผนังตัวอย่างทดสอบ โดยก้อนคอนกรีตบล็อกต้องมีเหลี่ยมมุมที่สมบูรณ์ ไม่บิดงอหรือชำรุด และมีน้ำหนักปกติเฉลี่ย $12,760 \text{ g} \pm 5\%$

2. ก่อปูนก่อชนิด N ตามมาตรฐาน ASTM C270 ให้มีความกว้างและยาวมากกว่าขนาดหน้าตัดของผนังเล็กน้อย และให้มีความหนาประมาณ 10 mm. เพื่อปรับหน้าตัดของผนังให้อยู่ในแนวนอนอย่างสม่ำเสมอ

3. วางเรียงก้อนคอนกรีตบล็อกชั้นแรก 3 ก้อนลงบนปูนก่อตามข้อ 2 จากนั้น ตรวจสอบระดับของระนาบของหน้าตัดของผนังด้วยระดับน้ำและปรับแก้จนหน้าตัดของผนังอยู่ในแนวนอนอย่างสม่ำเสมอ จากนั้น ทำการวางเรียงก้อนคอนกรีตบล็อกชั้นต่อไปแบบ running bond โดยไม่ใช้ปูนก่อจนกระทั่ง ผนังตัวอย่าง มีความสูง 1140 mm. หรือ 6 ก้อน ตามข้อกำหนดความสูงสูงสุดที่อนุญาตให้กรอกปูนกรอกตามมาตรฐาน ACI 530.1-92 ตารางที่ 4.3.3.4 จึงหยุดเรียงก้อนคอนกรีตบล็อก สุดท้ายทำการอุดรอยรั่วระหว่างชั้นของก้อนคอนกรีตบล็อก

4. ทำการเสริมเหล็กในแนวความสูงของผนัง โดยพยายามควบคุมให้เหล็กเสริมอยู่ในแนวตั้ง โดยให้ระยะห่างของเหล็กเสริมในวัสดุก่อมีค่า 40 mm.

5. ผสมปูนกรอก โดยให้มีอัตราส่วนผสมตามที่ได้กล่าวไปแล้วใน section ที่ 3.1.2 โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีต จากนั้น ทำการตรวจสอบค่าการยุบตัวของปูนกรอก (slump) ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 250-280 mm. จากนั้น เทปูนกรอกลงในโพรงช่องว่างของผนังคอนกรีตบล็อกและปรับระดับให้เรียบเสมอหน้าตัดของผนังตัวอย่าง สุดท้ายทิ้งส่วนของผนังตัวอย่างทดสอบดังกล่าวไว้ 1 วัน เพื่อให้ปูนกรอกแข็งตัวและมีกำลังพอที่จะรับน้ำหนักของชั้นต่อไปของผนังตัวอย่างทดสอบ

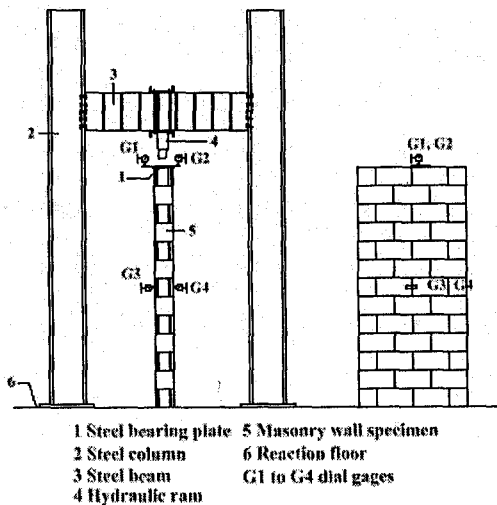
6. ทำการก่อสร้างชั้นต่อไปของผนังตัวอย่างทดสอบโดยใช้ชั้นตอนในข้อที่ 3 ถึง 5 จนได้ความสูงของผนังตามที่กำหนด สุดท้าย ปล่อยให้ผนังมีอายุครบ 7 วัน ในห้องปฏิบัติการ โดยไม่มีการบ่มปูนกรอก

ขั้นตอนการทดสอบผนังตัวอย่างภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนมีดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งผนังตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame ดังแสดงในรูปที่ 3.8(a) โดยให้ผนังวางตัวอยู่ในแนวตั้งและให้จุดศูนย์กลางของช่องที่กรอกปูนกรอกที่อยู่ในช่วงกึ่งกลางความกว้างของผนังอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน ซึ่งติดตั้งอยู่กับ hydraulic ram ดังแสดงในรูปที่ 3.8(b) จากนั้น ทำการเลื่อนแผ่นเหล็กรับแรงแบกทานลงอย่างช้าๆ โดยควบคุมผ่านเครื่องปั้มน้ำมันไฮดรอลิกไฟฟ้า จนกระทั่ง แผ่นเหล็กรับแรงแบกทานสัมผัสกับผนังและให้มีแรงกดข้างไว้ประมาณ 2.0-3.0 kN เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของผนังออกจากตั้ง

2. ติดตั้ง dial gauge ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงของผนังตัวอย่างทดสอบ เพื่อใช้วัดค่าการโก่งตัวทางด้านข้างของผนังตัวอย่างทดสอบ และที่ปลายด้านบนของผนังตัวอย่างทดสอบบนแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน เพื่อวัดค่าการหดตัวในแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 3.8(a)

3. ให้แรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อผนังตัวอย่างทดสอบ โดยให้แรงกดอัดมีค่าไม่เกิน 10 kN ต่อ 1 step ของแรงกระทำ จากนั้น ทำการบันทึกค่าแรงกดอัด ระยะโก่งตัวทางด้านข้าง และระยะหดตัวในแนวแกนของผนังตัวอย่างทดสอบ และทำการตรวจสอบรอยแตกร้าวต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในผนัง (ทำการบันทึกภาพและรายละเอียดต่างๆ หากพบว่ามีประเด็นที่น่าสนใจ)



a.) แผนภาพการทดสอบ



b) แผ่นรับแรงแบกทาน

รูปที่ 3.8 การติดตั้งผนังตัวอย่างทดสอบเพื่อทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน

4. ทำการทดสอบผนังตัวอย่างทดสอบตามขั้นตอนที่ 3 อย่างช้า และมีลำดับขั้น (step) ของ

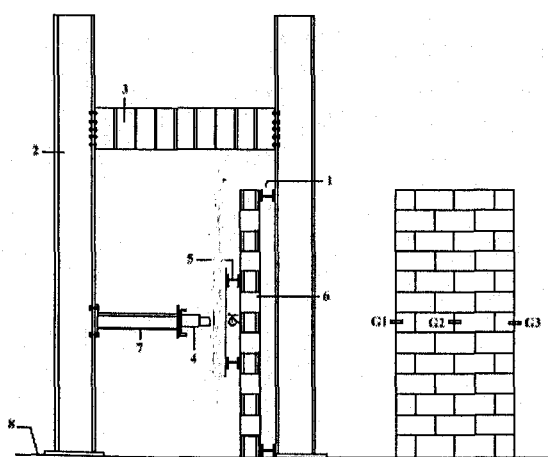
การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำที่สม่ำเสมอ จนกระทั่งผนังเกิดการวิบัติ จากนั้น ทำการเน้น (highlight) รอยแตกร้าวต่างๆ ที่สำคัญ และทำการบันทึกภาพลักษณะการวิบัติ

5. นำข้อมูลที่ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและระยะการยุบตัว และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของผนังตัวอย่างทดสอบ และทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.3 การทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงดัด

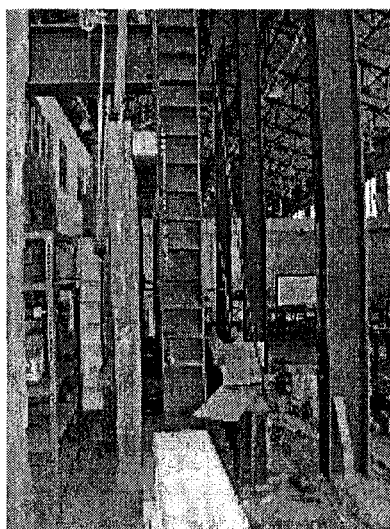
จุดประสงค์การทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงดัดคือ เพื่อศึกษาพฤติกรรมในการรับแรง กำลังรับแรงดัด และลักษณะการวิบัติของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงดัด โดยดำเนินการจัดทำตัวอย่างทดสอบและทดสอบแรงดัดในห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีคอนกรีต อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในงานวิจัยนี้ แรงดัดที่กระทำกับผนังตัวอย่างทดสอบอยู่ในรูปของแรงกระทำแบบสี่จุด (four-point loading) โดยใช้ hydraulic jack ที่ติดตั้งเข้ากับ loading frame เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของผนัง แต่ในการทดสอบนี้ hydraulic jack ถูกติดตั้งเข้ากับเสาต้านหนึ่งของ loading frame และวางตัวอยู่ในแนวนอน โดยแรงกระทำจะกระทำต่อคานถ่ายแรง (reaction beam) ในแนวความสูงของผนังซึ่งยึดอยู่กับคานถ่ายแรงอีกจุดหนึ่งที่วางตามความกว้างของผนังที่ตำแหน่ง 1/3 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับของผนัง ดังแสดงในรูปที่ 3.9



- 1 Supporting beam
- 2 Steel column
- 3 Steel beam
- 4 Hydraulic ram
- 5 Load-transferring beam
- 6 Masonry wall specimen
- 7 Beam used to support hydraulic ram
- 8 Reaction floor
- G1, G2, G3 dial gages

a.) แผนภาพการทดสอบ



b) ระบบถ่ายแรงที่ใช้ในการทดสอบ

รูปที่ 3.9 การติดตั้งผนังตัวอย่างเข้ากับ loading frame เพื่อทดสอบแรงดัด

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงคด โดยที่ชื่อตัวอย่างถูกตั้งขึ้นโดยมีความหมายเหมือนกับที่ได้กล่าวถึงไปแล้วในกรณีของการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน ยกเว้นตัวอักษรตัวแรก “F” หมายถึงการทดสอบแรงคด (flexural test) รูปหน้าตัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อที่ใช้ในการทดสอบแรงคดมีลักษณะเช่นเดียวกับในการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน โดยที่ปริมาณเหล็กเสริมในช่องที่กรอกปูนกรอก 1 ช่องถูกพิจารณาเลือกใช้ให้สอดคล้องกับในการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน ซึ่งได้ถูกตรวจสอบหาความสามารถในการรับแรงกระทำสูงสุดโดยใช้สมการหากำลังรับแรงคดของผนังดังที่ได้กล่าวถึงไปแล้วใน section ที่ 2.4 อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนเหล็กเสริมในกรณีนี้จะต่ำกว่าในกรณีการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกนครึ่งหนึ่ง เนื่องจากในการคำนวณหาอัตราส่วนเหล็กเสริม ACI กำหนดให้พิจารณาเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึงเท่านั้น นอกจากนั้นแล้ว ระยะห่างของจุดรองรับจะมีค่าเท่ากับความสูงของผนังลบด้วยครึ่งหนึ่งของความหนาของจุดรองรับ 2 จุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 mm.

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบแรงคด

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	เหล็กเสริมในช่องที่กรอกปูนกรอก 1 ช่อง	อัตราส่วนเหล็กเสริม (%)	ระยะห่างของจุดรองรับ (m.)	รูปแบบการกรอกปูนกรอก	จำนวน
F1-237-P	2-DB12	0.27	2.37	ช่องเว้นช่อง	2
F1-275-P	2-DB12	0.27	2.75	ช่องเว้นช่อง	2
F2-237-F	2-RB9	0.23	2.37	ทุกช่อง	2
F2-275-F	2-RB9	0.23	2.75	ทุกช่อง	2
F3-237-P	2-DB16	0.48	2.37	ช่องเว้นช่อง	2
F3-275-P	2-DB16	0.48	2.75	ช่องเว้นช่อง	2
F4-237-F	2-DB12	0.41	2.37	ทุกช่อง	2
F4-275-F	2-DB12	0.41	2.75	ทุกช่อง	2

ขั้นตอนการทดสอบผนังตัวอย่างภายใต้แรงคดมีดังต่อไปนี้

- ติดตั้งผนังตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame โดยวางผนังในแนวตั้งและรองรับด้วยจุดรองรับอย่างง่าย (simple supports) ซึ่งเป็นคานปฏิบัติการที่วางตามความกว้างของผนังที่ตำแหน่งปลายบนและปลายล่างของผนังตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.9
- ทำการติดตั้งระบบคานถ่ายแรงตามตำแหน่ง $1/3$ ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับของผนัง

จากนั้น ควบคุมหัวกดของ hydraulic jack ผ่านเครื่องปั้มน้ำมันไฮดรอลิกไฟฟ้า เพื่อให้มีแรงกระทำต่อผนังเล็กน้อย เพื่อให้ผนังตัวอย่างทดสอบและระบบคานถ่ายแรงอยู่ในตำแหน่งที่กำหนด จากนั้น ทำการติดตั้ง dial gauge ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงของผนัง

3. ทำการทดสอบผนังตัวอย่างทดสอบ โดยการให้แรงกระทำต่อผนังเพิ่มขึ้นครั้งละไม่เกิน 3 kN จากนั้น ทำการบันทึกค่าแรง และระยะโก่งตัวทางด้านข้างของผนังตัวอย่างทดสอบ และทำการตรวจสอบรอยแตกร้าวต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในผนัง (ทำการบันทึกภาพและรายละเอียดต่างๆ หากพบว่า มีประเด็นที่น่าสนใจ)

4. ทำการทดสอบผนังตัวอย่างทดสอบตามขั้นตอนที่ 3 อย่างซ้ำ และมีลำดับขั้น (step) ของการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำที่สม่ำเสมอ จนกระทั่งผนังเกิดการวิบัติ จากนั้น ทำการเน้น (highlight) รอยแตกร้าวต่างๆ ที่สำคัญและทำการบันทึกภาพลักษณะการวิบัติ

5. นำข้อมูลที่ได้อ่านไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวทางด้านข้างของผนัง และทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ผลการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีตบล็อก ผลการทดสอบแรงกดอัดของปูนกรอก ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็กเส้น และผลการทดสอบแรงกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อ และผลการทดสอบพฤติกรรมทางกลกำลังรับแรง และลักษณะการวิบัติของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดและแรงดัด ซึ่งผลการทดสอบวัสดุจะถูกนำไปแทนลงในสมการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กของ ACI และ ว.ส.ท. เพื่อหาค่าแรงกดอัดในแนวแกนและโมเมนต์ดัดที่ยอมให้ของผนัง จากนั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบผนังเพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย สุดท้าย ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้และลักษณะการวิบัติของผนังจะถูกนำไปพิจารณาปรับปรุงสมการออกแบบผนังของ ACI และ ว.ส.ท. ให้เหมาะสมกับผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อต่อไป

4.1 ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ผลการทดสอบวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้างผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

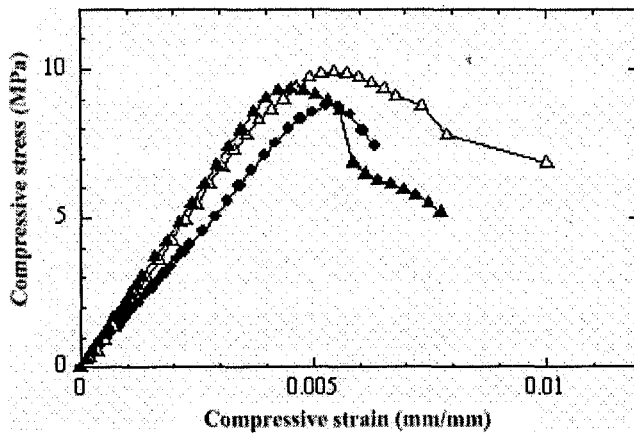
4.1.1 ผลการทดสอบแรงกดอัดของก้อนคอนกรีตบล็อก

ก้อนคอนกรีตบล็อกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกผลิตโดยโรงงานแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี จากการสุ่มตัวอย่างก้อนคอนกรีตบล็อกจำนวน 24 ก้อนและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพพบว่า ก้อนคอนกรีตบล็อกมีน้ำหนักปกติเฉลี่ย 12,759 g./ก้อน มีค่าการดูดกลืนน้ำเฉลี่ย 9.62% มีพื้นที่หน้าตัดสุทธิเฉลี่ย 27,900 mm² และมีพื้นที่หน้าตัดรวมเฉลี่ย 54,600 mm² และมีความหนาแน่นเฉลี่ย 2,362 kg/m³

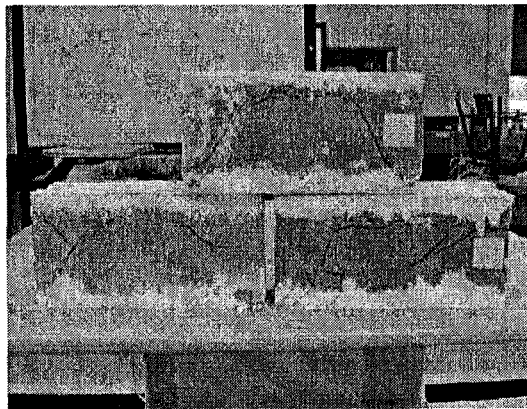
จากการทดสอบแรงกดอัดก้อนคอนกรีตบล็อกตามมาตรฐาน ASTM C140 พบว่า ก้อนคอนกรีตบล็อกมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดของพื้นที่หน้าตัดสุทธิเฉลี่ย 9.62 MPa โดยมีค่า coefficient of variation เท่ากับ 8.1% ดังนั้น ก้อนคอนกรีตบล็อกจึงถูกจัดเป็นก้อนคอนกรีตบล็อกกลวงประเภทรับน้ำหนักและอยู่ในชั้น ค-1 และ ค-2 ตามมาตรฐาน มอก. 57-2516 คือ สามารถใช้ในการก่อสร้างผนังภายในอาคารและภายนอกอาคาร โดยที่ผนังจะต้องอยู่เหนือระดับพื้นดินในสภาวะอากาศไม่รุนแรง หรือถ้าอยู่ในสภาวะอากาศรุนแรงจะต้องมีการป้องกันความเสียหายเนื่องจากสภาวะอากาศ

รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดของก้อนคอนกรีตบล็อก จากรูป พฤติกรรมการรับแรงกดอัดของก้อนคอนกรีตบล็อกแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรก ก้อนคอนกรีตบล็อกมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงจนถึงประมาณ 70 ถึง 80%

ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด ช่วงที่สอง ความชันของกราฟจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากรอยแตกร้าวภายในก้อนคอนกรีตบล็อกมีมากขึ้นจนถึงหน่วยแรงกดอัดสูงสุดโดยรอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของก้อนคอนกรีตบล็อกก่อน และช่วงที่สาม หน่วยแรงกดอัดของก้อนคอนกรีตบล็อกจะตกลงอย่างรวดเร็วในขณะที่ความเครียดกดอัดในแนวแกนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยรอยแตกร้าวจะขยายตัวมากขึ้นเรื่อยๆ โดยวางตัวในแนวทแยงทำมุม 30-45 องศากับแนวดิ่ง ซึ่งเป็นการแตกร้าวเนื่องจากแรงกดอัดและแรงเฉือน สุดท้าย คอนกรีตบล็อกจะเกิดการวิบัติโดยการบดแตก (crushing) ที่ใต้แผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน (bearing plate) รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างลักษณะการวิบัติของก้อนคอนกรีตบล็อก



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดของก้อนคอนกรีตบล็อก

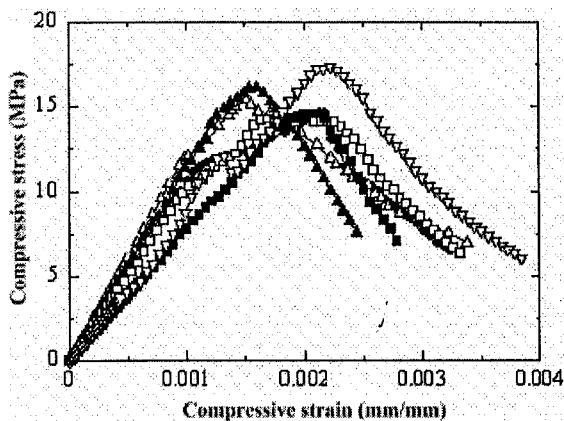


รูปที่ 4.2 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของคอนกรีตบล็อกภายใต้แรงกดอัด

4.1.2 ผลการทดสอบแรงกดอัดของปูนกรอก

จากการทดสอบแรงกดอัดของปูนกรอกที่อายุ 28 วัน จำนวน 24 ตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C1019-89a พบว่า ปูนกรอกที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์: ทราย: หิน เท่ากับ 1: 2.25: 3.5 โดยน้ำหนัก และค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 250-280 mm. มีกำลังรับแรงกดอัดเฉลี่ย 16.51 MPa โดยมีค่า coefficient of variation เท่ากับ 10.6%

รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดกับความเครียดกดอัดของปูนกรอก จากรูป พฤติกรรมการรับแรงกดอัดของปูนกรอกแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรก ความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรง (linear) จนถึงประมาณ 80% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด ช่วงที่สอง ความชันของกราฟจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากการแตกร้าวภายในปูนกรอกมีมากขึ้นจนถึงจุดที่ปูนกรอกรับหน่วยแรงกดอัดสูงสุดที่ความเครียดประมาณ 0.002 ช่วงสุดท้าย หน่วยแรงกดอัดของปูนกรอกจะตกลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความเครียดกดอัดในแนวแกนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดกับความเครียดกดอัดของปูนกรอก

เมื่อปูนกรอกเกิดการวิบัติ การแตกร้าวของปูนกรอกมีลักษณะรูปกรวยที่หันหัวชนกันคล้ายกับการแตกร้าวของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.4 การแตกร้าวดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากแรงกดอัดและแรงเฉือนอันเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างส่วนผสมและแรงเสียดทานภายใน (combined tensile splitting and shear failure)



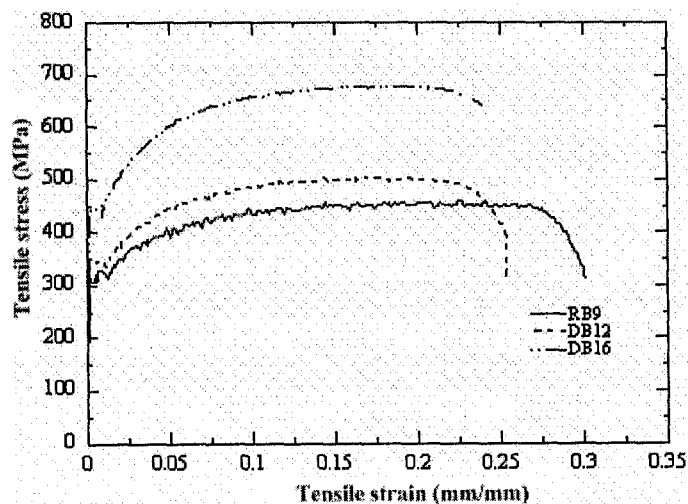
รูปที่ 4.4 ลักษณะการแตกร้าวของก้อนปูนกรอก

4.1.3 ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็กเส้น

เหล็กเส้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเหล็กเส้นที่ผลิตโดยบริษัท เหล็กสยาม จำกัด (บลส.) ตัวอย่างทดสอบถูกแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ เหล็กกลมผิวเรียบ ชนิด SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 mm. 3 เส้น และเหล็กกลมข้ออ้อย ชนิด SD30 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm. และ 16 mm. ขนาดละ 3 เส้น

รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดดึงของเหล็กเส้นที่ทดสอบได้ตามมาตรฐาน ASTM E8 ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคุณสมบัติทางกล ของเหล็กเส้นภายใต้แรงดึง ซึ่งจะเห็นได้ว่า เหล็กเส้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของ ACI และ ว.ส.ท. โดยเหล็ก RB9 และ DB12 ถือเป็นเหล็กเกรด 50 และเหล็ก DB16 ถือเป็นเหล็กเกรด 60 เนื่องจากข้อกำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้ในเหล็กเสริมของ ACI และ ว.ส.ท. ก่อนข้างที่จะคล้ายกันมาก ดังนั้น ค่าหน่วยแรงกอดักที่ยอมให้ของเหล็กเสริมจะอ้างอิงกับมาตรฐาน ACI 530-92 โดยที่ในกรณีของเหล็กเสริมรับแรงกอดัก ค่าหน่วยแรงกอดักที่ยอมให้ของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยกว่าของ 0.4 เท่าของหน่วยแรงครากหรือ 165 MPa และในกรณีของเหล็กเสริมรับแรงดึง ค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเกรด 50 และ 60 มีค่าเท่ากับ 140 MPa และ 165 MPa ตามลำดับ

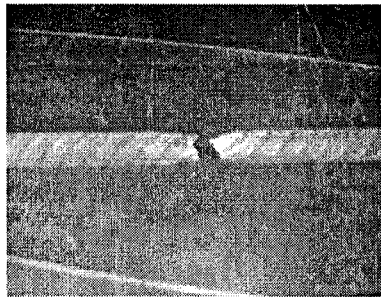
รูปที่ 4.6 แสดงการวิบัติของเหล็กเส้น ซึ่งจะเกิดคอคอดขึ้นบริเวณกึ่งกลางช่วงความยาวระหว่างหัวจับก่อนเกิดการขาดออกจากกัน และขอบของคอคอดทำมุมประมาณ 45 องศา กับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งการวิบัติในลักษณะนี้เป็นการวิบัติที่เกิดจากแรงเฉือนในรูปของ slip failure ของเนื้อเหล็ก



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดึงและความเครียดดึงของเหล็กเส้น

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกลเฉลี่ยของเหล็กเส้น

ชนิดของเหล็กเส้น	ชั้นคุณภาพ	หน่วยแรงดึงที่จุดคราก (MPa)	หน่วยแรงดึงประลัย (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	เปอร์เซ็นต์ความยืด (%)
RB9	SR 24	328.3	464.6	192.0	28.2
DB12	SD 30	356.4	519.4	192.0	26.5
DB16	SD 30	445.9	681.7	205.3	24.2



รูปที่ 4.6 ลักษณะการวิบัติของเหล็กเส้นที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.4 ผลการทดสอบแรงกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อ

จากการทดสอบแรงกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อและแบบมีปูนก่อจำนวน 9 ตัวอย่างต่อรูปแบบของปริซึม 1 รูปแบบ พบว่า ปริซึมคอนกรีตบล็อกมีคุณสมบัติทางกล ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบมีปูนก่อมีกำลังรับแรงกดอัดเฉลี่ยสูงกว่าปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อประมาณ 10-14 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากผลของการไม่มีปูนก่อทำให้ผิวสัมผัสระหว่างก้อนคอนกรีตบล็อกไม่มีความสมบูรณ์ทำให้เกิด stress concentration ขึ้นในปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อ

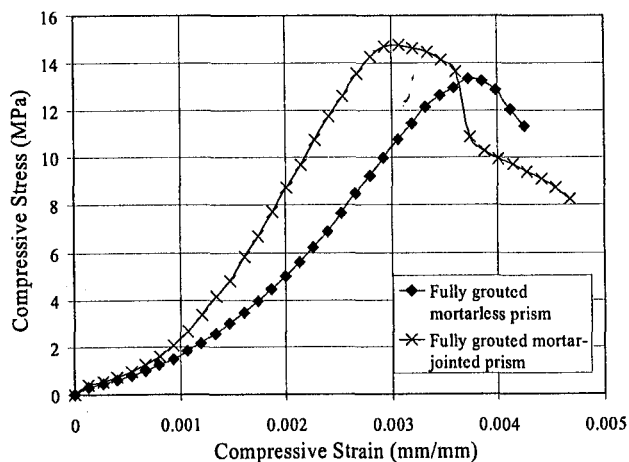
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกลของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อและแบบมีปูนกรอก

	ขนาดของตัวอย่างทดสอบ (กว้าง)(ยาว)(หนา) (mm)(mm)(mm)	จำนวน	กำลังรับแรงกดอัด		Modulus of elasticity (GPa)
			ค่าเฉลี่ย (MPa)	COV (%)	
ปริซึมแบบไร้ปูนก่อกรอกปูน 1 ช่อง	(390)(570)(140)	9	8.58	11.9	4.88
ปริซึมแบบไร้ปูนก่อกรอกปูน 2 ช่อง	(390)(570)(140)	9	12.98	11.4	5.42
ปริซึมแบบมีปูนก่อกรอกปูน 1 ช่อง	(390)(590)(140)	9	9.80	11.7	-
ปริซึมแบบมีปูนก่อกรอกปูน 2 ช่อง	(390)(590)(140)	9	14.03	11.7	-

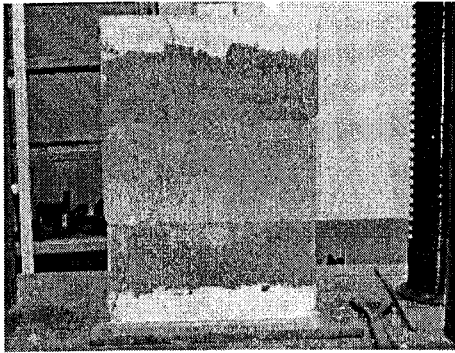
Note: กำลังรับแรงกดอัดของปริซึมคำนวณโดยใช้พื้นที่ 41,250 mm² กรณีกรอกปูน 1 ช่อง และ 54,600 mm² กรณีกรอกปูน 2 ช่อง

รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบกรอกปูนกรอก 2 ช่องทั้งแบบไร้ปูนก่อและแบบมีปูนก่อ จากรูป กราฟถูกแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรก ปริซึมคอนกรีตบล็อกมีความสัมพันธ์แบบไร้เชิงเส้นตรงจนถึงประมาณ 35% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด สำหรับกรณีปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อ และ 15% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด สำหรับกรณีปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบมีปูนก่อ ช่วงที่สอง ปริซึมคอนกรีตบล็อกมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงจนถึงประมาณ 60 ถึง 70% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด และช่วงที่สาม หน่วยแรงกดอัดของคอนกรีตบล็อกจะลดลง ในขณะที่ความเครียดในแนวแกนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรงในช่วงแรกของการรับแรงกดอัดดังกล่าวจะลดลงเป็นอย่างมาก หากมีการ preloading ตัวอย่างทดสอบประมาณ 30% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด ก่อนเริ่มการทดสอบ

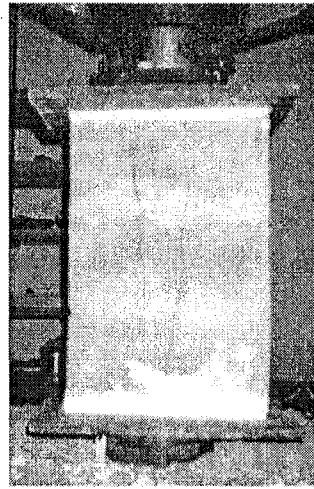
รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างลักษณะการวิบัติของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูน ซึ่งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีลักษณะการวางตัวอยู่ในแนวตั้งและอยู่ในระนาบของปริซึม ซึ่งการแตกร้าวดังกล่าวเกิดจากแรงดึงที่เกิดขึ้นในปริซึม เนื่องจากอิทธิพลของ Poisson's ratio ซึ่งมีทิศทางในแนวตั้งฉากกับแนวกระทำของแรงกดอัด และการที่ก้อนคอนกรีตบล็อกมีกำลังรับแรงดึงต่ำมากเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงกดอัด



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อและแบบมีปูนก่อ



a.) ปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อ



b.) ปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบมีปูนก่อ

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของปริซึมคอนกรีตบล็อก

4.2 ผลการทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

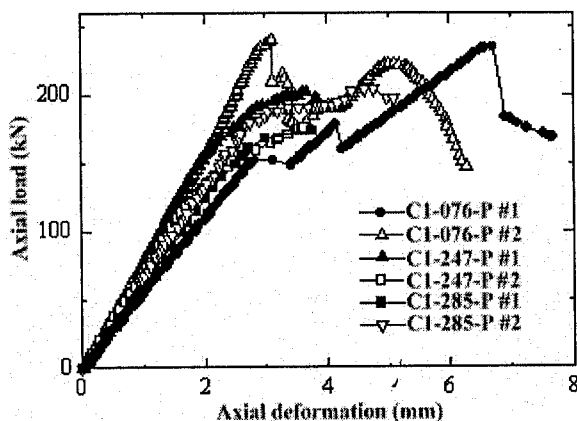
4.2.1 พฤติกรรมของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

รูปที่ 4.9 ถึง 4.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและระยะหดตัวในแนวแกนของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ จากรูป พฤติกรรมการรับแรงกดอัดของผนังถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรกผนังมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงค่าแรงกดอัดประมาณ 65-80% ของแรงกดอัดสูงสุดของผนัง โดยเฉพาะได้แผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน ที่จุดสิ้นสุดของพฤติกรรมในช่วงนี้จะเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวเกิดขึ้นบนก้อนคอนกรีตบล็อก ช่วงที่สอง ความชันของกราฟจะเริ่มค่อยๆ ลดลง เนื่องจากมีรอยแตกร้าวเกิดมากขึ้น ทำให้แรงกดอัดที่กระทำกับผนังเพิ่มขึ้นน้อยลงในขณะที่ระยะหดตัวในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่ผนังรับแรงกดอัดสูงสุด ช่วงที่สาม แรงที่กระทำต่อผนังจะตกลงอย่างรวดเร็ว โดยที่ระยะหดตัวในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงมาก โดยการวิบัติของผนังในลักษณะนี้เป็นการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) และเป็นการวิบัติเนื่องจากกำลังของวัสดุ (material failure)

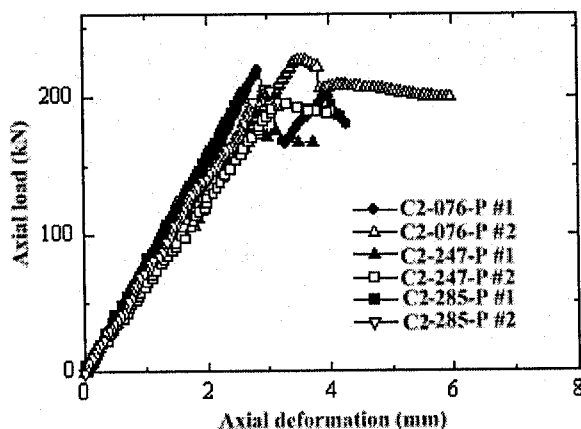
ขอให้ทราบด้วยว่า ในช่วงของการให้แรงกดอัดกระทำต่อผนังแบบ preloading ผนังมีการหดตัวที่ค่อนข้างสูงและมีการแตกร้าวเฉพาะจุดเกิดขึ้นกระจัดกระจายอยู่ในระนาบของผนัง เนื่องจากก้อนวัสดุจะต้องเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อให้ผิวสัมผัสของก้อนวัสดุแนบกันและรองรับแรงกระทำได้ ซึ่งมีลักษณะเดียวกับที่พบในการทดสอบปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนกรอก และที่ Marzahn (1992) พบในผนังที่สร้างขึ้นด้วยก้อน calcium silicate แบบตันและ autoclaved aerated concrete block ในการศึกษาไม่ได้้นำพฤติกรรมในช่วงนี้มาแสดงเนื่องจากได้ทำการ preloading ผนังถึง

ประมาณ 30% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดก่อนทำการทดสอบจริง และในการใช้งานจริง พฤติกรรมดังกล่าวจะเกิดขึ้นและสิ้นสุดในช่วงของการก่อสร้าง โครงสร้าง การแตกร้าวที่เกิดขึ้นในช่วง preloading ดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังที่แสดงในรูปที่ 13 คือ

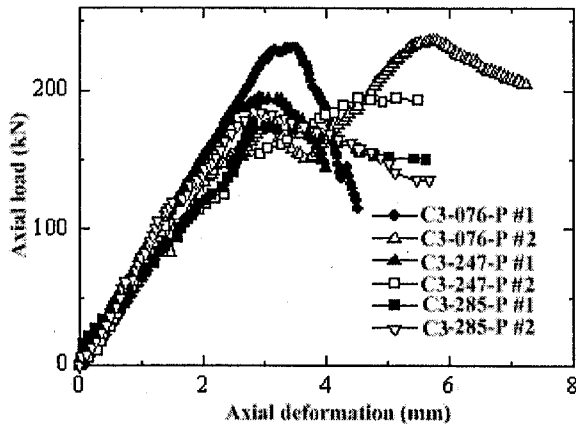
1. การแตกร้าวเนื่องจากการถ่วงแรง ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานที่ไม่เท่ากันที่ป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของก้อนคอนกรีตบล็อก ดังที่แสดงในรูปที่ 13.a รอยแตกร้าวประเภทนี้จะเกิดขึ้นที่กึ่งกลางของก้อนคอนกรีตบล็อกที่อยู่เหนือและอยู่ใต้ก้อนคอนกรีตบล็อกที่ถูกป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
2. การแตกร้าวเนื่องจากการคด ซึ่งเกิดจากการที่ก้อนคอนกรีตบล็อกที่อยู่ข้างใต้ก้อนคอนกรีตบล็อกที่พิจารณามีความสูงน้อยกว่าก้อนคอนกรีตบล็อกอื่นๆ ที่อยู่ในแถวเดียวกัน รอยแตกร้าวประเภทนี้มีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 13.b



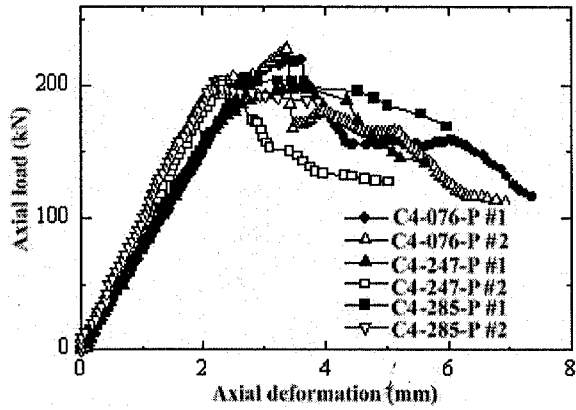
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับระยะหดตัวในแนวแกนของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.55% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง



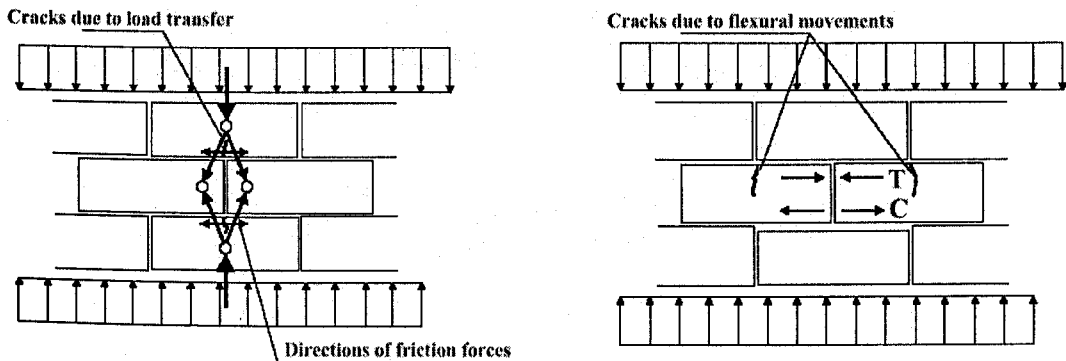
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับระยะหดตัวในแนวแกนของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.47% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับระยะหดตัวในแนวแกนของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.97% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง

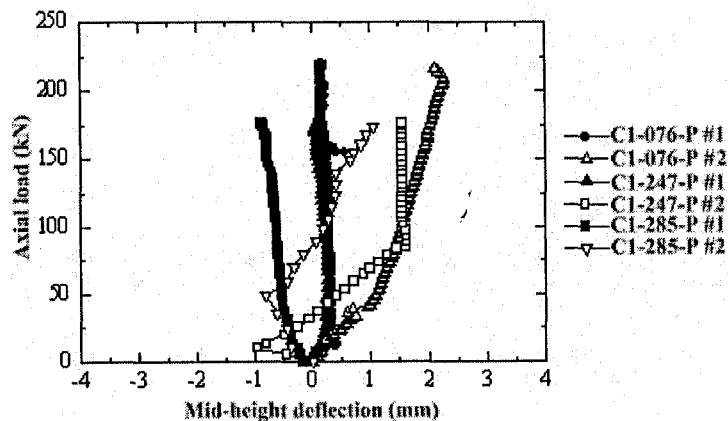


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับระยะหดตัวในแนวแกนของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.83% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง

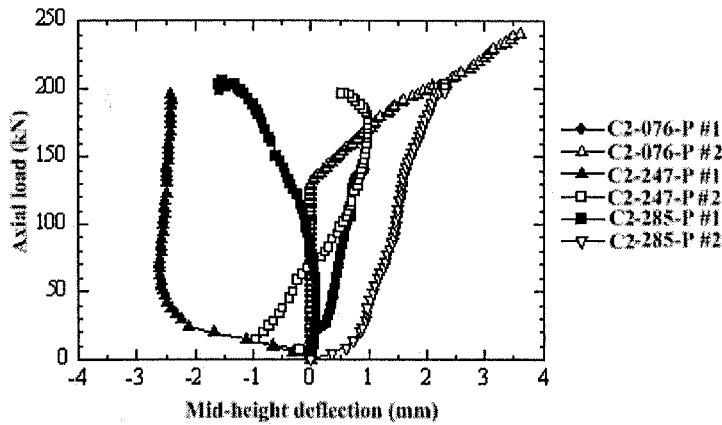


รูปที่ 4.13 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในช่วง preloading ของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ

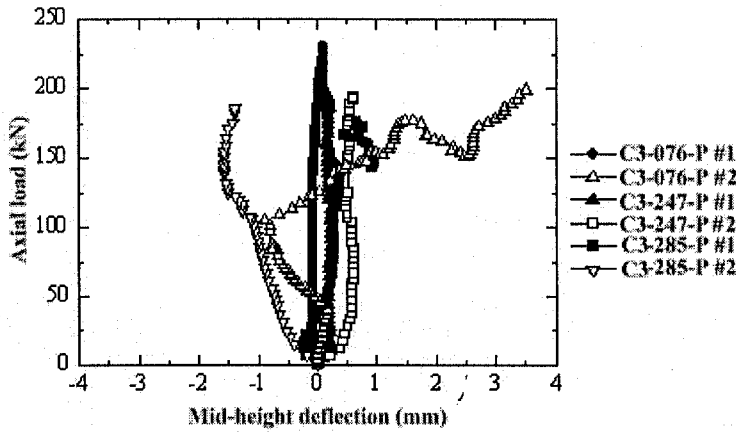
รูปที่ 4.14 ถึง 4.17 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางความสูงของผนัง จากรูปจะเห็นได้ว่าการโก่งตัวทางด้านข้างของผนังมีค่าน้อยมาก (โดยส่วนใหญ่ มีค่าสูงสุดไม่เกิน 4 mm.) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการวิบัติของผนังเนื่องจากการกำลังของวัสดุ นอกจากนี้แล้วยังพบอีกว่า ผนังตัวอย่างบางผนังเช่น C1-076-P, C1-247-F #2, และ C2-076-P #2 เป็นต้น เกิดการโก่งตัวกลับทิศในระหว่างการทดสอบคือในช่วงต้นการทดสอบผนังดังกล่าวเกิดการโก่งตัวไปด้านหนึ่ง พอถึงช่วงหนึ่งของการทดสอบเกิดการโก่งตัวไปอีกด้านหนึ่ง ซึ่งน่ามีสาเหตุมาจากการที่ก้อนคอนกรีตบล็อกบางก้อนในผนังตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีผิวหน้าที่รองรับแรงกดอัดที่ไม่ได้อยู่ในแนวนอน และเมื่อนำคอนกรีตบล็อกดังกล่าวมาเรียงเป็นผนังและถูกกระทำโดยแรงกดอัดแล้ว ผนังจึงเกิดการโก่งตัวทางด้านข้างขึ้นไปทางด้านหนึ่ง และเมื่อแรงกดอัดมีค่าสูงๆ จุดสัมผัสของคอนกรีตบล็อกที่ไม่สม่ำเสมอจะเกิด stress concentration และเกิดการวิบัติขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการปรับตัวของผนังในลักษณะดังกล่าว ดังนั้น ในการใช้งานจริง ก้อนคอนกรีตบล็อกที่จะนำมาใช้ก่อสร้างผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก็ควรเป็นคอนกรีตบล็อกที่มีขนาดและรูปร่างที่เท่ากันทุกก้อนและจะต้องมีเหลี่ยมมุมที่ได้ฉากให้มากที่สุด



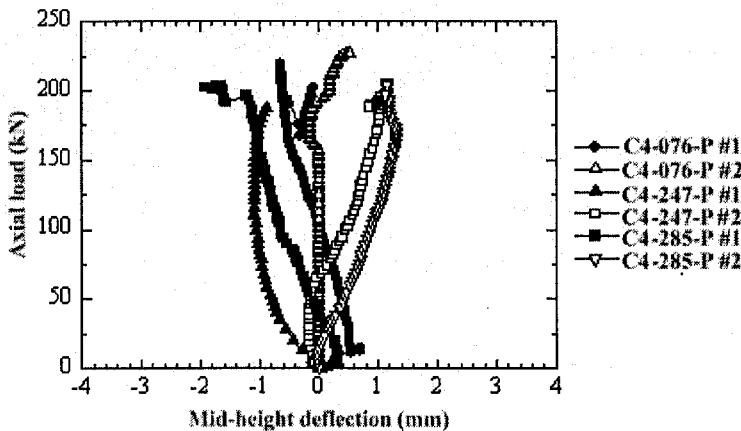
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.55% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.43% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.97% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง

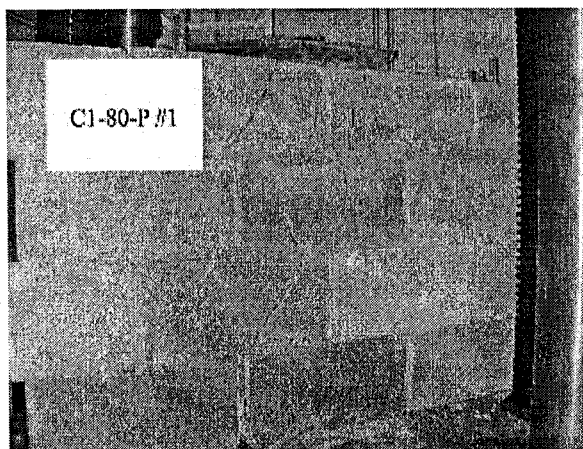


รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.83% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง

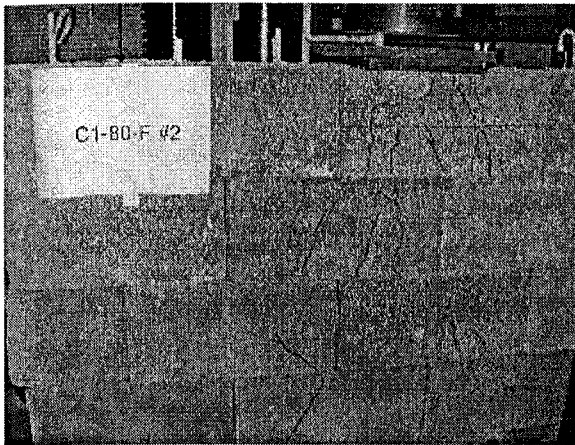
4.2.2. รูปแบบการวิบัติของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อที่ใช้ในการทดสอบทุกผนังมีการวิบัติเนื่องจากกำลังของวัสดุ โดยรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นรอยแตกร้าวแบบเฉือนทแยง (diagonal shear crack) เนื่องจากก้อนคอนกรีตบล็อกมีกำลังรับแรงดึงและแรงเฉือนที่ต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงกดอัดคือประมาณ 10 และ 15% ของกำลังรับแรงกดอัด ตามลำดับ (Masonry Design's Guide, 1993) ดังนั้น เมื่อแรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อผนังมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ แล้ว หน่วยแรงดึงร่วมกับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกดอัดในแนวแกน (ตามหลักการ stress transformation) จะมีค่าถึงกำลังรับแรงดึงร่วมกับแรงเฉือนของก้อนคอนกรีตบล็อกก่อนถึงกำลังรับแรงกดอัด รูปแบบของรอยแตกร้าวจึงเป็นแบบเฉือนทแยง

ผนังแบบกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่องมีลักษณะการแตกร้าวดังแสดงในรูปที่ 4.18 โดยที่รอยแตกร้าวทำมุมประมาณ 25–30 องศากับแนวแกนของผนัง ส่วนผนังแบบกรอกปูนกรอกทุกช่องมีลักษณะการแตกร้าวดังที่แสดงในรูปที่ 4.19 โดยที่รอยแตกร้าวจะเอียงทำมุมประมาณ 20 องศาในแนวแกนของผนัง การแตกร้าวของผนังในรูปแบบดังกล่าวเกิดจากการที่ผนังแบบกรอกปูนกรอกทุกช่องมีเหล็กเสริมและปูนกรอกที่เติมทุกช่องช่วยต้านทานต่อแรงดึงและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแรงกดอัด ซึ่งทำให้รอยแตกร้าวเกิดขึ้นในลักษณะที่ถูกบังคับให้แตกเป็นมุมที่แคบ ในทางตรงกันข้ามผนังแบบกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่องซึ่งไม่ได้กรอกปูนกรอกและไม่มีเหล็กเสริมทุกช่อง แรงดึงและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะสามารถถูกส่งผ่านไปยังช่องที่อยู่ติดกันได้เป็นระยะทางที่ไกลกว่า เนื่องจากไม่มีปูนกรอกที่เป็นตัวช่วยต้านทานแรงดึงและแรงเฉือนดังกล่าว



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างลักษณะการแตกร้าวของผนังแบบกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง



รูปที่ 4.19 ตัวอย่างลักษณะการแตกร้าวของผนังตัวอย่างชนิดกรอกปูนกรอกทุกช่อง

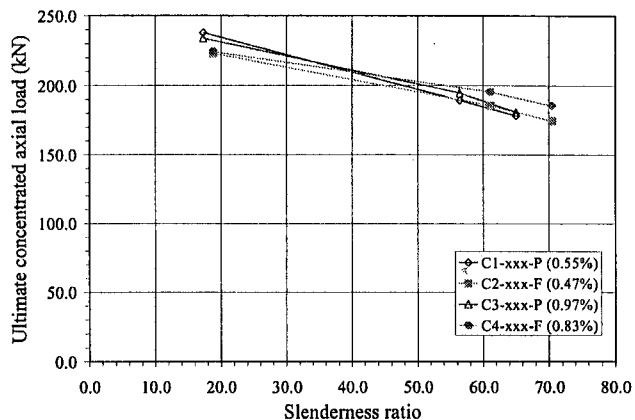
4.2.3. การวิเคราะห์ผลการทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าแรงกดอัดสูงสุดเฉลี่ยของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนที่ทดสอบได้ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกใช้ในการวิจารณ์และเปรียบเทียบผลการทดสอบใน subsection ต่อไป

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงกดอัดสูงสุดเฉลี่ยของผนังภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	อัตราส่วนเหล็กเสริม (%)	อัตราส่วนความชะลูด	แรงกดอัดสูงสุดเฉลี่ย(kN)
C1-076-P	0.55	17.3	237.7
C1-247-P	0.55	56.4	189.3
C1-285-P	0.55	65.0	178.0
C2-076-F	0.47	18.8	222.9
C2-247-F	0.47	61.1	185.6
C2-285-F	0.47	70.5	174.4
C3-076-P	0.97	17.3	233.7
C3-247-P	0.97	56.4	194.6
C3-285-P	0.97	65.0	180.7
C4-076-F	0.83	18.8	224.1
C4-247-F	0.83	61.1	195.4
C4-285-F	0.83	70.5	185.4

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.2 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกอดอัดสูงสุดและอัตราส่วนความชะลุดแล้วได้กราฟดังที่แสดงในรูปที่ 4.20 และผลของอัตราส่วนความชะลุด อัตราส่วนเหล็กเสริม และรูปแบบการกรอกปูนกรอกต่อแรงกอดอัดสูงสุดของผนังจะถูกวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกอดอัดสูงสุดและอัตราส่วนความชะลุดของผนังภายใต้แรงกอดอัดในแนวแกน

4.2.3.1 ผลของอัตราส่วนความชะลุดของผนังต่อกำลังรับแรงกอดอัดสูงสุดของผนัง

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.20 พบว่า เมื่ออัตราส่วนความชะลุดของผนังมีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว แรงกอดอัดสูงสุดของผนังมีค่าลดลง โดยมีแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างแรงกอดอัดสูงสุดและอัตราส่วนความชะลุดค่อนข้างเป็นเส้นตรง นอกจากนั้นแล้ว แนวโน้มความสัมพันธ์ดังกล่าวค่อนข้างขัดแย้งกับรูปแบบการวิบัติของผนังที่มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันคือ การวิบัติเนื่องจากกำลังของวัสดุ ทุกความสูงของผนัง ดังนั้น สาเหตุหลักที่ทำให้แรงกอดอัดสูงสุดของผนังมีค่าลดลงตามอัตราส่วนความชะลุดที่เพิ่มขึ้นน่าจะมาจากการติดตั้งผนังที่มีความสูงมาก (อัตราส่วนความชะลุดสูง) ให้อยู่ในแนวตั้งอย่างสมบูรณ์ทำได้ยากกว่าการติดตั้งผนังที่มีความสูงน้อยกว่า

4.2.3.2 ผลของอัตราส่วนเหล็กเสริมต่อกำลังรับแรงกอดอัดสูงสุดของผนัง

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.20 พบว่า เมื่ออัตราส่วนเหล็กเสริมของผนังตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้น 76% แล้ว กำลังรับแรงกอดอัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบ ไร่ปูนก่อไม่มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการที่เป็นเช่นนี้น่าจะเกิดจากการที่เหล็กเสริมไม่มีการยึดรั้งทางด้านข้าง ในลักษณะของเหล็กปลอกที่ใช้ยึดเหล็กยื่นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้น เหล็กเสริมดังกล่าวจึงเกิดการโก่งเดาะภายใต้แรงกอดอัดที่ถ่ายทอดมาจากแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน ซึ่งสังเกตได้จากการที่ปลายของเหล็กใต้แผ่นรับแรงแบกทานเกิดการคดงอเมื่อผนังเกิดการวิบัติที่จุดดังกล่าว และทำให้เหล็กเสริม

ไม่มีผลต่อกำลังของผนังตัวอย่างทดสอบ ซึ่งข้อสมมุติฐานนี้จะสามารถตรวจสอบได้โดยการติด strain gage ที่เหล็กเสริม เพื่อตรวจสอบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กที่จุดที่ผนังรับแรงสูงสุดว่าน้อยกว่าหน่วยแรงคลากของเหล็กหรือไม่ ถ้าต่ำกว่าข้อสมมุติฐานดังกล่าวน่าจะเป็นจริง นอกจากนั้นแล้ว ควรทำการทดสอบผนังตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กทางด้านข้างด้วย เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงเปรียบเทียบ

4.2.3.3 ผลของรูปแบบการกรอกปูนกรอกต่อกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของผนัง

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.20 พบว่า เมื่อมีการกรอกปูนกรอกเพิ่มขึ้น 100% แล้ว กำลังรับแรงกดอัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อไม่มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการที่เป็นเช่นนี้น่าจะมีสาเหตุมาจากการออกแบบการทดสอบ โดยให้ผนังทุกรูปแบบถูกกระทำโดยแรงกดอัดผ่านแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน ซึ่งมีความยาวเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวของก้อนคอนกรีตบล็อก และวางอยู่เต็มพื้นที่ของช่องที่กรอกปูนกรอก 1 ช่อง ดังนั้น ไม่ว่ารูปแบบการกรอกปูนกรอกเป็นแบบใด พื้นที่ที่รองรับแรงกดอัดจึงเหมือนกันทำให้รูปแบบการวิบัติของผนังเหมือนกันทุกรูปแบบคือ วิบัติเนื่องจากกำลังของวัสดุ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นได้ว่า ในกรณีไม่มีปูนกรอกนั้น การกระจายแรงกระทำเป็นจุดไม่เป็นไปตามที่มาตรฐาน ACI กำหนดตามที่ได้กล่าวไปแล้วใน section ที่ 2.3.2 ดังนั้น พื้นที่ที่จะใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรงสูงสุดของผนังตัวอย่างในกรณีนี้จึงควรเป็นพื้นที่ของแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน

4.2.4 การเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบกับสมการออกแบบของ ACI และสมการออกแบบของ ว.ส.ท.

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแรงกดอัดสูงสุดของผนังที่ได้จากการทดสอบ ค่าแรงกดอัดที่ยอมให้ของผนังที่คำนวณโดยใช้สมการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กของ ACI และ ว.ส.ท. และค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (factor of safety) ที่หาได้จากอัตราส่วนของค่าแรงกดอัดที่ได้จากการทดสอบกับค่าแรงกดอัดที่ยอมให้แล้วแต่กรณี

ในการศึกษานี้ ค่าแรงกดอัดที่ยอมให้ของผนังที่คำนวณโดยใช้สมการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กของ ACI หาได้โดยใช้สมการที่ 2.5 โดยที่ f'_m เป็นกำลังรับแรงกดอัดของพื้นที่หน้าตัดสุทธิของปริซึมคอนกรีตบล็อกกรณีไม่กรอกปูนกรอกและ A_n เป็นพื้นที่หน้าตัดสุทธิของผนังที่ใช้ในการรองรับแรงแบกทาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $21,000 \text{ mm}^2$ และค่าแรงกดอัดที่ยอมให้ของผนังที่คำนวณโดยใช้สมการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กของ ว.ส.ท. จะหาได้โดยใช้สมการที่ 2.7 ซึ่งไม่ได้นำพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมมาใช้ในการคำนวณ โดยที่ f'_m เป็นกำลังรับแรงกดอัดของพื้นที่หน้าตัดสุทธิของปริซึมคอนกรีตบล็อกกรณีกรอกปูนกรอก 1 ช่องสำหรับผนังกรอกปูนช่องเว้นช่อง และกรณีกรอกปูนกรอก 2 ช่องสำหรับผนังกรอกปูนทุกช่อง

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าแรงกดอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าแรงกดอัดที่ยอมให้ของ ACI และของ ว.ส.ท. ทุกกรณี โดยการทำ normality test พบว่า ข้อมูลอัตราส่วนความ

ปลอดภัยของ ACI และของ ว.ส.ท. มีค่า correlation (R-value) เท่ากับ 0.94 และ 0.93 ตามลำดับ ซึ่งถือได้ว่าข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายแบบ normal โดยมีอัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ระหว่าง 2.07 ถึง 3.66 (โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.72 และมีค่า coefficient of variation (COV) เท่ากับ 0.19) เมื่อเทียบกับค่าแรงกดอัดที่ยอมให้ของ ACI และ 3.28 ถึง 5.88 (โดยมีค่าเฉลี่ย 4.42 และมีค่า COV เท่ากับ 0.23) เมื่อเทียบกับค่าแรงกดอัดที่ยอมให้ของ ว.ส.ท.

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงกดอัดสูงสุดของผนังที่ได้จากการทดสอบและจากสมการออกแบบ และค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

ชื่อ ตัวอย่าง ทดสอบ	แรงกดอัดสูงสุด จากการทดสอบ (a) (kN)	แรงกดอัดที่ยอม ให้จากสมการ ACI (b) (kN)	แรงกดอัดที่ยอม ให้จากสมการ ว.ส.ท. (c) (kN)	อัตราส่วน ความ ปลอดภัย จาก a/b	อัตราส่วน ความ ปลอดภัย จาก a/c
C-076-1P	237.7	65.00	40.44	3.66	5.88
C-247-1P	189.3	55.29	37.06	3.42	5.11
C-285-1P	189.0	51.78	35.20	3.44	5.06
C2-076-F	222.9	88.24	61.18	2.53	3.64
C2-247-F	185.6	72.74	56.07	2.55	3.31
C2-285-F	184.4	67.07	53.25	2.60	3.28
C3-076-P	233.7	86.83	40.44	2.69	5.78
C3-247-P	194.6	73.87	37.06	2.63	5.25
C3-285-P	180.7	69.17	35.20	2.61	5.13
C4-076-F	224.1	108.08	61.18	2.07	3.66
C4-247-F	195.4	89.10	56.07	2.19	3.49
C4-285-F	195.4	82.16	53.25	2.26	3.48

ในทางปฏิบัติแล้ว โครงสร้างวัสดุจะถูกออกแบบโดยมีค่า probability of failure (ค่าความเป็นไปได้ที่อัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1.0) ไม่น้อยกว่า 1/10000 ซึ่งสอดคล้องกับค่า reliability เท่ากับ 99.99% และค่า reliability index เท่ากับ 3.72 (Harr, M.E. (1987). Reliability-Based Design in Civil Engineering. 1st Ed. McGraw-Hill. New York.) จากการวิเคราะห์ทางสถิติข้อมูลอัตราส่วนความปลอดภัยของ ACI และของ ว.ส.ท. พบว่า สมการของ ACI ให้ค่า probability of failure ของอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1/2460 ซึ่งสูงกว่าค่าของ probability of failure ที่แนะนำ

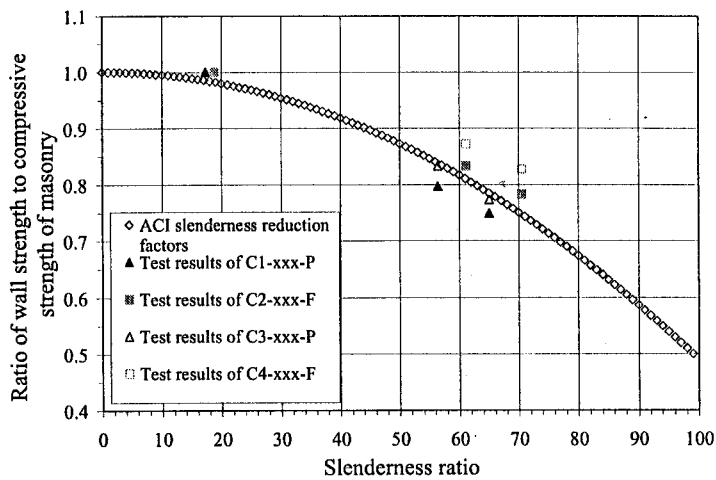
ประมาณ 4 เท่า นอกจากนั้นแล้ว ค่าต่ำสุดของข้อมูลอัตราส่วนความปลอดภัยของ ACI ยังมีค่าต่ำกว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 3.0-4.0 ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างวัสดุก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนค่อนข้างมาก ในกรณีของสมการของว.ส.ท. พบว่า ค่า probability of failure ของอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ $1/5263$ โดยมีค่าต่ำสุดของข้อมูลอัตราส่วนความปลอดภัยของ ว.ส.ท. มีค่าอยู่ในช่วงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างวัสดุก่อภายใต้แรงกดอัด อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสมการออกแบบของ ว.ส.ท. ไม่ได้พิจารณาเทอมที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก ดังเช่นสมการออกแบบของ ACI ซึ่งไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงในการก่อสร้าง ดังนั้นสมการออกแบบทั้งสองจึงควรถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยจะใช้รูปแบบสมการออกแบบของ ACI เป็นพื้นฐาน

จากตารางที่ 4.3 และจากที่ได้กล่าวไปแล้วใน subsection ที่ 4.2.3.1 ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดสูงสุดและอัตราส่วนความชะลูดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบ ไร้ปูนก่อนมีค่าลดลงตามอัตราส่วนความชะลูดของผนัง โดยมีทั้งตัวแปรที่ควบคุมได้คือ อัตราส่วนความชะลูดของผนัง และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้สมบูรณ์ในการทดสอบผนัง เช่น การเอียงศูนย์จากแนวแกนของแรงกระทำ การจัดวางตัวอย่างทดสอบไม่ตรงแนว และการที่ตัวอย่างทดสอบไม่ตรงอย่างสมบูรณ์ เป็นต้น เป็นตัวกำหนดการลดลงของความสัมพันธ์ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ตัวแปรที่สำคัญที่สุดคือ อัตราส่วนความชะลูดของผนัง เมื่อทำการ plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงกดอัดสูงสุดที่ทดสอบได้และกำลังรับแรงกดอัดของผนังกับอัตราส่วนความชะลูดของผนังเทียบกับเทอม slenderness reduction factor ของสมการออกแบบของ ACI แล้วจะได้กราฟความสัมพันธ์ดังที่แสดงในรูปที่ 4.21 โดยที่กำลังรับแรงกดอัดของผนังเท่ากับแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างผนังทดสอบสูง 0.75 m ที่ทดสอบได้ จากรูป จะเห็นได้ว่าข้อมูลที่ทดสอบได้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับเทอม slenderness reduction factor ของสมการออกแบบของ ACI ดังนั้น เทอม slenderness reduction factor ของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบ ไร้ปูนก่อนควรอยู่ในรูปเดียวกันกับที่สมการออกแบบของ ACI ใช้

คือ $1 - \left(\frac{h}{140r}\right)^2$ นอกจากนั้นแล้ว สมการออกแบบของ ACI ยังมีความใกล้เคียงกับการก่อสร้างจริงมากกว่าสมการออกแบบของ ว.ส.ท. ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น จึงเห็นควรใช้สมการออกแบบของ ACI (สมการที่ 2.5) เป็นพื้นฐานในการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบ ไร้ปูนก่อ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอัตราส่วนเหล็กเสริมของผนังมีผลต่อแรงกดอัดสูงสุดของผนังที่ทดสอบได้น้อยมาก ดังที่ได้กล่าวไปแล้วใน subsection ที่ 4.2.3.2 นอกจากนั้นแล้ว จากการคำนวณค่าหน่วยแรงกดอัดที่เกิดขึ้นในผนังได้แผ่นเหล็กรับแรงแบกทานพบว่ามีค่าเท่ากับ 8.45 และ 11.32 MPa สำหรับผนังกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่องและ 8.30 และ 10.67 MPa สำหรับผนังกรอกปูนกรอกทุกช่อง ซึ่งค่าหน่วยแรงดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อก

แบบไร้ปูนก่อ ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไม่มีการโอบรัดปูนกรอกภายใต้แผ่นเหล็ก รับแรงแบกทานเกิดขึ้นและยังมี stress concentration เกิดขึ้นใต้แผ่นเหล็กรับแรงแบกทานด้วย ดังนั้น แนวทางการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กที่ได้กล่าวไว้ในมาตรฐานการออกแบบของ ACI จะไม่สามารถนำมาใช้ได้ ในกรณีของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ และสมการของ ACI ควรถูกลดรูปโดยตัดเทอมของเหล็กเสริมออกในลักษณะเช่นเดียวกับสมการของ ว.ส.ท.



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงกดอัดสูงสุดที่ทดสอบได้และกำลังรับแรงกดอัดของผนังกับอัตราส่วนความชะลูดของผนัง

จากการทดสอบปริซึมคอนกรีตบล็อกและจากข้อมูลการทดสอบใน (Seangatith, S. and Chaijaruwanich, J. (2001). Compressive Strength of Concrete Masonry Units and Prisms. Suranaree Journal of Science and Technology. Vol. 8. No 3. pp. 131-137.) พบว่า ค่า COV ของกำลังรับแรงกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อมีค่า 0.15 เนื่องจากผลของการไม่ใช้ปูนก่อทำให้เกิด stress concentration เกิดขึ้นในวัสดุก่อที่ไม่ใช้ปูนก่อ ดังนั้น ค่า COV ของกำลังรับแรงกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อควรมีค่าสูงกว่า 0.15 แต่เนื่องจากข้อมูลที่มีอยู่มีจำนวนค่อนข้างน้อยในเชิงสถิติจึงสมมติให้ค่า COV ของกำลังรับแรงกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อมีค่าเท่ากับ 0.20 ซึ่งสูงกว่าค่า COV ของกำลังรับแรงกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อ 30% ซึ่งค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเทอมกำลังรับแรงกดอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกควรเพิ่มขึ้นจาก 4.0 เป็น 4.44 เท่ากับในสมการออกแบบของ ว.ส.ท.

จากเหตุผลข้างต้น สมการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนควรอยู่ในรูป

$$P'_a = 0.225 f'_m A_n \left[1 - \left(\frac{h}{140r} \right)^2 \right] \quad (4.1)$$

เมื่อ P'_a คือแรงกดอัดที่ยอมให้ของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อกายได้แรงกดอัดในแนวแกน

f'_m คือกำลังรับแรงกดอัดของปริซึมของก้อนคอนกรีตบล็อกแบบไร้ปูนก่อก่ที่ได้จากการทดสอบปริซึม ดังรายละเอียดที่แสดงใน subsection ที่ 3.1.4

A_n คือพื้นที่หน้าตัดสุทธิของผนังที่รองรับแรงกระทำ ในกรณีนี้เท่ากับพื้นที่ของแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน (ดูข้อสังเกตข้างล่าง)

h คือความสูงของผนัง

r คือ radius of gyration ของผนัง โดยที่ $r = \sqrt{t^2 / 12}$ เมื่อ t คือความหนาของผนัง
การใช้สมการข้างต้นควรพิจารณาด้วยว่า

1. แรงกระทำแบบเป็นจุด (concentrated load) ที่กระทำต่อผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อก่ต้องถูกรองรับโดยแผ่นเหล็กรับแรงแบกทานที่มีความหนาเพียงพอที่จะกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอ โดยทำการออกแบบตามขั้นตอนที่กล่าวถึงในมาตรฐานออกแบบโครงสร้างเหล็กของ ว.ส.ท.

2. ในกรณีที่แรงกระทำเป็นแรงแบบกระจายอย่างสม่ำเสมอ (uniformly distributed load) หรือแรงกระทำแบบเป็นจุดแต่มีคานทับหลังหรือ bond beam ที่มีความแข็งแรงพอในการกระจายแรง พื้นที่หน้าตัดสุทธิ A_n ควรเป็นค่าของพื้นที่ที่คำนวณโดยใช้ความกว้างประสิทธิภาพของการกระจายแรงมีค่าไม่เกินความยาวของก้อนคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน เนื่องจากผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อก่ไม่มีปูนก่อก่ในแนวตั้งระหว่างก้อนคอนกรีตบล็อกของผนัง ที่จะใช้ในการถ่ายแรงข้ามก้อนคอนกรีตบล็อก (Commentary on Building Code Requirement for Masonry Structure (ACI 530-92), 1992) อย่างไรก็ตาม ผลของการถ่ายแรงข้ามก้อนคอนกรีตบล็อกของคานทับหลังหรือ bond beam ในผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อก่ควรจะได้รับการศึกษาต่อไป

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแรงกดอัดสูงสุดของผนังที่ได้จากการทดสอบ ค่าแรงกดอัดที่ยอมให้ของผนังที่คำนวณโดยใช้สมการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนกรอกที่เสนอ และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่หาได้จากอัตราส่วนของค่าแรงกดอัดที่ได้จากการทดสอบกับค่าแรงกดอัดที่ยอมให้ จากตารางพบว่า อัตราส่วนความปลอดภัยของสมการที่เสนอเมื่อเทียบกับผลการทดสอบมีค่าอยู่ระหว่าง 3.70 ถึง 5.95 (โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.78 และมีค่า COV เท่ากับ 0.21) ซึ่งค่อนข้างสูงกว่าอัตราส่วนความปลอดภัยของสมการออกแบบผนังวัสดุของ ว.ส.ท. เล็กน้อย จากการวิเคราะห์เชิงสถิติพบว่า สมการที่ 4.1 ให้ค่า probability of failure ของอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1/12000 ซึ่ง

สูงกว่าค่าของ probability of failure ที่แนะนำ 1/10000 มากพอสมควร และมี reliability index เท่ากับ 3.77

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงกดอัดสูงสุดของผนังที่ได้จากการทดสอบ ค่าแรงกดอัดที่ยอมให้จากสมการที่เสนอ และค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	แรงกดอัดสูงสุดจากการทดสอบ (a) (kN)	แรงกดอัดที่ยอมให้จากสมการที่เสนอ (d) (kN)	อัตราส่วนความปลอดภัยจาก a/d
C-076-1P	237.7	56.13	5.95
C-247-1P	189.3	47.75	5.57
C-285-1P	189.0	44.71	5.60
C2-076-F	222.9	74.86	3.70
C2-247-F	185.6	61.71	3.74
C2-285-F	184.4	56.90	3.81
C3-076-P	233.7	77.96	5.85
C3-247-P	194.6	66.32	5.73
C3-285-P	180.7	62.11	5.68
C4-076-F	224.1	94.70	3.72
C4-247-F	195.4	78.07	3.94
C4-285-F	195.4	71.98	4.05

4.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อนภายใต้แรงดัด

4.3.1. พฤติกรรมการรับแรงดัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อน

รูปที่ 4.22 ถึง รูปที่ 4.25 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของผนัง โดยทั่วไปแล้ว กราฟถูกแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นช่วงเส้นตรงที่มีความชันมาก ช่วงที่สองเป็นช่วงที่เส้นกราฟเป็นเส้นโค้งที่มีความชันลดลงอย่างต่อเนื่อง และช่วงที่สามเป็นช่วงเส้นตรงที่มีความชันน้อยกว่าช่วงแรก ซึ่งพฤติกรรมการรับแรงดัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อนที่มีช่วงเส้นตรงที่มีความชันต่างกัน 2 ช่วงโดยที่ช่วงเส้นตรงแรกมีความชันมากกว่าในช่วงเส้นตรงที่สองนี้มักจะถูกเรียกว่า พฤติกรรมแบบ bilinear ขอให้ทราบด้วยว่า ในช่วงแรกของการให้แรงกระทำต่อผนัง (preloading) ผนังมีการโก่งตัวที่ค่อนข้างสูงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากก้อนวัสดุจะต้องเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อให้ผิวสัมผัสของก้อนวัสดุแนบกันและรองรับแรงกระทำได้ โดยเฉพาะในส่วนของหน้าตัดของผนังที่รับแรงกดอัด ในการศึกษา

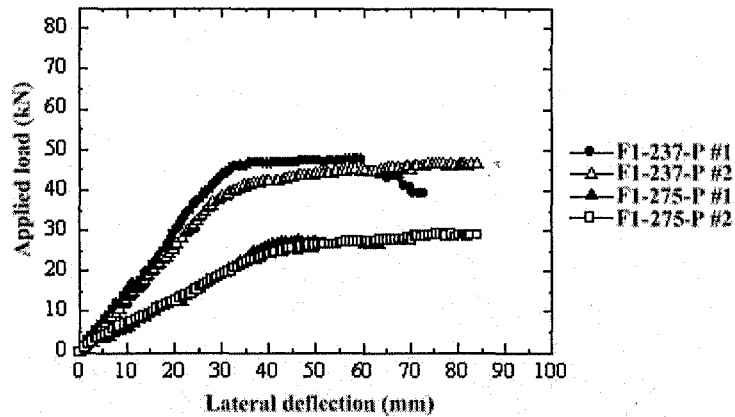
ไม่ได้นำพฤติกรรมในช่วงนี้มาพิจารณาเนื่องจากทำการ preloading ผนังถึงประมาณ 25% ของกำลังโมเมนต์ดัดที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกก่อนทำการทดสอบจริง

จากการสังเกตในระหว่างทดสอบผนังพบว่า ในช่วงเส้นตรงแรก วัสดุที่ใช้ก่อสร้างผนังตัวอย่างทดสอบเกิดรอยแตกร้าวน้อยมาก และจากการวิเคราะห์หน้าตัดของผนังตัวอย่างทดสอบพบว่า วัสดุมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงเส้นตรง (linear) อย่างไรก็ตาม ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกนี้พบว่า มีการแยกตัวของก้อนคอนกรีตบล็อกที่ผิวรับแรงดึงของผนังตัวอย่างทดสอบเล็กน้อย จากนั้น ในช่วงที่สอง ความชันของกราฟมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีค่าเท่ากับความชันของช่วงเส้นตรงที่สอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขึ้นของค่าการโก่งตัวของผนัง และการแยกตัวของก้อนคอนกรีตบล็อกมีความชัดเจนมากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงบริเวณกึ่งกลางความสูงของผนัง การลดลงของความชันน่าจะมีสาเหตุมาจากการคราก (yielding) ของเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็นหลัก

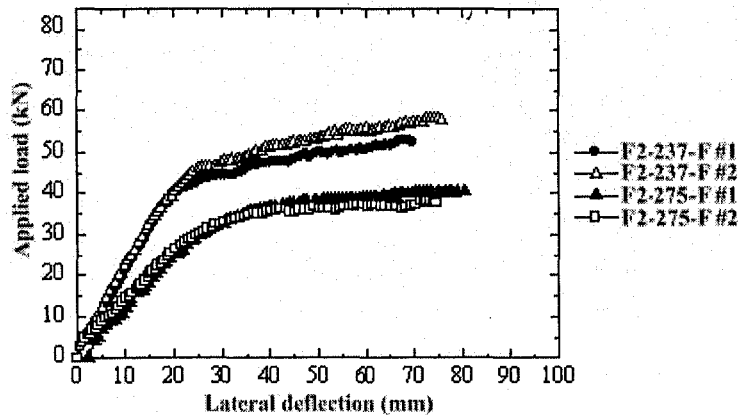
ในช่วงที่สาม กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงเหมือนช่วงแรก แต่มีความชันต่ำกว่าค่อนข้างมาก จากการสังเกตพบว่า ในช่วงนี้ การแยกตัวของก้อนคอนกรีตที่ผิวรับแรงดึงออกจากกันมีความชัดเจนมาก อย่างไรก็ดี เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงว่าแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นโดยส่วนใหญ่ น่าจะถูกรองรับโดยวัสดุที่ยังคงมีพฤติกรรมแบบเส้นตรง ซึ่ง ได้แก่ คอนกรีตบล็อกและปูนกรอก โดยเหล็กเสริมรับแรงดึงที่เกิดการ yielding จะมีความสามารถในการรับแรงที่คงที่ ซึ่งจะทำให้แกนสะเทิน (Neutral axis) ของหน้าตัดของผนังเลื่อนตัวเข้าใกล้ผิวของผนังที่รับแรงกดอัดอย่างรวดเร็วและทำให้การโก่งตัวด้านข้างเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน อย่างไรก็ดีตาม การวัดค่าการโก่งตัวทางด้านข้างของผนังตัวอย่างทดสอบทดสอบจะถูกพิจารณาว่าสิ้นสุดเมื่อค่าการโก่งตัวมีค่าเท่ากับ ความยาวระหว่างจุดรองรับของผนังหารด้วย 40 เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้กับ dial gauge และอุปกรณ์อื่นๆ นอกจากนั้นแล้ว ค่าการโก่งตัวดังกล่าวยังเป็นค่าการโก่งตัวที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการโก่งตัวที่ใช้ในการใช้งานจริงของผนัง จากการทดสอบพบว่า ที่จุดดังกล่าว ผนังมีความสามารถในการรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ จากจุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกเท่านั้น

ในช่วงที่สาม กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงเหมือนช่วงแรก แต่มีความชันต่ำกว่าค่อนข้างมาก จากการสังเกตพบว่า ในช่วงนี้ การแยกตัวของก้อนคอนกรีตที่ผิวรับแรงดึงออกจากกันมีความชัดเจนมาก อย่างไรก็ดี เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงว่าแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นโดยส่วนใหญ่ น่าจะถูกรองรับโดยวัสดุที่ยังคงมีพฤติกรรมแบบเส้นตรง ซึ่ง ได้แก่ คอนกรีตบล็อกและปูนกรอก โดยเหล็กเสริมรับแรงดึงที่เกิดการ yielding จะมีความสามารถในการรับแรงที่คงที่ ซึ่งจะทำให้แกนสะเทิน (Neutral axis) ของหน้าตัดของผนังเลื่อนตัวเข้าใกล้ผิวของผนังที่รับแรงกดอัดอย่างรวดเร็วและทำให้การโก่งตัวด้านข้างเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน อย่างไรก็ดีตาม การวัดค่าการโก่งตัว

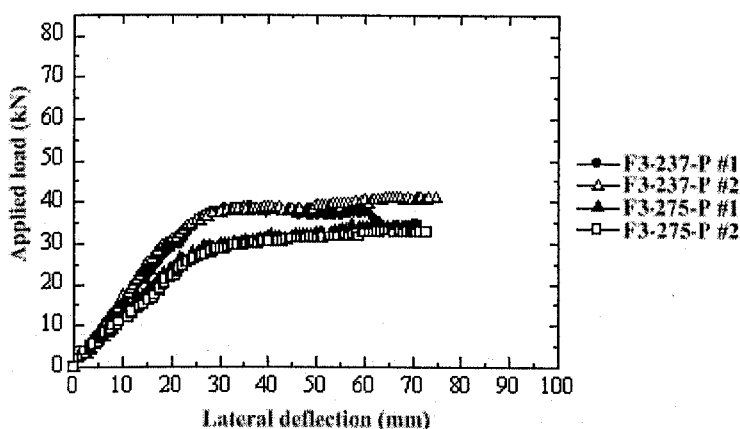
ทางด้านข้างของผนังตัวอย่างทดสอบทดสอบจะถูกพิจารณาว่าสิ้นสุดเมื่อค่าการโก่งตัวมีค่าเท่ากับ ความยาวระหว่างจุดรองรับของผนังหารด้วย 40 เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้กับ dial gauge และอุปกรณ์อื่นๆ นอกจากนั้นแล้ว ค่าการโก่งตัวดังกล่าวยังเป็นค่าการโก่งตัวที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการโก่งตัวที่ใช้ในการใช้งานจริงของผนัง จากการทดสอบพบว่า ที่จุดดังกล่าว ผนังมีความสามารถในการรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ จากจุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกเท่านั้น



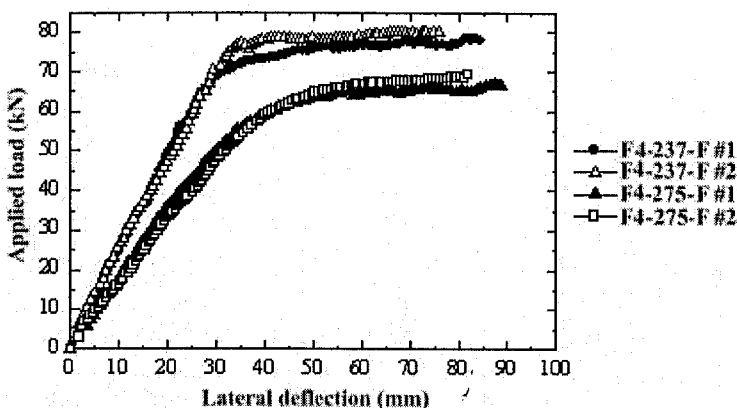
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.27% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.23% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.48% และกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่อง



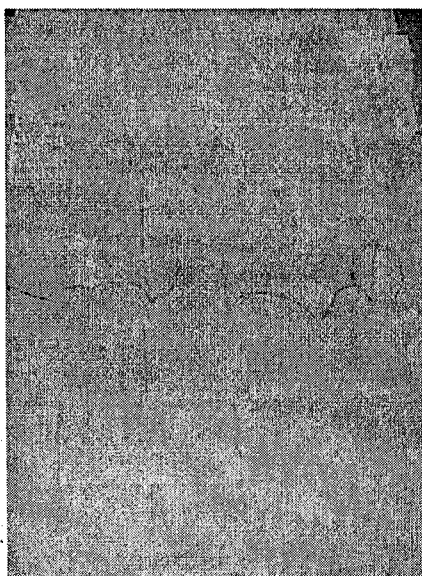
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.41% และกรอกปูนกรอกทุกช่อง

4.3.2. รูปแบบการวิบัติของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงดัด

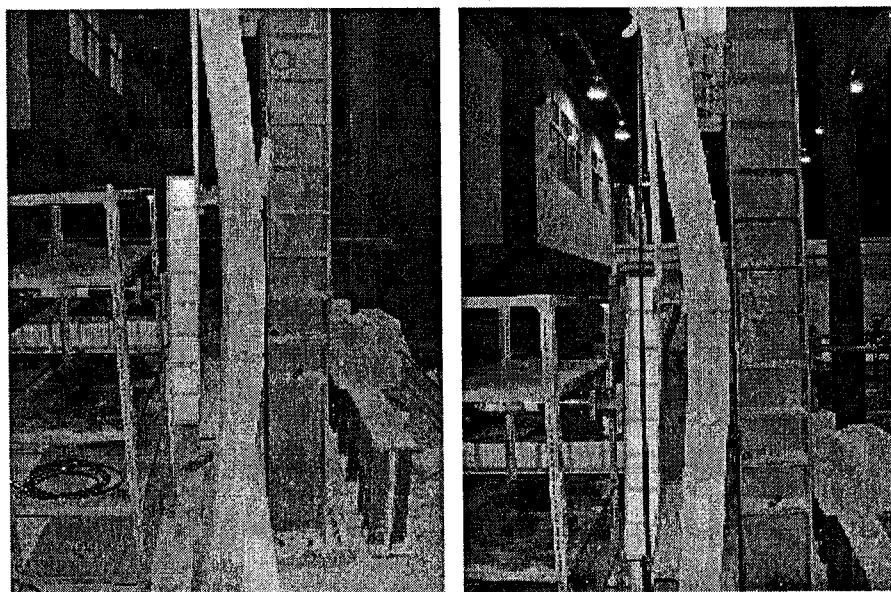
จากการเพิ่มแรงกระทำต่อผนังตัวอย่างทดสอบอย่างช้าๆ และต่อเนื่องจนผนังเกิดการวิบัติพบว่า ผนังโดยส่วนใหญ่มีการวิบัติที่ผิวรับแรงกดอัดของผนัง ในรูปของการอัดแตก (crushing) โดยเฉพาะในส่วนของก้อนคอนกรีตบล็อก ผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.23% และ 0.27% มีรอยแตกร้าวแบบสุ่มเกิดขึ้นที่ผิวรับแรงกดอัดของผนัง ในขณะที่ผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.41% และ 0.47% มีรอยแตกร้าวแบบบดแตกเกิดขึ้นบริเวณกลางช่วงความสูงของผนัง ดังแสดงในรูปที่ 4.26

รูปที่ 4.27 (a) และรูปที่ 4.27 (b) แสดงตัวอย่างของลักษณะการโก่งตัวทางด้านข้างที่จุดวิบัติของผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.23% และผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.41% ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่า ผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.23% ไม่เกิดการหักที่ชัดเจนที่บริเวณกลางช่วงความสูงของผนัง แต่ผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.41% เกิดการหักที่บริเวณกลางช่วงความสูงของผนัง

อย่างไรก็ตาม การวิบัติทั้งสองกรณีเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) โดยมีการโก่งตัวทางด้านข้างที่สูงมากก่อนเกิดการวิบัติ ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับคานที่มีการเสริมเหล็กแบบ under-reinforcement พฤติกรรมดังกล่าวจะเป็นเครื่องเตือนภัยให้ผู้อยู่อาศัยสามารถเคลื่อนย้ายทรัพย์สินที่มีค่าออกจากภายนอกอาคารได้ทันก่อน โครงสร้างจะเกิดการวิบัติ



รูปที่ 4.26 ลักษณะของรอยบดแตกที่เกิดขึ้นในด้านรับแรงกดอัดของผนัง



(a)

(b)

รูปที่ 4.27 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติผนังภายใต้แรงดัด a) ผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.23%

b) ผนังที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม 0.41%

4.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงดัด ตารางที่ 4.6 ค่าแรงกระทำที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกเฉลี่ย ค่าโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกเฉลี่ย และค่าความแกร่งดัดเฉลี่ยของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงดัด โดยคุณสมบัติทางกลของผนังที่พิจารณานี้เป็นคุณสมบัติทางกลที่อยู่ในช่วงเส้นตรงแรกของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวทางด้านข้าง เนื่องจากช่วงดังกล่าวเป็นช่วงใช้งานจริงของผนัง ผ่านช่วงนี้ไปแล้ว ผนังจะมีค่าการโก่งตัวที่สูงมาก

รูปที่ 4.28 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกเฉลี่ยและอัตราส่วนเหล็กเสริม และรูปที่ 4.29 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งดัดเฉลี่ยและอัตราส่วนเหล็กเสริม ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกใช้ในการวิจารณ์และเปรียบเทียบผลการทดสอบใน subsection ต่อไป

4.3.4 ผลของอัตราส่วนเหล็กเสริม ระยะห่างระหว่างจตุรรองรับ และรูปแบบการกรอกปูนกรอกต่อโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกเฉลี่ย

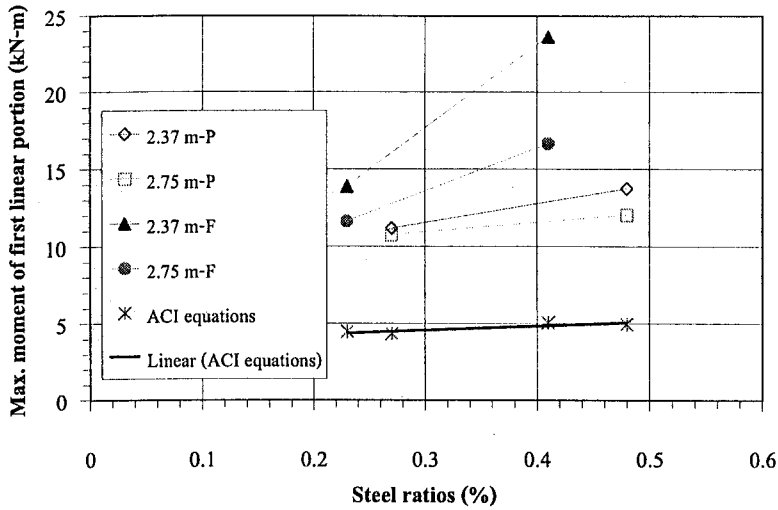
จากตารางที่ 4.6 และจากรูปที่ 4.28 พบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเหล็กเสริม 76% (จาก 0.27% เป็น 0.48% ในกรณีกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่องและ 0.23% เป็น 0.41% ในกรณีกรอกปูนกรอกทุกช่อง) ทำให้โมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกเฉลี่ยของผนังแบบกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่องเพิ่มขึ้น 23% และ 12% สำหรับระยะห่างระหว่างจตุรรองรับ 2.37 m. และ 2.75 m. ตามลำดับ และของผนังแบบกรอกปูนกรอกทุกช่องเพิ่มขึ้น 70% และ 43% สำหรับระยะห่างระหว่างจตุรรองรับ 2.37 m. และ 2.75 m. ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่า อัตราส่วนเหล็กเสริมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรก โดยมีผลมากขึ้นอยู่กับรูปแบบการกรอกปูนกรอกและระยะห่างระหว่างจตุรรองรับ โดยที่การกรอกปูนกรอกทุกช่องจะเพิ่มโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกมากกว่าการกรอกปูนช่องเว้นช่อง (70% และ 23% เปรียบเทียบกับ 43% และ 12%) และระยะห่างระหว่างจตุรรองรับที่น้อยกว่า (2.37 m.) จะเพิ่มโมเมนต์ดัดที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกมากกว่าระยะห่างระหว่างจตุรรองรับที่มากกว่า (2.75 m.) (70% และ 43% เปรียบเทียบกับ 23% และ 12%) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์ดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับการลดลงของระยะห่างระหว่างจตุรรองรับคือ 16% สำหรับผนังประเภทเดียวกัน

ตารางที่ 4.6 ค่าแรงกระทำที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกเฉลี่ย ค่าโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกเฉลี่ย และค่าความแกร่งคดเฉลี่ยของผนังภายใต้แรงคด

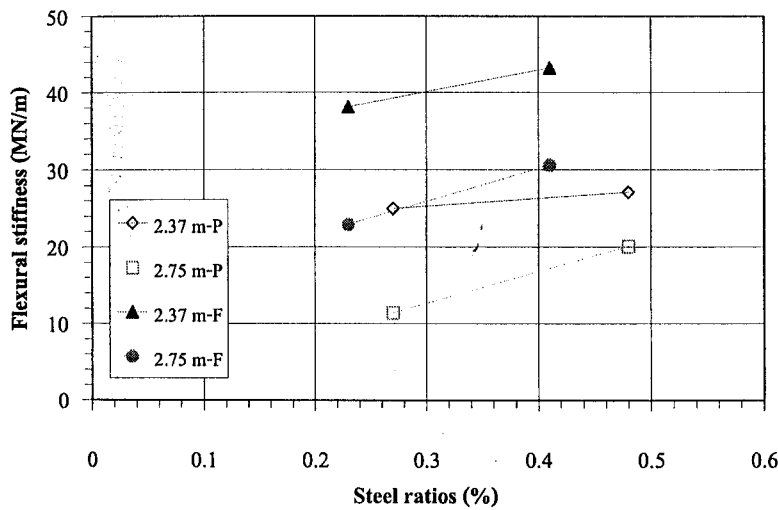
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	อัตราส่วนเหล็กเสริม (%)	ระยะห่างของจุดรองรับ (m.)	แรงกระทำ (kN)	โมเมนต์ (kN – m)	ความแกร่งคด (MN/m)
F1-237-P	0.27	2.37	28.29	11.17	24.95
F1-275-P	0.27	2.75	23.46	10.75	11.40
F2-237-F	0.23	2.37	35.15	13.88	38.11
F2-275-F	0.23	2.75	25.35	11.62	22.89
F3-237-P	0.48	2.37	34.76	13.73	27.11
F3-275-P	0.48	2.75	26.27	12.04	20.08
F4-237-F	0.41	2.37	59.83	23.63	43.19
F4-275-F	0.41	2.75	36.31	16.64	30.56

4.3.5 ผลของอัตราส่วนเหล็กเสริม ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ และรูปแบบการรอกปูนรอกต่อความแกร่งคดเฉลี่ย

จากตารางที่ 4.6 และจากรูปที่ 4.29 พบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเหล็กเสริม 76% (จาก 0.27% เป็น 0.48% ในกรณีรอกปูนรอกช่องเว้าช่องและ 0.23% เป็น 0.41% ในกรณีรอกปูนรอกทุกช่อง) ทำให้ความแกร่งคดเฉลี่ยของผนังแบบรอกปูนรอกช่องเว้าช่องเพิ่มขึ้น 42 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ ผนังแบบรอกปูนรอกทุกช่องมีความแกร่งคดเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 23 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการที่เพิ่มขึ้นนี้ก็เนื่องมาจาก การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเหล็กเสริมทำให้พื้นที่ของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถต้านทานการโก่งตัวทางด้านข้างของผนังได้มากขึ้น นอกจากนั้นแล้ว การลดลงของระยะห่างระหว่างจุดรองรับคือ 16% ทำให้ความแกร่งคดเฉลี่ยของผนังประเภทเดียวกันเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 33% และการรอกปูนรอกทุกช่องจะเพิ่มโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกมากกว่าการรอกปูนรอกช่องเว้าช่องโดยเฉลี่ยประมาณ 36%



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกและอัตราส่วนเหล็กเสริม



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแกร่งดัดและอัตราส่วนเหล็กเสริม

4.3.6 เปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกที่ได้จากการทดสอบกับสมการออกแบบของ ACI

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกของผนังที่ได้จากการทดสอบและโมเมนต์ที่ยอมรับที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ ACI (สมการที่ 2.13 และ 2.14) โดยที่ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดที่ยอมรับให้ของผนังนั้น ความกว้างประสิทธิภาพต่อเหล็กเสริม 1 เส้นของผนังแบบกรอกปูนกรอกทุกช่องมีค่าเท่ากับ 195 mm. และแบบกรอกปูนกรอกช่องเว้นช่องมีค่า

เท่ากับ 390 mm. เนื่องจากระยะ center-to-center ของเหล็กเสริมเป็นตัวควบคุมความกว้างดังกล่าว นอกจากนั้นแล้ว ในกรณีนี้ไม่ได้นำเหล็กบนที่รับแรงกดอัดมาพิจารณา ตามเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้ว ใน subsection ที่ 2.4

ขอให้ทราบด้วยว่า ในการใช้สมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) เทอมหน่วยแรงกดอัดเนื่องจากแรงดัดที่ยอมให้ของวัสดุก่อหรือ F_c มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 3.33 สำหรับข้อกำหนดในการออกแบบของ ACI และเท่ากับ 3.0 สำหรับข้อกำหนดในการออกแบบของ ว.ส.ท. และเทอมหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็กเสริมหรือ F_s มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.0 สำหรับเหล็กเกรด 40 และ 50 และ 2.5 สำหรับเหล็กเกรด 60 ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งของ ACI และของ ว.ส.ท. ดังนั้น ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปนี้จะใช้ข้อกำหนดในการออกแบบของ ACI เป็นหลัก เนื่องจาก conservative กว่าของ ว.ส.ท. เล็กน้อย

จากตารางที่ 4.7 และโดยการทำ normality test พบว่า ข้อมูลอัตราส่วนความปลอดภัยของ ACI มีค่า correlation (R-value) เท่ากับ 0.95 ซึ่งถือได้ว่าข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายแบบ normal และค่าโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกมีค่ามากกว่าค่าโมเมนต์ที่ยอมให้ที่คำนวณจากสมการของ ACI โดยมีอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ระหว่าง 1.84 ถึง 2.93 (โดยมีค่าเฉลี่ย 2.32 และค่า COV เท่ากับ 0.17) จากการวิเคราะห์ทางสถิติข้อมูลอัตราส่วนความปลอดภัยของ ACI พบว่า สมการของ ACI ให้ค่า probability of failure ของอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1/1950 ซึ่งสูงกว่าค่าของ probability of failure ที่แนะนำ (Harr, M.E. (1987). Reliability-Based Design in Civil Engineering. 1st Ed. McGraw-Hill. New York.) ประมาณ 5 เท่า นอกจากนั้นแล้ว ค่าต่ำสุดของข้อมูลอัตราส่วนความปลอดภัยของ ACI ยังมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 2.5 ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างวัสดุก่อภายใต้แรงดัดค่อนข้างมาก (Matthys, J.H. (1993). Masonry Designer's Guide. The Masonry Society. CO. USA.) ดังนั้น ข้อกำหนดของหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุก่อควรที่ถูกดัดแปลงให้สอดคล้องกับผลการทดสอบ ขอให้ทราบด้วยว่า ข้อกำหนดของหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็กเสริมจะไม่ถูกปรับในที่นี้เนื่องจากการใช้ปูนก่อในผนังไม่มีผลต่อกำลังรับแรงดัดของเหล็กเสริมโดยตรง นอกจากนั้นแล้ว ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเหล็กเสริมที่ใช้อู่เป็นค่าที่ได้รับการยอมรับมาเป็นเวลานานแล้ว โดยไม่มีการปรับแก้ไขใดๆ

เนื่องจากไม่มีผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า หน่วยแรงกดอัดเนื่องจากแรงดัดมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงกดอัดเนื่องจากแรงกดอัด ดังเช่นในกรณีของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบใช้ปูนก่อ (Commentary on Building Code Requirements for Masonry Structure (ACI 530-99/ASCE 5-99/TMS 402-99). (1999). Masonry Jointed Committee. American Concrete Institute/American Society of Civil Engineer/The Masonry Society. CO.) ดังนั้น ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของ F_c ของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบใช้ปูนก่อควรมีค่าเท่ากับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของ

หน่วยแรงกดอัดที่ยอมให้ในกรณีรับแรงกดอัด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.225 f'_m$ จากการคำนวณจะได้ค่าโมเมนต์ที่ยอมให้และอัตราส่วนความปลอดภัย ดังที่แสดงในตารางที่ 4.7 ในกรณีนี้ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อแรงคดของผนังมีค่าอยู่ระหว่าง 2.36 ถึง 3.82 (โดยมีค่าเฉลี่ย 2.82 และค่า COV เท่ากับ 0.17) จากการวิเคราะห์ทางสถิติข้อมูลอัตราส่วนความปลอดภัย พบว่า ข้อกำหนดของหน่วยแรงกดอัดที่ยอมให้ดังกล่าวให้ค่า probability of failure ของอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ $1/14700$ ซึ่งสูงกว่าค่าของ probability of failure ที่แนะนำ $1/10000$ มากพอสมควร และมี reliability index เท่ากับ 3.82

ตารางที่ 4.7 ค่าโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกของผนังที่ได้จากการทดสอบและค่าโมเมนต์ที่ยอมให้ และค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

ชื่อตัวอย่าง ทดสอบ	โมเมนต์ที่ได้ จากการทดสอบ (e) (kN - m)	โมเมนต์ที่ยอม ให้จากสมการที่ 2.13 และ 2.14 (f) (kN - m)	โมเมนต์ที่ยอม ให้จากการ ปรับแก้ ข้อกำหนด (g) (kN - m)	อัตราส่วน ความ ปลอดภัย จาก e/f	อัตราส่วน ความ ปลอดภัย จาก e/g
F1-237-P	9.17	4.16	3.71	2.21	2.47
F1-275-P	8.75	4.16	3.71	2.10	2.36
F2-237-F	13.88	4.74	4.74	2.93	2.93
F2-275-F	11.62	4.74	4.74	2.45	2.45
F3-237-P	13.73	6.54	4.43	2.10	3.10
F3-275-P	12.04	6.54	4.43	1.84	2.72
F4-237-F	23.63	8.17	6.19	2.89	3.82
F4-275-F	16.64	8.17	6.19	2.04	2.69

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและแรงดัดที่กระทำกับผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงที่ทดสอบได้ของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อกับสมการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กของ American Concrete Institute ACI 530-92 และของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1005-18 และพัฒนาสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อ

5.1 ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัด

จากการทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน โดยผนังดังกล่าวถูก preloading ถึงประมาณ 30% ของแรงกดอัดสูงสุดของผนัง เพื่อการจัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงแรก (ดู subsection ที่ 4.1.4 และ 4.2.1) พบว่า พฤติกรรมการรับแรงกดอัดของผนังสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรกผนังมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนถึงค่าแรงกดอัดประมาณ 65-80% ของแรงกดอัดสูงสุดของผนัง ที่จุดสิ้นสุดของพฤติกรรมในช่วงนี้จะเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวเกิดขึ้นบนก้อนคอนกรีตบล็อก โดยเฉพาะใต้แผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน (bearing plate) ช่วงที่สอง ความชันของกราฟจะเริ่มค่อยๆ ลดลง เนื่องจากรอยแตกร้าวใต้แผ่นเหล็กรับแรงแบกทานเกิดการขยายตัวเข้าสู่ตัวผนังมากขึ้น โดยมีลักษณะเหมือนทแยงทำมุมกับแนวตั้งประมาณ 20-30 องศา ทำให้แรงกดอัดที่กระทำกับผนังเพิ่มขึ้นน้อยลงในขณะที่ระยะหดตัวในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่ผนังรับแรงกดอัดสูงสุด ช่วงที่สาม แรงที่กระทำต่อผนังจะตกลงอย่างรวดเร็วโดยที่ระยะหดตัวในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงมาก โดยการวิบัติของผนังในลักษณะนี้เป็นการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) และเป็นการวิบัติเนื่องจากกำลังของวัสดุ (material failure) ในรูปของการบดแตก (crushing) ของก้อนคอนกรีตบล็อกและปูนกรอกใต้แผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 ตัวแปรได้แก่ อัตราส่วนความชะลูด (ความสูงของผนัง) อัตราส่วนเหล็กเสริม และรูปแบบการกรอกปูนกรอก จากการศึกษาพบว่า เมื่ออัตราส่วนความชะลูดของผนังมีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว แรงกดอัดที่เกิดรอยแตกร้าวแรกและแรงกดอัดสูงสุดของผนังมีค่าลดลง โดยมีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับเทอม slenderness reduction factor ของสมการของ ACI อย่างไรก็ตาม ภายใต้ค่าอัตราส่วนเหล็กเสริมและรูปแบบการกรอกปูนกรอกที่ศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเหล็กเสริมของผนัง 76% และการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ของปูนกรอก 100% ไม่มีผลทำให้กำลังรับแรงกดอัดของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

จากการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดที่ทดสอบได้ของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนกับสมการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กของ ACI และของ ว.ส.ท. พบว่าสมการออกแบบของผนังดังกล่าวควรอยู่ในรูป

$$P'_a = 0.225 f'_m A_n \left[1 - \left(\frac{h}{140r} \right)^2 \right] \quad \text{เมื่อ } \frac{h}{r} \leq 99$$

โดยมีอัตราส่วนความปลอดภัยของสมการอยู่ระหว่าง 3.70 ถึง 5.95 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.78 และมีค่า COV เท่ากับ 0.21 ในการใช้สมการนี้ ข้อที่ต้องพิจารณาคือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิของผนังที่รองรับแรงกระทำควรเป็นพื้นที่ที่อยู่ใต้แผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน นอกจากนั้นแล้ว รายละเอียดต่างๆ ในการออกแบบเช่น ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ การทดสอบวัสดุ และการวางเหล็กเสริมต่างๆ เป็นต้น จะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดต่างๆ ของ ACI และจะต้องทำการก่อสร้างผนังให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรมด้วย

5.2 ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงดัด

จากการทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงดัดพบว่า พฤติกรรมการรับแรงดัดของผนังถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นช่วงเส้นตรงที่มีความชันมาก ช่วงที่สองเป็นช่วงที่เส้นกราฟเป็นเส้นโค้งมีความชันลดลงอย่างต่อเนื่อง และช่วงที่สามเป็นช่วงเส้นตรงที่มีความชันน้อยกว่าช่วงแรก โดยเหล็กเสริมจะเริ่มมีการครากที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรก และโมเมนต์ดัดที่จุดสิ้นสุดการทดสอบมีค่าสูงกว่าที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรก 10-30% นอกจากนั้นแล้ว การวิบัติของผนังเกิดขึ้นที่ผิวรับแรงกดอัดของผนังในรูปของการอัดแตก (crushing) ของก้อนคอนกรีตบล็อก โดยการวิบัติของผนังในลักษณะนี้เป็นการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) โดยมีการแตกร้าวที่บริเวณกึ่งกลางความสูงของผนังที่สูงมากและผนังมีการโก่งตัวที่มากสูงที่จุดวิบัติ

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 ตัวแปรได้แก่ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ อัตราส่วนเหล็กเสริม และรูปแบบการกรอกปูนกรอก จากการศึกษาคพบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างจุดรองรับเพิ่มขึ้น กำลังรับโมเมนต์ดัดที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกของผนังประเภทเดียวกันมีค่าลดลงเฉลี่ยใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างจุดรองรับ การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัย 76% ทำให้โมเมนต์ดัดที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 42% โดยที่การกรอกปูนกรอกทุกช่องจะเพิ่มโมเมนต์ดัดที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกมากกว่าการกรอกปูนช่องเว้นช่องโดยเฉลี่ยประมาณ 36%

ในการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อที่คิดเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดัดเท่านั้น ค่าโมเมนต์ที่ยอมให้เป็นค่าโมเมนต์ดัดที่ยอมให้ที่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการ

$$M_m = \frac{b_e d^2 k_j F_b}{2} \quad \text{ควบคุมโดยหน่วยแรงกดอัดที่ยอมให้ของวัสดุก่อ}$$

$$M_t = A_s j d F_s \quad \text{ควบคุมโดยหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม}$$

โดยที่เทอมหน่วยแรงกดอัดเนื่องจากแรงดัดที่ยอมให้ของวัสดุก่อหรือ F_b และเทอมหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมหรือ F_s มีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งของ ACI และของ ว.ส.ท. โดยข้อกำหนดในการออกแบบของ ACI conservative กว่าของ ว.ส.ท. เล็กน้อย ดังนั้น ในการศึกษาจึงใช้ข้อกำหนดในการออกแบบของ ACI ในการหาค่าโมเมนต์ที่ยอมให้ และจากการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเส้นตรงแรกของผนังที่ได้จากการทดสอบและโมเมนต์ที่ยอมให้พบว่า F_b ของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อควรมีค่าเท่ากับ $0.225 f'_m$ ซึ่งจะทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่อแรงดัดของผนังมีค่าอยู่ระหว่าง 2.36 ถึง 3.82 โดยมีค่าเฉลี่ย 2.82 และค่า COV เท่ากับ 0.17 นอกจากนี้แล้วผู้ออกแบบจะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดต่างๆ ของ ACI เช่น ความกว้างประสิทธิภาพต่อเหล็กเสริม 1 เส้น และรายละเอียดการเสริมเหล็ก เป็นต้น และจะต้องทำการก่อสร้างผนังให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรมด้วย

5.3 ข้อจำกัดในงานวิจัยและข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

จากการศึกษาพฤติกรรมและการวิบัติของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและแรงดัดทำให้เข้าใจพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดและแรงดัดและได้สมการออกแบบที่เหมาะสมของผนังดังกล่าว ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความปลอดภัยเฉลี่ย 4.78 และ 2.82 ในกรณีรับแรงกดอัดในแนวแกนและแรงดัด ตามลำดับ ซึ่งน่าจะครอบคลุมความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นในการก่อสร้าง ความบกพร่องของวัสดุ การเสื่อมสภาพเนื่องจากการกัดเซาะ (weathering) การผุกร่อน (corrosion) และการย่อยสลาย และการวิบัติโครงสร้าง เมื่อ โครงสร้างถูกกระทำโดยแรงที่มีค่ามากกว่าที่ใช้ในการออกแบบ อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในการใช้งานจริงอยู่หลายประเด็นคือ

1. ในการศึกษาผนังถูกทดสอบโดยให้แรงกดอัดในแนวแกนกระทำผ่านแผ่นเหล็กรับแรงแบกทานเท่านั้น ซึ่งเป็นที่ทราบคืออยู่แล้วว่า การกระจายแรงในผนังในกรณีนี้จะแตกต่างจากกรณีที่ผนังถูกกระทำโดยแรงแผ่กระจายและกรณีที่ผนังมีคานเอ็น (bond beam) รองรับแรงกระทำ ซึ่งจะช่วยให้การแผ่กระจายแรงในผนังได้ดีขึ้นและช่วยทำให้การออกแบบผนังมีความประหยัดเนื่องจากพื้นที่รับแรงของผนังมีขนาดใหญ่ขึ้น

2. สมการที่เสนอข้างต้นยังไม่ได้รับการตรวจสอบในกรณีที่ผนังถูกกระทำโดยแรงกระทำเนื่องจากแรงกดอัดในแนวแกนและแรงดัดร่วมกันโดยตรงได้ ซึ่งน่าจะมีการศึกษาต่อไปในอนาคตแต่ในเบื้องต้น การใช้สมการ interaction ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและแรงดัดดังที่เสนอในมาตรฐานของ ACI โดยมีพื้นฐานการคำนวณหน่วยแรงที่ยอมให้จากสมการที่เสนอน่าจะให้ผลที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากสมการดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของหน่วยแรงใช้งาน (working stress)

เช่นเดียวกับมาตรฐานการออกแบบ ACI 530-92

3. ในกรณีที่ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อถูกกระทำโดยแรงกดอัดในแนวแกนที่ทำให้เกิดหน่วยแรงในผนังที่ใกล้เคียงกับค่าของหน่วยแรงที่ยอมให้แล้ว วัสดุที่ใช้ก่อสร้างผนัง โดยเฉพาะก้อนคอนกรีตบล็อกและปูนก่อ อาจจะมีการคืบ (creep) เกิดขึ้น ซึ่งอัตราส่วนความปลอดภัยที่ใช้น่าจะครอบคลุมพฤติกรรมดังกล่าวได้พอสมควร อย่างไรก็ตาม การเข้าใจพฤติกรรมการคืบมีส่วนสำคัญในการเข้าใจการตอบสนองต่อแรงกระทำในระยะยาวจึงควรได้รับการศึกษาต่อไปในอนาคต

4. การออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อให้สามารถรับแรงเฉือนในระนาบและแรงเฉือนแนวขวางเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ควรได้รับการศึกษา เนื่องจากจะนำไปสู่การใช้งานผนังดังกล่าวแบบ shear wall

5. เนื่องจากลักษณะการก่อสร้างผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กเป็นแบบไร้ปูนก่อและผิวสัมผัสของก้อนคอนกรีตบล็อกมักจะไม่มีผิวสัมผัสที่สมบูรณ์ ดังนั้น ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงเมื่อถูกกระทำโดยแรงกระทำครั้งแรก ในการก่อสร้างโครงสร้างที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าว จะต้องพิจารณาหาทางป้องกันหรือลดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวเช่น โดยการ preloading ผนัง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบพบว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวน่าจะสิ้นสุดในระหว่างก่อสร้าง ถ้าน้ำหนักของโครงสร้างอาคารและน้ำหนักคงที่อื่นๆ ที่กระทำต่อผนังทำให้เกิดหน่วยแรงในผนังเกิน 15% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุดของผนัง

6. เนื่องจากลักษณะการก่อสร้างผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อทำให้เกิดช่องว่างระหว่างก้อนคอนกรีตบล็อกและมีปูนกรอกซึมออกมาบริเวณรอยต่อของก้อนคอนกรีตบล็อก ดังนั้น ควรมีการป้องกัน เช่น ทำการอุดช่องว่างระหว่างรอยต่อของก้อนคอนกรีตบล็อกโดยใช้ surface bonding cement ก่อนเทพูนกรอกและ/หรือฉาบผนังด้วย fiber reinforced surface bonding cement เพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากสภาวะอากาศ

7. ในหลายกรณี ผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อจะต้องมีช่องเปิดเพื่อติดตั้งประตูหรือหน้าต่าง ซึ่งทำให้การกระจายแรงที่เกิดขึ้นภายในผนังแตกต่างกับผนังไม่เจาะช่อง ดังนั้น ควรมีการศึกษาถึงผลของช่องเปิดภายในผนังด้วย

8. ผู้ออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อจะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดต่างๆ ของ ACI และรายละเอียดการเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม และจะต้องทำการก่อสร้างผนังให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรมด้วย นอกจากนั้นแล้ว ตัวแปรที่มีความสำคัญมากในการก่อสร้างผนังดังกล่าวคือ ความสมบูรณ์ของก้อนคอนกรีตบล็อก ซึ่งจะต้องมีรูปร่างที่ได้เหลี่ยมมุมที่สมบูรณ์และมีผิวหน้าที่เรียบทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง

บรรณานุกรม

- ACI 530-99 Building Code Requirements for Masonry Structures (ACI 530-99/ASCE 5-99/TMS 402-99). (1999). Masonry Jointed Committee. American Concrete Institute/American Society of Civil Engineer/The Masonry Society. CO. USA.
- Amamurthy, K., Sathish V., and Ambalavanan, R. (2000). Compressive Strength Prediction of Hollow Concrete Block Masonry Prisms. *ACI Structural Journal*. 97: 61-67.
- AS 3700-1998 Masonry Structure. (1998). Standard Australia International. Australia.
- ASTM C78-00. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). (2000). Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials. PA. USA.
- ASTM C90-96 Standard Specification for Load Bearing Concrete Masonry Units. (1996). Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials. PA. USA.
- ASTM C140-96 Standard Test Method of Sampling and Testing Concrete Masonry Units. (1996). Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials. PA. USA.
- ASTM C143-96 Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. (1996). Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials. PA. USA.
- ASTM C270-00. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. (2000). Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials. PA. USA.
- ASTM C476-99 Standard Specification for Grout for Masonry. (1999). Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials. PA. USA.
- ASTM C1019-89a Standard Test Method of Sampling and Testing Grout. (1989). Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials. PA. USA.
- ASTM E8-00b. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. (2000). Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials. PA. USA.
- ASTM E447-92b Standard Test Methods for Compressive Strength of Masonry Prisms. (1992). Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials. PA. USA.
- Commentary on Building Code Requirements for Masonry Structure (ACI 530-99/ASCE 5-99/TMS 402-99). (1999). Masonry Jointed Committee. American Concrete Institute/American Society of Civil Engineer/The Masonry Society. CO.
- Harr, M.E. (1987). Reliability-Based Design in Civil Engineering. 1st Ed. McGraw-Hill. New York.

- Hendry, A.W. (1991). Reinforced & Prestressed Masonry. Longman Scientific & Technical. NY. USA.
- Marzahn, G. (1997). Dry-Stacked Masonry in Comparison with Mortar Jointed Masonry. Leipzig Annual Civil Engineering Report, University of Leipzig. Germany.
- Marzahn, G. (1999). Investigation on the Initial Settlement of Dry-Stacked Masonry under Compression. Leipzig Annual Civil Engineering Report, University of Leipzig. Germany.
- Marzahn, G. (2000). A Study on the Creep Behavior of Dry-Stacked Masonry Walls and Individual Masonry Units. Leipzig Annual Civil Engineering Report, University of Leipzig. Germany.
- Matthys, J.H. (1993). Masonry Designer's Guide. The Masonry Society. CO. USA.
- Page, A.W. and Shrive, N.G. (1990). Concentrated Loads on Hollow Concrete Masonry. ACI Structural Journal. 87 (4): 436-444.
- Salzmann, D., Mojsilovic, N., and Marti, P. (1998). Load Test on Reinforced Masonry. Institute of Structural Engineering. ETH Zurich.
- Schneider, R.R. and Dickey, W.L. (1994). Reinforced Masonry Design. 3rd edition. Prentice Hall. NJ. USA.
- Rodriguez, R., Ahmad H.A., and Larraldo, J.. (1998). Flexural Behavior of Post-tensioned Concrete Masonry Walls Subjected to Out-of-plane Loads, ACI Structural Journal. 95: 61-70.
- Uzoegbo, H.C. and Coetzee, M. (2001). The Resistance of Mortarless Earth Block Walling System to Lateral Loading. The Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Singapore. Paper No.1017.
- ว.ส.ท. 1005-18 มาตรฐานออกแบบโครงสร้างวัสดุก่อ. (2518). วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพฯ.
- ปรีดา ไชยมหาวันและอนุสรณ์ อินทร์งษ์. (2544). ผลของปูนรอกต่อพฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุด. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 9 :11-23.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และจิรวัดน์ ไชยจารุณิช. (2544). กำลังรับแรกคอดของคอนกรีตบล็อกและ Prism ของคอนกรีตบล็อก. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 8(3): 131-137.
- อนิรุทธิ์ ชงไชย และอนุสรณ์ อินทร์งษ์. (2542). คอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กทางเลือกใหม่ของการก่อสร้างบ้านในเมืองไทย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 5. MAT -128-MAT-134.

ภาคผนวก ก. ข้อมูลกำลังรับแรงกดอัดของก้อนคอนกรีตบล็อก ปูนก่อ และปรีซีม

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลกำลังรับแรงกดอัดของก้อนคอนกรีตบดบล็อก

ตัวอย่างทดสอบที่	กำลังรับแรงกดอัด (MPa)
1	10097.24
2	10548.16
3	9688.32
4	8709.12
5	9860.96
6	9733.98
7	8586.60
8	9378.43
9	9278.53
10	9704.95
11	8641.94
12	8986.60
13	11264.32
14	9194.56
15	9483.52
16	8441.94
17	9860.96
18	10757.70
19	9888.32
20	9754.35
21	10874.88
22	9936.00
23	8236.84
24	10018.09
ค่าสูงสุด/ค่าต่ำสุด	11264.32/8236.84
ค่าเฉลี่ย	9621.9
ค่า standard deviation	782.5
ค่า coefficient of variation (%)	8.1

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลกำลังรับแรงกดอัดของปูนก่อ

ตัวอย่างทดสอบที่	กำลังรับแรงกดอัด (MPa)
1	18069.35
2	14742.27
3	14620.43
4	16232.43
5	19468.60
6	18800.37
7	16044.99
8	13983.13
9	18969.07
10	16301.78
11	16850.98
12	16632.24
13	17713.21
14	16435.43
15	18481.72
16	17347.70
17	16344.89
18	14414.25
19	14183.04
20	15554.83
21	15220.25
22	19797.01
23	14332.13
24	15757.60
ค่าสูงสุด/ค่าต่ำสุด	19797.01/13983.13
ค่าเฉลี่ย	16512.4
ค่า standard deviation	1751.9
ค่า coefficient of variation (%)	10.6

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลกำลังรับแรงกดอัดของปริซึม

ตัวอย่างทดสอบที่	กำลังรับแรงกดอัด (MPa)			
	ไร้ปูนก่อกรอก ปูน 1 ช่อง	ไร้ปูนก่อกรอก ปูน 2 ช่อง	มีปูนก่อกรอกปูน 1 ช่อง	มีปูนก่อกรอกปูน 2 ช่อง
1	10033.98	13753.04	8403.34	13163.13
2	9286.60	12789.82	9924.30	16294.91
3	8761.67	12485.85	10779.50	12485.08
4	7570.55	14589.94	8071.29	13719.06
5	8641.94	10976.17	10621.75	15711.66
6	7909.27	13989.45	10256.50	11578.10
7	8410.05	15165.38	9636.80	15711.66
8	9746.20	11748.20	8966.78	14584.07
9	6885.98	11290.96	11547.92	12989.22
ค่าสูงสุด	10033.98	15165.38	11547.92	16294.91
ค่าต่ำสุด	6885.98	10976.17	8071.29	11578.10
ค่าเฉลี่ย	8582.9	12976.5	9800.9	14026.3
ค่า standard deviation	1023.3	1485.4	1149.7	1636.4
ค่า coefficient of variation (%)	11.9	11.4	11.7	11.7

ภาคผนวก ข. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Seangatith, S. (2004) Mortarless Reinforced Concrete Masonry Wall under Concentrated Axial Load. The First International Conference of Asian Concrete Federation. Chiang Mai, Thailand. October 28-29.
2. Seangatith, S. (2005) Mortarless Reinforced Concrete Masonry Wall under Concentrated Axial Load and Transverse Load. Suranaree Journal of Science and Technology (Submitted for publication)

ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ-สกุล นายสิทธิชัย แสงอาทิตย์
Mr. Sittichai Seangatith
2. ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์
3. วันเดือนปีและสถานที่เกิด 19 สิงหาคม พ.ศ. 2511 ที่จังหวัดเพชรบุรี
4. สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

5. ประวัติการศึกษา

- Ph.D. in Civil Engineering** (1997), University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA
M.Eng. in Civil Engineering (1993), University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA
B.Eng. in Civil Engineering (1990), Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญ

Structural Engineering - Experimental and Applied Mechanics on Civil Engineering Fiber Reinforced Plastic Composite Materials and Structures, Reinforced Concrete, Masonry, and Steel. Finite Element Analysis.

7. ผลงานทางวิชาการ

7.1 บทความวิจัย

1. Seangatith, S., and Yuan, R.L., "Optimization of Pultruded GFRP Composite Bridge Railing System," Proceeding of the Forth National Workshop on Bridge Research in Progress, Buffalo, New York, 1996.
2. Yuan, R.L., and Seangatith, S., "Vibration Analysis of Simply Supported Pultruded GFRP Composite Beams under Dynamic Loads," The Third International Conference on Composite Engineering, New Orleans, Louisiana, 1996.
3. Seangatith, S., and Yuan, R.L., "Impact Analysis of Simply Supported FRP Thin-Walled Closed-Section Beams," The Fourth International Conference on Composite Engineering, Kohala Coast, Hawaii, 1997.
4. Seangatith, S., and Yuan, R.L., "Central Transverse Impact of Pultruded FRP Composite Box Beams," The Second International Conference on Composites in Infrastructures, Tucson, Arizona, 1998.

5. Seangatith, S., and Yuan, R.L., "Impact Analysis of FRP Composite Beams," ASCE Structural Engineers World Congress, San Francisco, California, 1998.
6. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, "คุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของวัสดุพลาสติกเสริมใยแก้ว," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, ชลบุรี, 24-26 มีนาคม 2542, หน้า MAT-202-MAT-207.
7. Seangatith, S., and Sriboonlue, W., "Axially Loaded Glass-Fiber Reinforced Plastic Composite Columns," The Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Kochi, Japan, August 27-29, 1999, pp. 1307-1312.
8. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, "การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของอิฐดินซีเมนต์เพื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญและอิฐมอญมาตรฐาน," วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 6, ฉบับที่ 2, พฤษภาคม-สิงหาคม 2542, หน้า 97-103
9. Seangatith, S., "Modified Moment-Area Method for Deep Cantilever Beams," Suranaree Journal of Science and Technology, Vol. 6, No 3, September-December, 1999, pp. 146-149.
10. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, "ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดอัดของ Prism อิฐดินเผาและกำลังรับแรงกดอัดของก้อนอิฐดินเผา," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6, เพชรบุรี, 10-12 มีนาคม 2543, หน้า MAT-113-MAT-118
11. Seangatith, S., "Behaviors of Axially Loaded GFRP Composite Equal-Legs Angle Columns," The Sixth National Convention on Civil Engineering, Petchaburi, Thailand, March 10-12, 2000, pp. STR-186-STR-191.
12. Seangatith, S., "Approximate Analysis of Beam-Column," Suranaree Journal of Science and Technology, Vol. 7, No 2, April-June, 2000, pp. 126-129.
13. Seangatith, S., "Structural Behaviors of Concentrically Loaded GFRP Angle Columns," The Seventh International Conference on Composite Engineering, Denver, Colorado, July 2-8, 2000, pp. 781-782.
14. Seangatith, S., "Optimization of Pultruded GFRP Beams Bonded with CFRP Plates," ACUN-3 International Composites Conference, Sydney, Australia, February 5-9, 2001, pp. 79-82.
15. วิมล สมสะอาด และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์, "การเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็ก," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7, กรุงเทพฯ, 2544
16. สิทธิชัย แสงอาทิตย์และจิรวัดน์ ไชยจารุณมิช, "กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตบล็อกและ Prism ของคอนกรีตบล็อก," วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 8, ฉบับที่ 3, กรกฎาคม-กันยายน 2544, หน้า 131-137

17. Seangatiith, S., and Yuan, R.L., "Experimental Investigation on Impact Responses of Pultruded GFRP Box Beams," The Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Singapore, December 5-7, 2001, Paper No. 1020.
18. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, "ผลของส่วนผสมต่อกำลังรับแรงกดอัดของมอร์ต้าร์," วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 9, ฉบับที่ 2, มีนาคม-มิถุนายน 2545, หน้า 103-108.
19. Seangatiith, S., "Mechanical Behaviors of GFRP Box Beams with Low Span-to-Depth Ratios Subjected to Three-Point Loading," The Eighth National Convention on Civil Engineering, Khon Kaen, Thailand, October 23-25, 2002, pp. MAT-121-MAT-125.
20. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และวิมล สมสะอาด, "พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นเหล็ก," วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, เมษายน-มิถุนายน 2546, หน้า 110-124.
21. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, "อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อหินปูนที่เหมาะสมในการผลิตอิฐบล็อก," เอกสารประกอบการสัมมนางานวิจัยของคณาจารย์ มทส. และความร่วมมือด้านการวิจัยในภาคอุดมศึกษา ประจำปี 2546, 18 สิงหาคม 2546, หน้า 156-158. (เสนอผลงานแบบโปสเตอร์)
22. Seangatiith, S., "Flexural Behaviors of Precast Prestressed Concrete Slabs Strengthened by Using Steel Plates," Proceeding of Seminar on SUT Research and Cooperation between Association of Higher Education Institutes in Nakhon Ratchasima, August 18, 2003, pp. 136-138. (Poster presentation)
23. Seangatiith, S., "Experimental Investigation on Flexural Behaviors of Precast Prestressed Concrete Slabs Strengthened by Using Steel Plates," The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Bali, Indonesia, December 16-18, 2003, pp. MMR-54-59.
24. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ ศาสตราจารย์ สุขประเสริฐ, "กำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมต่อแผ่นเหล็กโดยช่างเชื่อมในจังหวัดนครราชสีมา," วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 11, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม 2546 (ได้รับการตอบรับเพื่อตีพิมพ์)
25. ศรีชัย กำจัดโรค และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์, "เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน," การประชุมวิชาการนวัตกรรมทางวิศวกรรมสำหรับการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 23-24 มกราคม 2547.
26. Seangatiith, S., "GFRP Box Columns with Different Supports Subjected to Axial Compression," The Ninth National Convention on Civil Engineering, Phetchaburi, Thailand, May 19-21, 2004, Vol. 1, pp. STR-17-22.

27. สิทธิชัย เลิศวิชัย และสิทธิชัย แสงอาทิตย์ “Behaviors of Mortarless Reinforced Concrete Masonry Wall under Axial Compression,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6, เพชรบุรี, 19-21 พฤษภาคม 2547, เล่มที่ 1, หน้า STR-23-28.

7.2 บทความทั่วไป

1. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “แนวทางในการประเมินต้นทุนในการนำเศษคอนกรีตหักมาใช้เป็นมวลรวมหายาบในคอนกรีต,” วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1-2, มกราคม-มิถุนายน, 2544, หน้า 50-54
2. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “มาตรการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในโรงงาน SME และอาคารธุรกิจของกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน,” สาร สวทศ, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม, 2545.
3. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “การใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก,” สาร สวทศ, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม, 2545.
4. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “มหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,” สาร สวทศ, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, มิถุนายน-สิงหาคม, 2546.
5. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อหินปูนที่เหมาะสมในการผลิตอิฐบล็อก,” เทคโนโลยีสาร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, กันยายน 2546, หน้า 27-28.
6. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “การเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย (ตอนที่ 1),” วิศวกรรมสาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปีที่ 57, ฉบับที่ 673, กุมภาพันธ์ 2547, หน้า 42-45.
7. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “การเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย (ตอนที่ 2),” วิศวกรรมสาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปีที่ 57, ฉบับที่ 676, พฤษภาคม 2547, หน้า 73-76.

7.3 รายงานวิจัย

1. Yuan, R.L., and Seangatith, S., “GFRP Composite Columns with Various End Conditions,” Technical Report, College of Engineering, University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, 1996.
2. Seangatith, S., “Characterization and Analysis of Composite Beams Subjected to Impact Loads,” Dissertation, The University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, 1997

3. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “การทดสอบและการพัฒนาโครงสร้างอิฐก่อ,” รายงานการวิจัยหมายเลข SUT 4-410-41-12-20, สถาบันวิจัยและพัฒนา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2542.
4. “โครงการศึกษาการจัดทำแผนแม่บทด้านการจราจรและขนส่งเมืองภูมิภาค ระยะที่ 5 จังหวัดปราจีนบุรี,” รายงานเทคนิค, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2543.
5. “โครงการศึกษาการจัดทำแผนแม่บทด้านการจราจรและขนส่งเมืองภูมิภาค ระยะที่ 5 จังหวัดสระแก้ว,” รายงานเทคนิค, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2545.

7.4 ตำราและเอกสารคำสอน

1. เอกสารคำสอนวิชา Engineering Statics
2. ตำราวิชา Mechanics of Materials
3. เอกสารคำสอนวิชา Material Testing
4. คู่มือปฏิบัติการวิชา Material Testing
5. เอกสารคำสอนวิชา Theory of Structures
6. ตำราวิชา Structural Analysis
7. เอกสารคำสอนวิชา Structural Steel Design
8. เอกสารคำสอนวิชา Advanced Mechanics of Materials (ภาษาอังกฤษ)
9. ตำราวิชา Advanced Theory of Structures