

พฤติกรรมการรับแรงตามแนวแกนของผนังก่ออิฐโบราณโดยเสริม
แผ่นพลาสติกเสริมใยแก้ว

THE BEHAVIOR OF ANCIENT MASONRY WALLS RETROFITTED
BY GLASS FIBER REINFORCED POLYMER UNDER AXIAL LOAD

รัชนิวรรณ เกิดมงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พฤติกรรมการรับแรงตามแนวแกนของผนังก่ออิฐโบราณโดยเสริม
แผ่นพลาสติกเสริมใยแก้ว



รชนีวรรณ เกิดมงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการรับแรงตามแนวแกนของผนังก่ออิฐโบราณ โดยเสริมแผ่นพลาสติกเสริมใยแก้ว
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวรัชนิวรรณ ฤคมงคล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. หมิง จิ่ง
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

การบูรณะโครงสร้างโบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาโดยโครงสร้างหลักจะเป็นผนังก่ออิฐแบบสมัยอยุธยา จึงเป็นที่มาของการทำวิจัยครั้งนี้ เพื่อจะซ่อมแซมโครงสร้างเดิม และเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างด้วยวัสดุ แผ่นพลาสติกเสริมใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer : GFRP)

ผนังก่ออิฐที่ใช้ในการทดสอบมีจำนวน 6 ผนัง ขนาดความกว้าง 1.54 เมตร ความสูง 1.20 เมตร ความหนา 0.63 เมตร แบ่งผนังออกเป็น ผนังที่ไม่เสริมวัสดุ GFRP จำนวน 2 ผนัง ผนังที่เสริมวัสดุ GFRP จำนวน 2 ผนัง และผนังที่ซ่อมแซมก่อนแล้วจึงเสริมวัสดุ GFRP จำนวน 2 ผนัง โดยให้แรงกระทำกับผนังนั้นเป็นแบบแรงอัดตามแนวแกน ขณะที่ผนังไม่สามารถรับแรงเพิ่มได้อีกจึงตรวจสอบขนาดความกว้างและความยาวของรอยร้าวที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งการเคลื่อนตัวของผนังในแนวราบและแนวตั้ง จากนั้นใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณหาค่าการรับแรงอัดตามแนวแกนสูงสุดของผนัง

จากผลการทดสอบอิฐ และ ปูนก่อ ซึ่งมีคุณสมบัติทางกล ที่ใกล้เคียงกับอิฐทดแทนอิฐโบราณ จากนั้น ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบผนังจำนวน 6 ผนัง คือ ผนังที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP สามารถรับแรงอัด สูงสุดได้ 84.27 ตัน ผนังมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง 5.21 มิลลิเมตร ผนังที่เสริมวัสดุ GFRP แล้วสามารถรับแรงอัดได้สูงสุด 148 ตัน ผนังมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง 8.03 มิลลิเมตร อีกทั้งผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริมวัสดุ GFRP สามารถรับแรงอัดได้สูงสุด 148 ตัน ผนังมีการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง 6.30 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นว่าผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริมด้วยวัสดุ GFRP นั้นสามารถรับแรงอัดตามแนวแกนได้ใกล้เคียงกับผนังที่เสริมวัสดุ GFRP ก่อนที่จะให้แรงกระทำ นอกจากนี้เพื่อให้การวิจัยครั้งนี้เป็นไปอย่างถูกต้องจึงที่ได้นำข้อมูลการทดสอบทางกลของวัสดุหลักมาวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วได้ข้อมูลของแรงอัดตามแนวแกนที่กระทำสูงสุดที่มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบ full scale test ฉะนั้นสามารถใช้การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์จำลองข้อมูลเพื่อช่วยประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายได้

คำสำคัญ : โบราณสถาน แรงอัดตามแนวแกน การเสริม แผ่นพลาสติกเสริมใยแก้ว ไฟไนต์เอลิเมนต์

Thesis Title	The Behavior of Ancient Masonry Walls Retrofitted by Glass Fiber Reinforced Polymer Under Axial Load
Name – Surname	Miss Ratchaneewan Kerdmongkon
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Dr. Meng Jing
Academic Year	2011

ABSTRACT

The major structural ancient place situated in Ayuttaya was built with Ayuttaya masonry bricks without any reinforcement. In this research, appropriate repairs using additional compressive reinforcement of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) was originated.

Particular consideration has been given to research into six masonry brick walls with the following dimension: 1.20 meter in height, 1.54 meter in width and 0.63 meter in depth. Two walls were built without retrofitted with GFRP, two walls were retrofitted with GFRP, and the other walls were repaired and subsequently retrofitted with GFRP prior loading. Only axial compressive loads were applied at the top surface of the ancient masonry walls. Cracks, strain and displacements in both height and width were observed. The maximum compressive load for each wall was determined, compared and verified using finite element-analysis model.

Following the review of test results of the corresponding brick and mortar, it was discovered that the mechanical properties are almost corresponding to the masonry bricks substituted. The information given from six-wall tests was as follows: Wall without retrofitted with GFRP was noted at the maximum compressive load of 84.27 tons, and the vertical displacement of 5.21mm. Wall retrofitted with GFRP was noted at the maximum compressive load of 148 tons, and the vertical displacement of 8.03mm. Wall repaired and subsequently retrofitted with GFRP was noted at the maximum compressive load of 148 tons, and the vertical displacement of 6.30mm. These results demonstrated that the compressive strength of walls retrofitted with GFRP is higher than that of walls without retrofitting. It was also noted that the axial compressive strengths of the walls repaired after damaged were almost identical to wall retrofitted with GFRP before damaged.

To ensure the accuracy of the testing methodology, the mechanical properties for the corresponding walls were analyzed by means of the finite element models. The results were almost identical to the results from the full scale test. These results demonstrate an encouraging advantage for this methodology and urge the adoption of the finite element-analysis model, which can be utilized in model mode for achieving faster results at significant lower costs.

Keywords: ancient masonry wall, axial compressive loads, retrofit, Glass Fiber Reinforced Polymer, finite element-analysis



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติสานต์ กร้ามาตร ประธานกรรมการหลักสูตร ดร.วิระศักดิ์ ละอองจันทร์ และ ดร.ภักวิวัฒน์ แสนเจริญ กรรมการ ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นอย่างสูงในการแนะนำสิ่งที่มีประโยชน์แก่การเขียนวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ ดร. หมิง จิ่ง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้คำแนะนำข้อคิดต่างๆ ในการวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของการทำการวิจัยนี้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้ต้องพบอุปสรรค หลายประการ แต่ด้วยความช่วยเหลือเอื้อเฟื้ออย่างดีจากหลายๆ ฝ่าย ทำให้ผู้วิจัยฝ่าฟันอุปสรรคจนประสบความสำเร็จได้ จึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่กล่าวนามมาดังนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์เบญจพล เวทย์วิวัฒน์ และ คุณสุดชาย พานสุวรรณ วิศวกร กรมศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ สำหรับแนะนำแหล่งวัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณศูนย์อุตสาหกรรมสระบุรี อำเภอวิหารแดงที่ให้ความอนุเคราะห์อำนวยความสะดวกในให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทดสอบ

ขอขอบพระคุณคุณวิสัน กิตติชัยกุลกิจที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องการแปล และตรวจการเขียนภาษาอังกฤษ

เหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจอันยิ่งใหญ่ด้วยดีตลอดมา และที่ลืมไม่ได้คือผู้เกี่ยวข้องหลายๆ ท่านที่หากมิได้กล่าวนามมา ณ โอกาสนี้ด้วย

รัชนิวรรณ เกิดมงคล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 คุณสมบัติของอิฐที่ใช้ทดแทนอิฐโบราณ.....	7
2.2 ขั้นตอนการผลิตอิฐ.....	10
2.3 คุณลักษณะที่ต้องการของอิฐทดแทนอิฐโบราณ.....	13
2.4 การเตรียมปูนหมักแบบโบราณ.....	13
2.5 การก่อกำแพงอิฐทดแทนอิฐโบราณ.....	14
2.6 แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (Fiber glass Reinforced Plastic).....	16
2.7 วิธีวิเคราะห์ไฟไนต์อัลลิเมนต์.....	25
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของอิฐทดแทนอิฐโบราณ.....	33
3.2 ผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ.....	39

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 การทดสอบการหาค่ากำลังแรงกดอัด (Compressive Strength Test)	42
3.4 วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	46
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์	49
4.1 ผลการทดสอบทางกายภาพของอิฐ	49
4.2 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของอิฐ	50
4.3 ผลการทดสอบทางกายกลของอิฐและมอร์ต้า	51
4.4 ผลการทดสอบของผนังก่ออิฐแบบโบราณ	53
4.5 กราฟสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง ผนังทดสอบทั้งหกผนัง	59
4.6 วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	66
4.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) กับผลการทดสอบผนัง (Full-scale-Test)	69
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	70
5.1 สรุปผลงานวิจัย	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
รายการอ้างอิง	72
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก ผลการทดลองของผนังทั้ง 6 ผนัง	75
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	91
ประวัติผู้เขียน	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้และขีดจำกัดในการทดสอบ.....	8
2.2 แรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	9
2.3 กำลังอัดของวัสดุก่อคืดเนื้อที่รวมสำหรับวัสดุก่อชนิดก้อนตัน.....	10
2.4 ข้อมูลทางเทคนิคของ GFRP.....	20
2.5 ข้อมูลทางเทคนิคของน้ำยาเรซิน.....	21
3.1 รูปชนิดของผนังที่ใช้ทดสอบ.....	40
4.1 การวัดขนาดและน้ำหนักของอิฐจากการสุ่มตัวอย่างจากแหล่งบ้านลุมพลีจำนวน 10 ตัวอย่าง.....	49
4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption Test).....	50
4.3 การทดสอบการต้มเดือด (Boiling Test) แบบ 2 ชั่วโมง.....	51
4.4 การทดสอบการรับกำลังอัดของอิฐทดแทนอิฐโบราณ.....	51
4.5 การทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ต้า.....	52
4.6 การทดสอบการรับกำลังอัดของผนัง ทั้ง 6 ผนัง.....	53
4.7 เปรียบเทียบระหว่างวิธีไฟในอิลามেন্টกับการทดสอบ.....	66

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัยตัวอย่างที่ทดสอบ	4
2.1 โบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา	6
2.2 โบราณสถานวัดกุฎีดาว	7
2.3 แป้นพิมพ์ของอิฐ	11
2.4 ขั้นตอนการทำอิฐ	12
2.5 เตาเผาอิฐ	12
2.6 การวางอิฐมอญโบราณ	15
2.7 แบบการเรียงอิฐโบราณ	15
2.8 รอยต่อของผนังก่ออิฐ	16
2.9 ลักษณะเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar Fiber)	17
2.10 การวางตัวของเส้นใยในการผลิตแผ่นซ้อน	18
2.11 Stress – Strain เส้นใย (Fiber Reinforcement)	18
2.12 ลักษณะ Fiber Sheet	19
2.13 ลักษณะ Laminate	19
2.14 ลักษณะ Rod & Grid	19
2.15 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP)	22
2.16 ลักษณะการ Debonding บริเวณมุมงอด้านใน	24
2.17 ตัวอย่างของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย	25
2.18 ขอบเขตความปลอดภัยของวัสดุประของ Maximum Normal Stress Theory	27
2.19 ผลของอัตราส่วนของความสูงอิฐกับความหนาของปูนก่อต่อกำลังรับแรงอัด	29
2.20 ผลของอัตราส่วนความหนาของปูนก่อกับความหนาของอิฐต่อกำลังรับน้ำหนักของ ปริซึมอิฐก่อ	29
2.21 การทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกประสาน	32
3.1 ตัวอย่างของอิฐที่ใช้ในการทดสอบ	33
3.2 การวัดขนาดของอิฐที่ใช้ในการทดสอบ	34
3.3 การทดสอบการหาน้ำหนักโดยการอบแห้ง	35
3.4 การทดสอบการหาน้ำหนักหลังจากการอบแห้ง	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำโดยการแช่น้ำ.....	37
3.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำโดยการต้มเดือดแบบ 2 ชั่วโมง.....	37
3.7 การทดสอบการรับแรงกดอัด.....	39
3.8 ผนังเป็นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....	41
3.9 ตำแหน่งของ LVDT.....	41
3.10 ตำแหน่งของ Strain Gauge.....	42
3.11 แบบการติดแผ่น GFRP ของผนังที่ 3.....	44
3.12 แบบการติดแผ่น GFRP ของผนังที่ 4.....	44
3.13 แบบการติดแผ่น GFRP ของผนังที่ 5.....	45
3.14 แบบการติดแผ่น GFRP ของผนังที่ 6.....	46
3.15 Model ของผนังก่ออิฐ.....	47
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของอิฐ.....	52
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของมอร์ต้า.....	52
4.3 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนังที่ 1 ด้านหน้าและด้านหลัง.....	54
4.4 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนังที่ 2 ด้านหน้าและด้านหลัง.....	55
4.5 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนังที่ 3 ด้านหน้าและด้านหลัง.....	56
4.6 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนังที่ 4 ด้านหน้าและด้านหลัง.....	57
4.7 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนังที่ 5 ด้านหน้าและด้านหลัง.....	58
4.8 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนังที่ 6 ด้านหน้าและด้านหลัง.....	59
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Load กับ Vertical Displacement ของผนังที่ 1-6.....	60
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Load กับ Lateral Displacement ของผนังที่ 1-6.....	60
4.11 พฤติกรรมระหว่าง Load กับ Strain ของผนังที่ 1.....	61
4.12 พฤติกรรมระหว่าง Load กับ Strain ของผนังที่ 2.....	62
4.13 พฤติกรรมระหว่าง Load กับ Strain ของผนังที่ 3.....	63
4.14 พฤติกรรมระหว่าง Load กับ Strain ของผนังที่ 4.....	64
4.15 พฤติกรรมระหว่าง Load กับ Strain ของผนังที่ 5.....	65
4.16 พฤติกรรมระหว่าง Load กับ Strain ของผนังที่ 6.....	65

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate stress ของผนังที่ 1.....	66
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate stress ของผนังที่ 3 ด้านที่เสริมวัสดุ GFRP.....	67
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate stress ของผนังที่ 3 ด้านที่ไม่เสริมวัสดุ GFRP.....	67
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate stress ของผนังที่ 4 ด้านที่เสริมวัสดุ GFRP.....	68
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate stress ของผนังที่ 4 ด้านที่ไม่เสริมวัสดุ GFRP.....	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างโบราณสถาน จังหวัดพระนครศรีอยุธยาโดยส่วนมาก โครงสร้างแบบนี้ได้มีมาตั้งแต่สมัยอยุธยา มีอายุหลายร้อยปี ยกตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น อิฐดินเผาแบบโบราณ และ ปูนก่อแบบโบราณ จากการตรวจสอบพบว่าการเสื่อมสภาพของวัสดุที่ใช้ขึ้น เนื่องจากอายุและน้ำหนักตัวของโครงสร้าง อีกทั้งพบว่าโครงสร้างของโบราณสถานบางแห่งไม่มีเสถียรภาพที่ดี จึงได้มีแนวความคิดที่จะมีการบูรณะโบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยแนวทางการซ่อมแซมให้คงความเป็นของเดิมของโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด โดยได้จำลองเอาดินในบริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา มาทำเป็นอิฐดินเผาที่มีสภาพที่ทดแทนอิฐโบราณที่มีอยู่เดิม เพื่อนำไปก่อใช้งานแทนอิฐเดิมที่เสื่อมสภาพไปแล้ว รวมทั้งปูนก่อที่ใช้ยึดประสานนั้นต้องคงของเดิมให้มากที่สุด เพื่อนำมาใช้ซ่อมแซมผนังก่ออิฐที่มีอยู่เดิมให้คงโครงสร้างเดิม และทางกรมศิลปากรได้เคยทดลองใช้วัสดุ Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) มาซ่อมแซม นอกจากนี้ยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโบราณสถานแต่ก็พบว่าไม่เป็นที่นิยมใช้กัน เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้นั้นราคาแพง อีกทั้งวัสดุที่ใช้ไม่ได้ผลิตในประเทศไทยเป็นการนำเข้ามาจากต่างประเทศ รวมทั้งเนื้อของวัสดุเป็นสีดำทำให้ปิดบังทัศนียภาพของบริเวณที่เสริมวัสดุชนิดนี้ จึงได้เป็นที่มาของการศึกษาวิจัยครั้งนี้ โดยการซ่อมแซมและเสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างผนังก่ออิฐด้วยวัสดุแผ่นพลาสติกเสริมใยแก้ว Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีสีขาว น้ำหนักเบา จึงง่ายต่อการติดตั้งจึงลดค่าแรงงานในการติดตั้ง นอกจากนี้วัสดุนี้มีความต้านทานการสึกกร่อน ความล้า (Fatigue) ความต้านทานต่อสารเคมี (Good Chemical Resistance) มีความเป็นกลางในเชิงไฟฟ้าแม่เหล็ก มีการขยายตัวตามอุณหภูมิต่ำ (Low Thermal Expansion) อีกทั้งเนื้อของวัสดุมีสีขาวและใส จึงไม่ได้เป็นการปิดบังทัศนียภาพ โดยคุณสมบัติเหล่านี้จะมากขึ้นกับชนิด ปริมาณ และ แนวการวางตัวของเส้นใย โดยผลิตภัณฑ์นี้ส่วนใหญ่จะใช้เป็นส่วนเสริมกำลังได้ทั้งภายใน และ ภายนอก นอกจากนี้ยังใช้วิธีวิเคราะห์ด้วย Finite Element โดยจำลองให้มีขนาดเท่ากับชิ้นงานที่ทดสอบจริง รวมทั้งได้ระบุค่าของคุณสมบัติของวัสดุที่ได้มาจากการทดสอบจริง เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีค่าใกล้เคียงกับที่ทดสอบจริง เพื่อจะได้ลดระยะเวลาในการทดสอบ อีกทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของอิฐที่ใช้ทดแทนอิฐโบราณ โดยอิฐที่จะนำไปใช้ในการทดสอบมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับอิฐโบราณ

1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของผนังอิฐก่อโบราณ แบบ Full-scale test ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนบนผนังที่ไม่เสริมวัสดุ GFRP ผนังที่เสริมวัสดุ GFRP และผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริมด้วยวัสดุ GFRP แล้วให้รับน้ำหนักจนถึงขั้นวิบัติ

1.2.3 เปรียบเทียบการรับแรงอัดตามแนวแกนของผนังที่ไม่เสริมวัสดุ GFRP และผนังที่เสริมวัสดุ GFRP โดยใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลที่ได้จากการทดสอบแบบ Full-scale Test

1.2.4 ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ ระหว่างผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ โดยใช้วัสดุ GFRP ยึดเกาะกับผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณที่ก่อน และ ผนังที่ซ่อมแซมด้วยวัสดุ GFRP

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 คุณสมบัติของอิฐโบราณมีคุณสมบัติใกล้เคียงอิฐที่ใช้ทดสอบ

1.3.2 ผนังอิฐก่อโบราณที่เสริมด้วย GFRP สามารถรับแรงอัดตามแนวแกนได้มากกว่าผนังอิฐก่อโบราณที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP และ ผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริมด้วยวัสดุ GFRP

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ทดสอบหาคุณสมบัติของอิฐโบราณตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C67

1) ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอิฐโบราณ ซึ่งเป็นอิฐใหม่ที่ใช้สำหรับซ่อมแซมเพื่อบูรณะโบราณสถาน โดยผลิตที่ ตำบลลุมพินี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

2) ทดสอบคุณสมบัติทางกลของอิฐโบราณ

1.4.2 วิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงอัด (Compressive Strength) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ Axial Load กับ Vertical Displacement ของผนังอิฐก่อโบราณภายใต้แรงอัด โดยมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

1) ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP มีขนาดความกว้าง 1.54 เมตร ความสูง 1.20 เมตร และ ความหนา 0.63 เมตร โดยมีน้ำหนักกดทับ (คงที่) ด้านบนของผนัง และให้แรงกระทำตามแนวแกนด้านบน (Axial Load) ผนังตัวอย่างที่ดำเนินการทดสอบเป็นจำนวน 2 ตัวอย่าง

2) ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณที่เสริมวัสดุ GFRP เพื่อให้แรงกระทำตามแนวแกนด้านบน (Axial Load) ผนังตัวอย่างที่ดำเนินการทดสอบเป็นจำนวน 2 ตัวอย่าง

3) นำผนังที่ทดสอบแล้วในข้อที่ 1 มาซ่อมรอยร้าว อัดน้ำปูน จากนั้นก็เสริมวัสดุ GFRP โดยรูปแบบของการเสริมก็จะเหมือนกับข้อที่ 2 จำนวน 2 ตัวอย่าง

1.4.3 เปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงอัด (Compressive Strength) และ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Load กับ Vertical Displacement ของผนังอิฐก่อโบราณ ภายใต้แรงกระทำทางด้านบนของผนังทั้ง 6 ผนัง

1.4.4 กำหนดให้ใช้การวิเคราะห์ตามทฤษฎีด้วยวิธี Finite Element

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

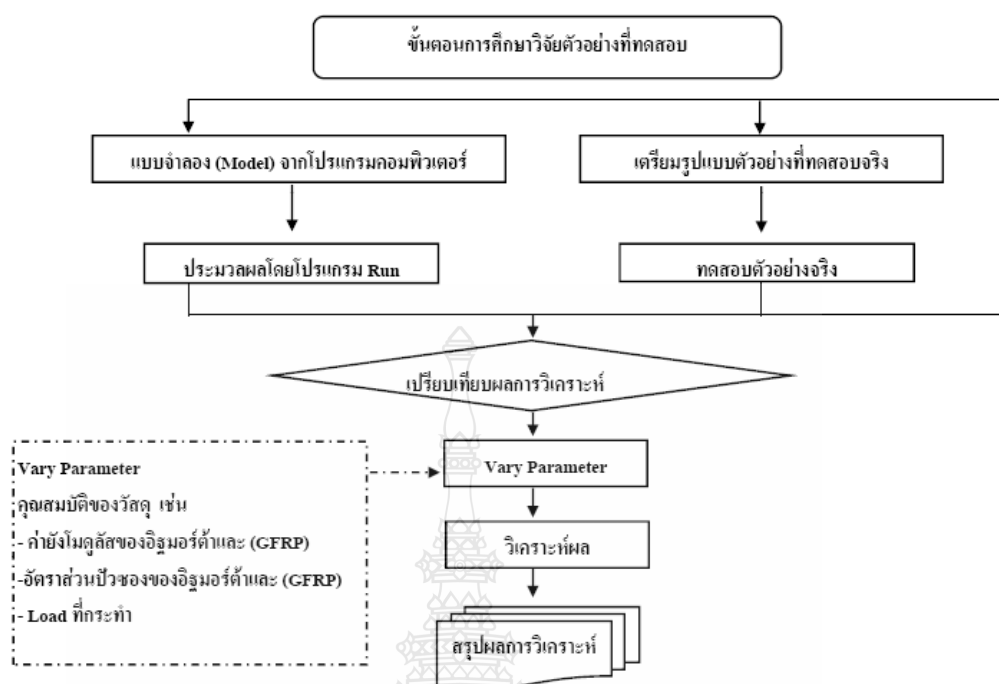
1.5.1 ศึกษาและรวบรวมรายละเอียดที่เกี่ยวข้องได้แก่ Uniform Load ที่กระทำบนผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณที่ไม่เสริม GFRP ผนังที่เสริม GFRP และ ผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริมด้วยวัสดุ GFRP

1.5.2 จัดเตรียมวัสดุ ได้แก่ อิฐทดแทนอิฐโบราณ ปูนก่อ และวัสดุ GFRP

1.5.3 เตรียมเครื่องมือทดสอบ

- 1) Load Frame ที่ใช้ทดสอบผนังก่อ
- 2) เครื่อง Hydraulic Jack ขนาด 150 ตัน
- 3) Load Cell ขนาด 150 ตัน
- 4) Strain Gauge
- 5) LVDT
- 6) เครื่องแปลงข้อมูล (Data Logger)
- 7) คอมพิวเตอร์ และ เครื่องพิมพ์

1.5.4 แผนผัง (Flow Chart) แสดงขั้นตอนการศึกษาวิจัยทดสอบวัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัยตัวอย่างที่ทดสอบ

1.5.5 ทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลของอิฐโบราณ ซึ่งเป็นอิฐใหม่ สำหรับการก่อสร้าง และ บูรณะ โบราณสถาน ที่ผลิตใน ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัด

1.5.6 ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ขนาด กว้าง 1.54 เมตร สูง 1.20 เมตร และความหนา 0.63 เมตร โดยมีน้ำหนักกดทับ (คงที่) ด้านบนของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง โดยทดสอบผนังตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่าง

1.5.7 ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ขนาด กว้าง 1.54 เมตร สูง 1.20 เมตร เสริมด้วยเส้นใยไฟเบอร์ ชนิดเส้นใยแก้ว Glass Fiber GFRP แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) โดยมีน้ำหนักกดทับ (คงที่) ด้านบนของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง โดยทดสอบผนังตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่าง

1.5.8 นำผนังที่ทดสอบแล้วในข้อที่ 1.5.6 มาซ่อมรอยร้าว อัดน้ำปูน จากนั้นก็เสริมวัสดุ GFRP จำนวน 2 ตัวอย่าง

1.5.9 เปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงอัด (Compressive Strength) และ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Load กับ Vertical Displacement ของผนังอิฐก่อโบราณภายใต้แรงกระทำทางด้านบน ทั้ง 6 ผนัง

1.5.10 สรุปผลงานวิจัยและทำรายงานผลการวิจัยเพื่อนำเสนอ

1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา

1.6.1 การเคลื่อนย้ายตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบต้องทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากชิ้นงานที่ทดสอบมีขนาดใหญ่ และ น้ำหนักมากทำให้ต้องเพิ่มความปลอดภัยในการยกชิ้นงาน

1.6.2 ข้อมูลของวัสดุที่นำมาใช้งานเช่น อิฐ และมอร์ต้าที่ใช้ในงานวิจัยมีลักษณะทางกายภาพและทางกล ให้คล้ายกับในสมัยอยุธยา ซึ่งต้องใช้เวลาในการหาข้อมูลของแหล่งที่ผลิตจนทราบข้อมูลจากผู้ที่เคยทำงานวิจัยว่าผลิตที่ตำบลลุมพินี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา รวมทั้งในส่วนของแผ่น GFRP และ น้ำยาเรซิน สามารถมีผลิตในประเทศไทยช่วยลดราคาค่าขนส่ง และมีราคาที่ถูกมาก

1.6.3 ทุนวิจัย และงบประมาณของผู้ทำวิจัยที่มีจำกัด อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องมือที่ใช้เฉพาะทางจึงมีราคาแพง

1.6.4 ประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบจากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ให้ได้ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) เนื่องจากการวิเคราะห์โดยวิธี Finite Element Method หรือ FEM มีสมการในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน จึงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพที่สูงเพื่อลดเวลาในการวิเคราะห์ของการหาผลลัพธ์และแสดงผลลัพธ์

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทราบถึงแนวทางการเลือกใช้อิฐใหม่เพื่อทดแทนอิฐโบราณ

1.7.2 เปรียบเทียบผลการรับแรงอัดตามแนวของแต่ละผนังที่ไม่เสริม GFRP ผนังที่เสริม GFRP และผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริมด้วย GFRP

1.7.3 รูปแบบของการเสริมการรับแรงอัดตามแนวแกนของแผ่น GFRP ทั้งก่อนการทดสอบ และผนังที่เสริมหลังจากรับแรงไปแล้ว

1.7.4 เพื่อเป็นอีกแนวคิดที่ใช้ในการบูรณะ โบราณสถานที่มีสภาพทรุดโทรมตามกาลเวลา วัสดุที่นำมาใช้ก็สามารถไม่ปิดบังทัศนียภาพ นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมราคาไม่แพง ซึ่งช่วยลดปัญหาจากรีกราคาได้เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้งานผลิตได้ในประเทศไทย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การอนุรักษ์ และซ่อมแซมโบราณสถานให้มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องคำนึงถึงความรู้หลายแขนงในการบำรุงรักษาให้คงอยู่ไว้ให้อยู่สืบต่อไปในอนาคต นอกจากนี้ต้องทราบวิธีการ ขั้นตอน และ วัสดุที่เหมาะสมกับการบูรณะโบราณสถาน ซึ่งได้มีผู้คิดค้น ทดลอง วิธี ขั้นตอน และ วัสดุที่ใช้ในการบูรณะโบราณสถานให้ใกล้เคียงของเดิมที่มีอยู่จริงมากที่สุด เช่น การก่ออิฐซ่อมแซมผนังเดิมตามสภาพหลักฐานเดิมที่มีอยู่เพื่อป้องกันผนังก่ออิฐเดิมไม่ให้เสื่อมสภาพ เท่าที่จำเป็น ในโครงสร้างอิฐก่อ (Masonry Structure) อิฐดินเผา (Masonry Brick) ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาจะถูกจัดเรียงในรูปแบบคล้ายสมัยอยุธยา และใช้ปูนก่อ (Mortar) ซึ่งได้จากการผสมปูนซีเมนต์ขาว ปูนหมัก ทราย และน้ำ ในอัตราส่วนที่พอเหมาะ เป็นตัวประสานก้อนอิฐดินเผาต่างๆ เข้าด้วยกันดังนั้น อิฐก่อในลักษณะนี้จะถูกออกแบบให้รับแต่แรงกดอัดเท่านั้น อีกทั้งยังมีอีกแนวความคิดที่จะนำวัสดุ Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) มาช่วยเสริมการรับแรงอัดให้เพิ่มมากขึ้น โดยที่โครงสร้างนั้นก็ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างเดิม นอกจากนี้ยังไม่ปิดบังทัศนียภาพ



ภาพที่ 2.1 โบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา [1]



ภาพที่ 2.2 โบราณสถานวัดกฐีดาว [1]

2.1 คุณสมบัติของอิฐที่ใช้ทดแทนอิฐโบราณ

2.1.1 คุณสมบัติเชิงกล และ ฟิสิกส์

การทำวิจัย ผศ. ดร. สิทธิชัย (2545) [2] พบว่าอิฐดินเผาเป็นวัสดุเปราะที่มีกำลังรับแรงกดอัดที่ค่อนข้างสูงและมีกำลังรับแรงดึงต่ำ โดย ASTM C62 ได้แบ่งอิฐดินเผาที่ใช้ในการก่อสร้างออกเป็น 3 เกรด คือ

1) Severe Weathering หรือ SW เป็นอิฐดินเผาที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดีและมีกำลังรับแรงกดอัดไม่น้อยกว่า 20.7 MPa จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบอิฐดินเผาอย่างน้อย 5 ก้อน

2) Moderate Weathering หรือ MW เป็นอิฐดินเผาที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ปานกลางและมีกำลังรับแรงกดอัดไม่น้อยกว่า 17.3 MPa จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบอิฐดินเผาอย่างน้อย 5 ก้อน

3) No Weathering หรือ NW เป็นอิฐดินเผาที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนต่ำ มักใช้ภายในอาคารและมีกำลังรับแรงกดอัดไม่น้อยกว่า 10.3 MPa จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบอิฐดินเผาอย่างน้อย 5 ก้อน

กำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผาขึ้นอยู่กับชนิดของดินเหนียวที่ใช้ในการผลิต กรรมวิธีการผลิต และ ระดับการถูกเผาได้แก่ อุณหภูมิ และ ระยะเวลาที่ใช้ โดยทั่วไปแล้ว กำลังรับแรงอัดของอิฐดินเผาจะมีค่าสูงกว่าที่ได้กำหนดตามมาตรฐาน ASTM มาก และสำหรับอิฐที่ทำจากดินเหนียวชนิด

เดียวกันและกรรมวิธีการผลิตที่เหมือนกันแล้ว อิฐที่ถูกเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าและเป็นเวลานานกว่าจะเป็นอิฐที่มีกำลังสูง

เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การอึมตัวเป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงความคงทนแข็งแรงและกำลังของอิฐดินเผา เนื่องจากถ้าอิฐมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การอึมตัวที่ต่ำแล้ว อิฐดังกล่าวจะมีความพรุนน้อยกว่าอิฐที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การอึมตัวที่สูงกว่าโดยทั่วไปแล้ว อิฐที่ทำจากดินเหนียวชนิดเดียวกันและกรรมวิธีการผลิตที่เหมือนกันแล้ว อิฐที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิสูงกว่าและเป็นเวลานานกว่าจะเป็นอิฐที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การอึมตัว

2.1.2 มาตรฐานขนาดของอิฐ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 77-2545 [3] อิฐก่อสร้างสามัญ (Building Bricks) ไว้ 2 ขนาด คือ อิฐขนาดเล็ก และ อิฐขนาดใหญ่

อิฐขนาดเล็ก คือ อิฐที่มีลักษณะทรงสี่เหลี่ยมตันทำด้วยมือ หรือ เครื่องจักร ที่ใช้ในงานอิฐขนาดใหญ่ คือ อิฐที่มีลักษณะทรงสี่เหลี่ยมตันใหญ่ทำด้วยมือ หรือ เครื่องจักร ที่ใช้ในงานโครงสร้างทำจากดินในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา หรือ จังหวัดอื่นใกล้เคียง

1) แรงอัด (Compressive Strength) ตามเกณฑ์ดังตารางที่ 2.1

ขนาดและความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้สำหรับอิฐประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้และขีดจำกัดในการทดสอบ [3]

ประเภท ที่	ขนาด			ขีดจำกัดในการทดสอบอิฐจำนวน 20 แผ่น		
	ยาว	กว้าง	หนา	ยาว	กว้าง	หนา
1	140 ± 5	65 ± 3	40 ± 2	2,700 ถึง 2,900	1,240 ถึง 1,360	760 ถึง 840
	160 ± 5	65 ± 3	40 ± 2	3,100 ถึง 3,300	1,240 ถึง 1,360	760 ถึง 840
	190 ± 5	90 ± 3	40 ± 2	3,700 ถึง 3,900	1,740 ถึง 1,860	760 ถึง 840
2	190 ± 5	90 ± 3	65 ± 2	3,700 ถึง 3,900	1,740 ถึง 1,860	1,260 ถึง 1,340
	190 ± 5	90 ± 3	65 ± 2	3,700 ถึง 3,900	1,740 ถึง 1,860	1,740 ถึง 1,860

2) คุณสมบัติทางกายภาพ

ก. แรงอัด (Compressive Strength) ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.2

ข. การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [3]

ประเภท ที่	ยาว	×	กว้าง	×	หนา	แรงอัดต่ำสุด กก. / ซม. ²	การดูดซึมน้ำสูงสุด ร้อยละของน้ำหนักอิฐ
			เซนติเมตร				
1	14.0	×	6.5	×	4.0	35.7	25
	16.0	×	6.5	×	4.0	35.7	25
	19.0	×	9.0	×	4.0	35.7	25
2	19.0	×	9.0	×	6.5	152.8	15
	19.0	×	9.0	×	9.0	152.8	15

3) คุณภาพของวัสดุ

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย [4] ได้กำหนดคุณภาพของวัสดุไว้ดังนี้

ก. หากมิได้ระบุเป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ในงานวัสดุก่อคอนกรีตจะต้องมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม หรือมาตรฐานสากล

ข. มอร์ต้าและ เกร้าท์

- หากมิได้มีการระบุเป็นอย่างอื่น มอร์ต้าและ เกร้าท์ จะต้องมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานสากลที่เหมาะสม

- ห้ามใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือสารผสมเพิ่มซึ่งมีแคลเซียมคลอไรด์กับมอร์ต้าหรือ เกร้าท์ ซึ่งมีเหล็กเสริม เหล็กปลอก หรือเหล็กยึดอื่น ๆ ผังอยู่

ในกรณีที่มีได้มีการหาค่ากำลังอัดของวัสดุก่อคอนกรีตโดยวิธีทดสอบล่วงหน้า และก่อนวัสดุก่อ มอร์ต้าตลอดจนฝีมือการทำงานตรงตามเกณฑ์กำหนดในมาตรฐานแล้ว อาจคิดค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้โดยเฉลี่ยค่ากำลังอัดของวัสดุก่อทั้งหมดจากค่าตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กำลังอัดของวัสดุก่อคิเดเนื้อที่รวมสำหรับวัสดุก่อชนิดก้อนตัน [4]

กำลังอัดของก้อน (กก./ซม. ²)	กำลังอัดของวัสดุก่อทั้งหมด f'_m (กก./ซม. ²)
70 ถึง 105	63 ถึง 80
106 ถึง 175	81 ถึง 110
176 ถึง 280	111 ถึง 140
281 ถึง 420	141 ถึง 170
เกิน 420	เกิน 170

หน่วยที่แรงยอมให้ในงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก

ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ในงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็กจะต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้

หน่วยแรงตามแนวแกน $0.2 f'_m$

หน่วยแรงดัด $0.3 f'_m$

น้ำหนักบรรทุกตามแกนที่ยอมให้ซึ่งกระทำบนผนังวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็กให้คำนวณหาโดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$P = 0.20f'_m [1 - (h/40t)^3] A_n \quad (2.1)$$

h = ความสูงประสิทธิผล

t = ความหนาประสิทธิผล

A_n = พื้นที่หน้าตัดสุทธิของวัสดุก่อ

2.2 ขั้นตอนการผลิตอิฐ

จากการที่ออกไปสำรวจสถานที่ผลิตอิฐ กรรมวิธีในการผลิตมีขั้นตอนดังนี้ [2]

2.2.1. การเลือกดิน

ดินที่ใช้ทำอิฐชนิดนี้จะเป็นดินที่ไม่มีทรายเจือปนมากเกินไปและไม่เป็นดินเหนียวมากเกินไปถ้าดินมีทรายมากจะทำให้อิฐนั้นร้อนและร่วน และถ้าดินเป็นดินเหนียวมากเกินไป เมื่อนำไปตากแดดจะเกิดการแตกร้าวค่อนข้างสูง

2.2.2 การขุดดินและย่ำดิน

ทำการขุดดินและทำการแยกเอาเศษไม้หรือสารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ออกไปให้หมด จากนั้นทำการผสมแกลบประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของดินและย่ำดินให้ละเอียดและให้เข้ากันดี ใน

ขั้นตอนนี้ ถ้าดินมีลักษณะที่แห้งจนเกินไปก็ให้เติมน้ำได้ตามสมควร พอที่จะทำการย่ำดินและเทลงในแบบได้สะดวก

2.2.3 การพิมพ์แบบ

แบบที่ใช้ในการหล่อดินให้เป็นแผ่นอิฐจะเป็นแบบที่ทำด้วยไม้ 4 ด้าน โดยจะมีเฉพาะด้านข้าง (ไม่มีส่วนบนและส่วนล่าง) ไม้ที่ทำแบบเป็นไม้ที่ทนทานต่อน้ำและความชื้น ผิวด้านในสไลเรียบ ขนาดของแบบจะใหญ่กว่าขนาดของอิฐที่ต้องการประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากดินที่ตากแห้งแล้วจะมีขนาดที่เล็กลง ในขั้นตอนนี้ เริ่มต้นทำการจุ่มแบบลงในน้ำ แล้ววางแบบลงบนพื้นราบ จากนั้น นำดินเหนียวที่ผสมได้ที่แล้วเทลงในแบบและทำการอัดดินโดยใช้ไม้ตบดินให้แน่นโดยทั่วสุดท้ายปาดดินส่วนเกินออกให้เรียบเสมอไม้แบบและยกแบบออกจากก้อนดิน

2.2.4 การตากแดด

เมื่อถอดแบบออกแล้ว นำก้อนดินไปตากแดดให้แห้งสนิท ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการตากแดดจะขึ้นอยู่กับฤดูกาล ถ้าทำในฤดูแล้งอาจใช้เวลาประมาณ 3-5 วัน ในฤดูอื่น ๆ อาจจะต้องใช้เวลาประมาณ 7-8 วัน ในขั้นตอนนี้ต้องระวังอย่าให้ก้อนดินถูกฝน

2.2.5 การตากแต่งก้อนดิน

เมื่อก้อนดินแห้งสนิทแล้ว จะเห็นได้ว่า ส่วนข้าง ๆ ของก้อนจะไม่เรียบ จึงต้องใช้มีดถากแต่งก้อนดินก่อนที่จะนำเข้าเตาเผาอิฐ เพื่อให้ได้รูปร่างที่เรียบและสม่ำเสมอทุกก้อน



ภาพที่ 2.3 เป็นพิมพ์ของอิฐ [5]



ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนการทำอิฐ [5]

2.2.6 การเผาอิฐ

เมื่อดกแต่งก้อนดินแล้ว นำก้อนดินมาวางกองเป็นแถว แถวหนึ่งกว้างเท่ากับก้อนดินที่จะทำการเผา โดยเว้นระยะระหว่างแถวให้เท่าๆ กัน เพื่อที่จะใส่เกลบลงไปในช่วงว่างระหว่างแถวได้ง่าย โดยทั่วไปแล้ว กองของดินจะมีความกว้างประมาณ 4 เมตร ยาวประมาณ 6 ถึง 7 เมตร และสูงประมาณ 1.6 เมตร เมื่อกองเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำก้อนอิฐที่เผาสุกแล้วมาล้อมรอบกองดินทั้ง 4 ด้าน เพื่อกันความร้อนไม่ให้กระจายออกไปจากกองดินในขณะที่เผา ได้ระดับอยู่เสมอ ทำการเผาอิฐเป็นเวลานานประมาณ 15 วัน จากนั้น รอนอิฐเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิปกติ แล้วทำการลำเลียงอิฐไปเข้าโกดัง



ภาพที่ 2.5 เตาเผาอิฐ [5]

วัสดุที่ใช้ในการทำได้แก่ ดินเหนียว และ วัสดุอื่น ๆ เช่น ทราย โดยใช้ดินเหนียวผสมกับ ทราย ขี้ผสมน้ำ อัดลงแบบไม้ ปาดให้เรียบ แล้วยกแบบไม้ ออก หรือ นำเข้าเครื่องนวด อัด รีดออกมา เป็นแท่งยาว ตัดด้วยลวดเป็นก้อนขนาดใหญ่มากกว่าแผ่นอิฐเล็กน้อย ผึ่งก้อนดินที่เตรียมไว้ นี้ให้มีความชื้น พอสมควร นำเข้าเครื่องอัดให้แน่นเป็นก้อนอิฐตามขนาดที่ต้องการ ผึ่งให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา [5]

2.3 คุณลักษณะที่ต้องการของอิฐทดแทนอิฐโบราณ ดังนี้ คือ

- 1) เผาสุก และ มีสีสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น
- 2) มีความแข็งแรงทนทาน ตามเกณฑ์ดังตารางที่ 2.2
- 3) มุมทุกมุมควรเป็นมุมฉาก
- 4) รูปร่าง และ ขนาดสม่ำเสมอ
- 5) เนื้อแน่น และ ไม่มีรอยร้าว

นายสุคชาย(2543) [5] ได้ศึกษาตัวอย่างอิฐจากโบราณสถานต่างๆ ในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา หรือ จังหวัดอื่นใกล้เคียงพบว่าอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา มีลักษณะทางกายภาพ ทางเคมีและชนิดจุด สันฐานที่ใกล้เคียงกัน อีกประการหนึ่งผลการศึกษาคู่ประกอบของอิฐในปัจจุบันที่ยังมีการผลิตอยู่ที่ บ้านลุมพินี บริเวณริมคลองสระบัว ซึ่งอยู่ด้านเหนือของเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา หรือ จังหวัดอื่นใกล้เคียงมีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา

ปูนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดสำหรับ โบราณสถานก็ คือ ปูนแบบโบราณ ซึ่งหมักจากปูนขาว เพราะมีความแข็งแรงพอประมาณ มีความพรุน และความยืดหยุ่นค่อนข้างสูงพอเหมาะสำหรับกำแพง ก่ออิฐโบราณสถาน ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันแตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีความแข็งแรงและ ทึบตันสูง มีการหดตัวมากอีกทั้งขาดความยืดหยุ่น

2.4 การเตรียมปูนหมักแบบโบราณ

มีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 การเตรียมปูนขาวเพื่อใช้ทำปูนหมัก เริ่มจากการเผาหินปูนด้วยความร้อนสูงเพื่อได้ คาร์บอนไดออกไซด์ หินปูนจะแตกออกเป็นก้อนสีขาวใหญ่บ้างเล็กบ้างเรียกว่า ปูนดิบ ซึ่งจะนำไป ดำเนินการเป็นมอร์ต้าต่อไป

2.4.2 การหมักปูนดิบ คือการทำให้ปูนดิบดูดน้ำแล้วกลายสภาพเป็นปูนเหนียว ถ้าปูนดิบที่ได้มา จากโรงงานมีก้อนใหญ่เกินไป ให้เคาะออกเป็นก้อนเล็กๆ ก่อนหมัก เพื่อลดความรุนแรงจากปฏิกิริยา ของก้อนปูนขาวในน้ำ นำปูนดิบไปแช่ในบ่อหมักปูน ใส่ น้ำในบ่อหมักให้สูงกว่าปูนประมาณ 2.5

เซนติเมตรเป็นอย่างน้อย เมื่อใส่ปูนดิบลงไปใต้น้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาปูนแตกตัวอย่างรุนแรง น้ำและปูนร้อนจัดจนอุณหภูมิขึ้นสูงถึงจุดเดือด ให้กวนปูนอยู่เรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะหยุด เมื่อปฏิกิริยาหยุดและน้ำในบ่อหมักแห้งจะได้ปูนขาวเหนียว นำปูนขาวเหนียวขึ้นจากบ่อหมัก ล้างน้ำร้อนผ่านตะแกรงขนาดตา 5 มิลลิเมตร เพื่อกรองเอาสิ่งปนเปื้อนหรือก้อนปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือก้อนปูนขนาดใหญ่ออกไป เก็บปูนขาวเหนียวนี้ไว้ได้น้ำ ให้น้ำอยู่สูงจากผิวปูนไม่น้อยกว่า 2.5 เซนติเมตรเป็นอย่างน้อย และหมักทิ้งไว้ประมาณ 14 วัน แต่ถ้าจะให้มีความเหนียวมากขึ้นต้องหมักไว้ 60 วันขึ้นไป ปูนหมักนี้สามารถหมักเก็บไว้เป็นปี ปูนหมักที่มีอายุการหมักนานๆ จะแข็งตัว แต่ก็สามารถนำมาใช้งานได้เมื่อผสมน้ำแล้วทำให้ได้ที่

2.4.3 การผสมปูนกับทราย เมื่อหมักปูนจนได้ระยะเวลาตามกำหนดแล้วให้นำปูนหมักมาผสมกับทรายและปูนซีเมนต์ขาวโดยปริมาตรดังนี้

ปูนซีเมนต์ขาว	1 ส่วน
ปูนหมักก่อนแล้ว	2 ส่วน
ทรายหยาบ	9 ส่วน

ผสมน้ำพอให้ปูนทรายเข้ากันดี จึงนำไปใช้ก่ออิฐ

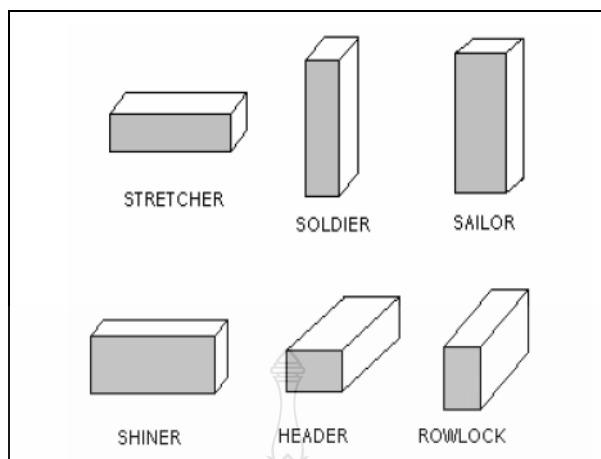
2.5 การก่อกำแพงอิฐทดแทนอิฐโบราณ

2.5.1 การวางของอิฐทดแทนอิฐโบราณ และ ขนาดของรอยต่อ

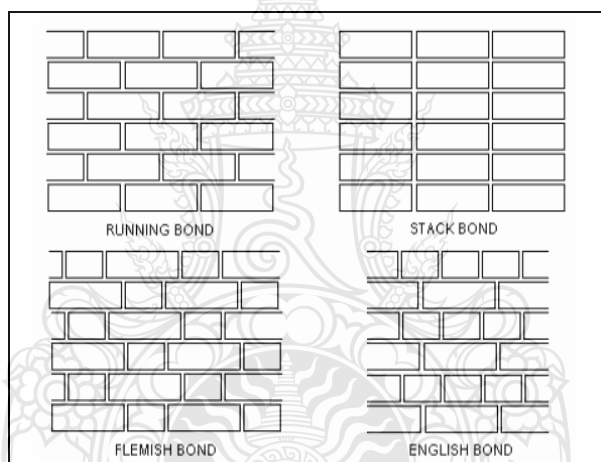
1) การวางของอิฐแบ่งออกเป็น 6 แบบ คือ

- ก. แบบ Stretcher
- ข. แบบ Header
- ค.แบบ Rowlock
- ง. แบบ Shiner
- จ. แบบ Soldier
- ช. แบบ Sailor

ในการทดสอบการหากล้างรับแรงกดอัดของกำแพง Prism ตามมาตรฐาน ASTM E447 นี้ ใช้การวางอิฐโบราณแบบ Stretcher (ภาพที่ 2.6) และ รูปแบบการเรียงอิฐโบราณแบบ English Bond ดังภาพที่ 2.7



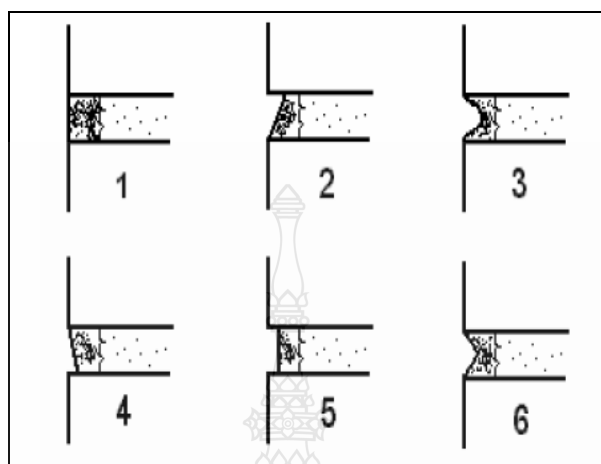
ภาพที่ 2.6 การวางอิฐมอญโบราณ [5]



ภาพที่ 2.7 แบบการเรียงอิฐโบราณ [5]

- 2) รอยต่อที่ใช้ในการก่อผนังอิฐโบราณแบ่งได้ 6 ประเภท คือ
- รอยต่อแบบ Flush Joint
 - รอยต่อแบบ Weather Joint
 - รอยต่อแบบ Concave Tooled Joint
 - รอยต่อแบบ Struck Joint
 - รอยต่อแบบ Raked Joint
 - รอยต่อแบบ “V” Tooled Joint

แต่งงานวิจัยนี้ใช้รอยต่อแบบ Flush Joint ได้ถูกนำมาถือเป็นกำแพงของการทดสอบหาค่าลึงกอดัดตามมาตรฐานของสมาคมเพื่อการทดสอบ และ วัสดุของอเมริกัน ASTM E447



ภาพที่ 2.8 รอยต่อของผนังก่ออิฐ [5]

2.5.2 การบ่มอิฐ

อายุมาตรฐานของชิ้นงานที่ทดสอบ คือ 28 วัน แต่ถ้าหากได้มีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าลึงของวัสดุก่อที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน แล้ว ก็อาจใช้การทดสอบที่อายุ 7 วันแทนได้

2.6 แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (Fiber glass Reinforced Plastic)

การค้นพบ และ พัฒนาการทางด้านพลาสติกเสริมแรงนี้เริ่มต้นจากโพลีเอสเตอร์ก่อนพบในปลายปี ค.ศ. 1940 ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 จึงทำให้เกิดคำว่า Fiber glass Reinforced Plastic (FRP) หรือ Glass Reinforced Plastic (GRP) โดยส่วนใหญ่อ้างอิงถึงโพลีเอสเตอร์ เรซิน และ เส้นใยแก้ว การใช้งานของวัสดุเสริมแรงนั้นมีมากขึ้นในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 พลาสติกเสริมแรงในสมัยนั้นถูกนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ด้านอากาศยาน และ เกราะป้องกันกระสุนเนื่องจากคุณสมบัติของเส้นใยแก้วมีการพัฒนาให้แข็งแรงขึ้น ในปัจจุบันวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย

2.6.1 คุณสมบัติเชิงกล และ ฟิสิกส์

Fiber Reinforced Plastic หรือ FRP เป็นวัสดุประกอบ (Composite Material) ที่ประกอบด้วยไฟเบอร์ (Fiber) ที่มีกำลังและความแกร่งสูงถูกยึดเหนี่ยวด้วยโพลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer Matrix) โดยที่ Fibers และ Matrix ยังคงมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมือนเดิม แต่คุณสมบัติของ

FRP ที่ได้จะแตกต่างกับคุณสมบัติของตัว Fibers และ Matrix เองอย่างเด่นชัด ในลักษณะดังกล่าว FRP จะมีลักษณะที่เหมือนกับคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) ซึ่งเหล็กซึ่งมีกำลังรับแรงดึงสูงจะถูกเสริมให้กับคอนกรีตซึ่งมีกำลังรับแรงดึงต่ำ ในส่วนของโครงสร้างที่ต้องรับแรงดึงโดยเฉพาะ E-glass Fiber จะเป็น Fiber ที่นิยมนำมาใช้มากในการทำ FRP สำหรับสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป เนื่องจากมีราคาถูกและหาง่าย นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติที่ขอดีเยี่ยมได้แก่ ไม่ติดไฟ, ทนความร้อนได้ดีมาก, คงรูปเดิมได้ดี ไม่มีการยืดหยุ่น ไม่เนาเปื่อยหรือผุกร่อน ไม่เป็นสนิม และ ทนต่อการกัดกร่อน อีกทั้งไม่แข็งตัวจากอากาศหนาวจัด [6]

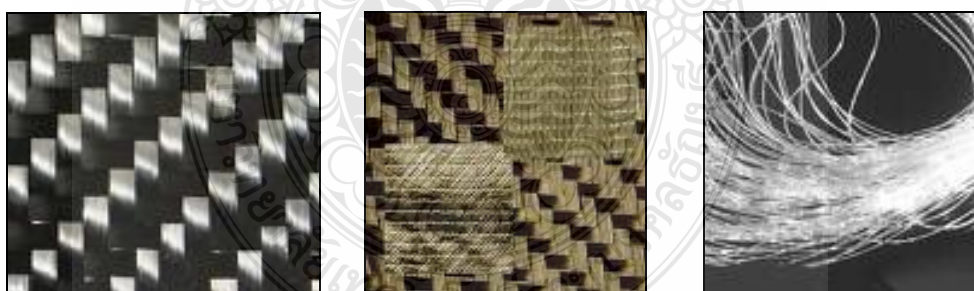
1) ชนิดของเส้นใย มี 3 ชนิด คือ

ก. Glass Fiber จะเหมาะสมกับการใช้งานแบบระยะสั้น – กลาง หรือไม่มีการใ้ น้ำหนักต่อเนื่องยาวนาน เนื่องจากจะเกิดปัญหาจาก Creep หากใช้งาน Glass Fiber ในระยะยาวควรควบคุมให้เกิด Stress ไม่เกิน 20 % ของ Ultimate Tensile Strength

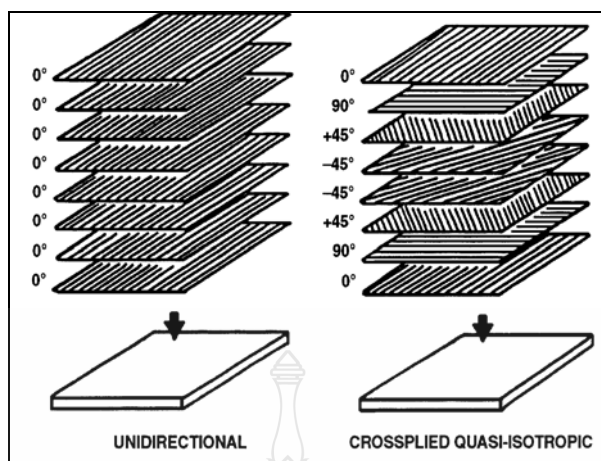
ข. Carbon Fiber จะเหมาะสมกับการเสริมกำลังโครงสร้างที่มีการบรรทุกน้ำหนักต่อเนื่องยาวนาน โครงสร้างที่รับ Cyclic Load

ค. Aramid Fiber มักใช้ในงานที่ต้องการทั้งกำลัง และ ความยืดหยุ่น ซึ่ง Aramid Fiber จะสามารถทนแรงกระแทกได้ดี และ สามารถงอ 90 องศาได้โดยไม่แตกหัก

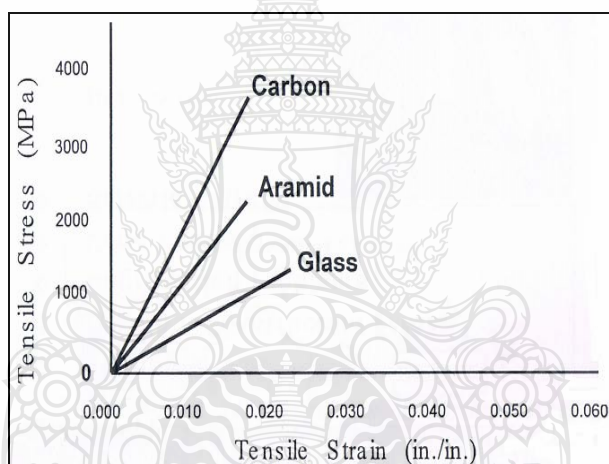
แต่เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) จะมีความเปราะแตกหักได้ง่ายและไม่สามารถดัดงอที่มุม 90 องศาได้ เนื่องจากจะหักและไม่สามารถถ่ายแรงได้



ภาพที่ 2.9 ลักษณะเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar Fiber) เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) [6]



ภาพที่ 2.10 การวางตัวของเส้นใยในการผลิตแผ่นชั้น [6]

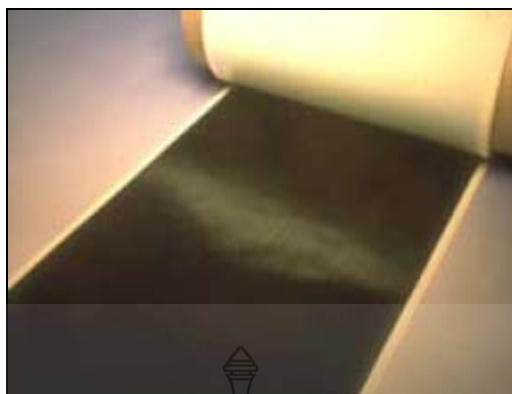


ภาพที่ 2.11 Stress – Strain เส้นใย (Fiber Reinforcement) [6]

2.6.2 ลักษณะหรือรูปแบบทั่วไปของเส้นใย (Fiber Reinforcement Form)

รูปแบบของ FRP ที่นิยมใช้งานอยู่ 3 ประเภท คือ

- 1) แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet)



ภาพที่ 2.12 ลักษณะ Fiber Sheet

2) แบบแผ่นแข็ง (Laminate, Plate)



ภาพที่ 2.13 ลักษณะ Laminate

3) แบบเส้น (Rod, Bar)



ภาพที่ 2.14 ลักษณะ Rod & Grid

Fiber Sheet จะมีรูปแบบการทอที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปงานเสริมกำลังคอนกรีตจะใช้รูปแบบจัดเรียงทิศทางเดียว (Unidirectional) เพื่อความสะดวกและประสิทธิภาพในการกำหนดทิศทางการรับแรง แต่ในบางกรณีอาจใช้รูปแบบการจัดเรียงแบบ 2 ทิศทาง (Bidirectional) เพื่อการกระจายแรง หรือเพื่อการรับแรงเฉือน ตามความเหมาะสม ข้อมูลทางเทคนิคของแผ่น GFRP แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลทางเทคนิคของ GFRP [7]

Property	Typical test value
Width (mm)	1,000
Thickness (mm)	0.5
Warp x Weft (each/inch)	6 x 6
Weight (g/m ²)	150
Filament Diameter (μm)	14
Nominal row length (m)	50 (+ 0.50 -0)
Nominal row width (m)	1 (+0.05 -0)*
Moisture content (%)	< 0.3
Loss on Lognition (L.O.I)	15
Mesh Density (%)	10 x 10 strands (warp & weft)
Nominal strand tensile strength 1,700 MPa	Per 10 cm
Elastic Modulus 72 GPa	

2.6.3 เรซิน (Resin)

1) หน้าที่หลักของเรซิน

เรซิน (Resin) มีหน้าที่หลัก 3 ประการคือ ทำหน้าที่ยึดประสานเส้นใย (Fiber) เข้าด้วยกัน, ถ่ายแรงระหว่างเส้นใย และป้องกันความเสียหายของเส้นใยจากสภาวะแวดล้อม โดยที่เรซินนั้นมีด้วยกัน 2 ประเภท คือ Thermoplastics เป็นเรซินที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ส่วนใหญ่จะใช้งานอุตสาหกรรม และ เรซินประเภท Thermosets เป็นเรซินที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกเรซินประเภทนี้จะใช้ในงานเสริมกำลัง

2) ชนิดของเรซิน (Resin Types)

ก. Unsaturated Polyesters

- Vinyl Esters (VE)
- Orthophthalic Polyesters
- Isophthalic Polyesters (Iso Polyesters)

ข. Epoxies

ค. Polyurethanes

ง. Phenolics

โดยทั่วไป Polyurethanes กับ Vinyl Esters (VE) จะเป็นวัสดุหลักที่ใช้ยึดเกาะใน Grass Fiber และ Polyurethanes กับ Epoxies จะเป็นวัสดุหลักที่ใช้ยึดเกาะใน Carbon Fiber และ Aramid Fiber ซึ่งเรซินชนิด Polyesters ไม่เหมาะสมกับ Carbon Fiber และ Aramid Fiber อีกทั้งข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ข้อมูลทางเทคนิคดังแสดงตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลทางเทคนิคของน้ำยาเรซิน [8]

Property	Typical test value	Unit
Barcol hardness (935)	84	--
Density at 20 °C	1.21	g/cm ³
Refractive index n _D ²⁰	1.557	--
Tensile strength	55	N/mm ²
Elongation	2.0	%
Flexural strength	110	N/mm ²
Modulus of elasticity	3200	N/mm ²
Impact strength	7	KJ/m ²
Impact strength with notch	1.0	KJ/m ²
Compressive strength	160	N/mm ²
Hardness after 10 sec	175	N/mm ²
Water absorption	0.3	%

2.6.4 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP)

ผิวของเส้นใย Fiber จะมีกระบวนการ Surface Treatment ได้หลายวิธี ประสิทธิภาพในการยึดเกาะ และการเสริมกำลังจะขึ้นอยู่กับวิธีการยึดเหนี่ยว และการถ่ายหน่วยแรงระหว่างผิวชิ้นงาน และแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย ซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับวิธีการประกอบแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยเข้ากับผิวชิ้นงาน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

1) Adhesive Bonding แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยที่ถูกรผลิตและบ่มมาจากโรงงานถูกยึดเข้ากับผิวชิ้นงานโดยใช้กาวภายใต้ความดัน

2) Wet Lay-up ทารซินบนผิวชิ้นงานจากนั้นวางพลาสติกเสริมเส้นใยที่อยู่ในรูปของ fabric และใช้ลูกกลิ้งกลิ้งไปบน fabric เพื่อรีดให้กาวส่วนเกินไหลออกมาเพื่อก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่สมบูรณ์

3) Resin Infusion จัดวาง Fabric ลงบนพื้นที่ที่ต้องการเสริมกำลังจากนั้นทำการห่อพื้นที่ดังกล่าวด้วย Vacuum Bag และอัดเรซินให้ซึมเข้าไปใน Fabric และให้ความดันแก่ Vacuum Bag เพื่อกดอัด Fabric ให้สัมผัสกับผิวคอนกรีตอย่างแนบแน่นซึ่งวิธีการนี้จะทำให้เรซินซึมแทรกเข้าไปในรอยแตกของชิ้นงานด้วย



ภาพที่ 2.15 การติดตั้ง Fiber Reinforced Polymer (FRP) [7]

ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังในลักษณะนี้ จะขึ้นอยู่กับการใช้ชนิดของกาวที่เหมาะสม ซึ่งควรมีค่าความแกร่งและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานและพลาสติกเสริมเส้นใยให้มากที่สุด ในสามวิธีการติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยเข้ากับผิวชิ้นงานของตน วิธีที่ใช้มากที่สุด เหมาะสมกับการก่อสร้างหนงานที่สุด และถูกที่สุดคือ วิธี Wet Lay-up อย่างไร

ก็ตามเรซินที่ใช้ควรมีปริมาณที่เหมาะสมเพราะถ้ามากเกินไปจะทำให้ Fabric ย่นได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังลดลงอย่างมาก นอกจากนั้นแล้ววิธีการนี้ อาจจะมีฟองอากาศเกิดขึ้นในเนื้อกาวยึดเป็นจำนวนมากหากไม่มีการรีดกาวยึดด้วยลูกกลิ้งที่ดี ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้กาวยึดติดกับผิวคอนกรีตและ Fabric ได้เป็นอย่างดี

2.6.5 การออกแบบและข้อกำหนดรายละเอียด

1) การกำหนดทิศทางของแรง

แรงในไฟเบอร์จะเป็นแรงดึงแนวแรงควรจะเป็นเส้นตรงในระนาบให้มากที่สุด ในการออกแบบควรมีการกระจายแรงไปตาม Fiber Filament ที่ขนานกันอย่างสม่ำเสมอ การเปลี่ยนทิศทางของแรงอย่างกระทันหันอาจทำให้เกิดความบกพร่องและเสียหายได้

2) การใช้ Code และการกำหนด Parameter ในการออกแบบ

Design Manual ต่างๆ ที่มีในปัจจุบันจะมีลักษณะเป็น Guide Line เท่านั้น เนื่องจากวัสดุและวิธีการเสริมกำลัง มีความหลากหลาย และไม่มีมาตรฐานเป็นอันเดียวกัน นอกจากนี้เงื่อนไขในการทำงาน (Working Conditions) มีความแตกต่างกันมากมายในแต่ละสถานการณ์ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงต้องพิจารณาในการเลือกใช้ Parameter ต่างๆ ให้เหมาะสมกับวัสดุกระบวนการ และสถานการณ์แต่ละกรณี และควรทำการทดสอบสมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบทุกครั้ง

2.6.6 ข้อควรระวังในการออกแบบติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP)

1) จำนวนชั้น Layer ควรมีจำนวนชั้นที่น้อยที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงจากการเกิด Debonding โดยปกติไม่ควรเกิน 3 - 4 ชั้นเมื่อเสริมกำลังด้วย Fiber Sheet และ 1 ชั้นสำหรับแบบแผ่น Laminate

2) ควรมีการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง โดยที่ Stress ที่เกิดขึ้นจากการรับแรงในแนวนอนกับผิวสัมผัสควรอยู่ในระดับที่ต่ำเท่าที่จะเป็นไปได้

3) ระยะ Development Length จากตำแหน่งที่ต้องการเสริมกำลัง และการต่อทาบของแต่ละ Layer ต้องเพียงพอต่อการถ่ายเท และกระจายแรง ทั้งใน Flexural Strengthening และ Shear Strengthening

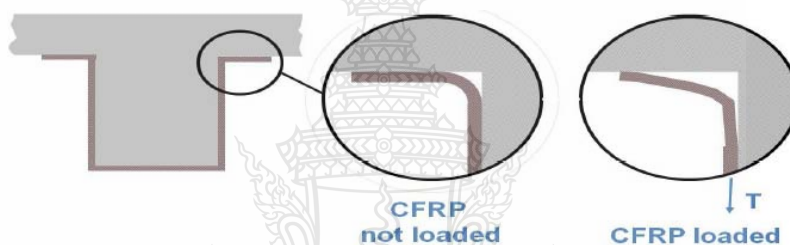
4) ควรพิจารณา Strain และ Deflection เพื่อป้องกันการ Debonding ทั้งนี้ Concrete Society Committee, UK แนะนำว่าโดยทั่วไป Strain ใน Composites ไม่ควรเกิน 0.8% เมื่อรับน้ำหนักแบบ Uniformly Distribute และ 0.6% เมื่อมี Shear และ Bending Moment ในระดับสูง เช่นเมื่อรับน้ำหนัก Concentrate Load และมี Hogging Region ใกล้กับ Support

5) ทิศทางของการเสริมกำลัง Unidirectional FRP จะสามารถรับแรงได้ดีเฉพาะในทิศทางการจัดเรียงเส้นใยเท่านั้น ส่วนในทิศทางตั้งฉากจะอ่อนแอกว่ามากหรือใช้ไม่ได้เลย

6) Bidirectional Fiber Sheet จะควบคุมแนวทิศทางแรงและคุณภาพการทำงาน ได้ยากกว่าการใช้ Unidirectional 2 ชั้นในทิศทางตั้งฉากกัน

7) โดยทั่วไป Fiber จะรับแรงเป็นแนวเส้นตรง ในการออกแบบไม่ควรเปลี่ยนทิศทางของ fiber เช่น การหักมุมหรือตัดโค้งงอ หากจำเป็นก็ควรมีรัศมีความโค้งที่เพียงพอ หรือใช้การแยกส่วนแล้วต่อทาบกับ Fiber ในทิศทางใหม่ที่ต้องการ

8) ไม่ควรติดตั้ง FRP ผ่านมุมงอด้านใน (Inner Corner) เนื่องจากจะเป็นจุดเริ่มของการ Debonding



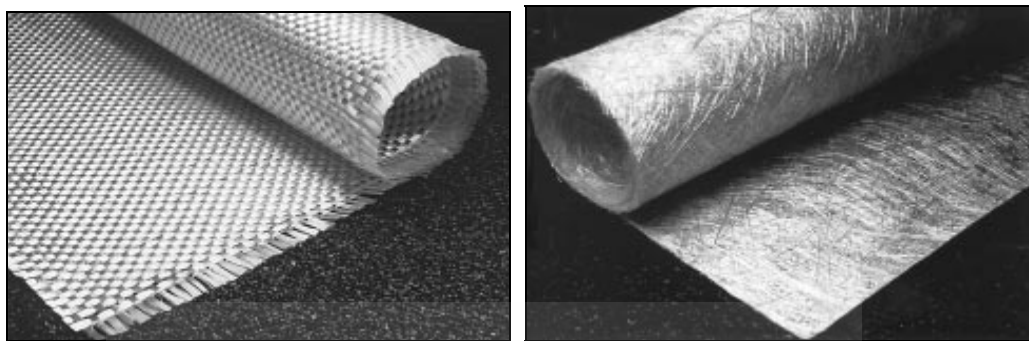
ภาพที่ 2.16 ลักษณะการ Debonding บริเวณมุมงอด้านใน [7]

9) การผสม Part A และ Part B ของ adhesive มักไม่ได้ใช้การชั่งตวงที่ถูกต้อง หรือใช้การประมาณส่วนผสมเอาเอง (บางผู้ผลิตจะระบุอัตราส่วนผสมแบบอัตราส่วนน้ำหนัก ในขณะที่บางผู้ผลิตจะระบุแบบอัตราส่วนปริมาตร) การผสม Part B (Hardener) น้อยเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาเคมีไม่สมบูรณ์ ในขณะที่ถ้า Part B มากเกินไปจะทำให้ Resin แข็งตัวรวดเร็วและเกิดความร้อนสูงในขณะที่ทำปฏิกิริยา ซึ่งอาจเปราะแตกได้

10) การใช้ Adhesive ที่มากเกินไปอาจทำให้แนวเส้นใย Fiber เกิดการเคลื่อนตัว และหย่อนในขณะที่ถ้าใช้ Adhesive ไม่เพียงพอ ก็จะทำให้เกิด Unsaturated Area ซึ่งจะทำให้การถ่ายเทแรงไม่

11) วิธีการติดตั้งที่ไม่ถูกต้องหรือขาดความชำนาญ อาจทำให้เกิดโพรงช่องว่าง (Void) หรือเส้นใย fiber เกิดการหย่อนงอ ซึ่งอาจเป็นอันตรายโดยเฉพาะในบริเวณที่มี Stress สูง

12) การลบมุมที่ไม่เรียบรอย หรือมีรัศมีความโค้งที่ไม่เพียงพอ จะทำให้บริเวณมุมมี Stress สูง และ Fiber อาจหักในขณะที่ติดตั้ง หรือฉีกขาดในขณะที่รับแรง



ภาพที่ 2.17 แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย [7]

2.6.7 ตัวอย่างการนำพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วไปใช้งานจริง คือ งานเสริมแรง Fiber Glass Reinforced Plastic (GFRP) และ งานก่อสร้าง เช่น เคลือบผิวตรงพื้นที่ต้องปะทะความร้อนสูง ผนัง เบาทะ และ ฉนวนกันความร้อนภายในอาคาร

2.7 วิธีวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) เป็นวิธีวิเคราะห์โครงสร้างที่มีประสิทธิภาพซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย และสามารถแก้ไขปัญหาหลายรูปแบบที่แตกต่างกัน หลักการที่สำคัญสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ การแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ (Discretization) ซึ่งสามารถจำลองโครงสร้างที่เป็นการรวมกัน (Assemblage) ระหว่างชิ้นส่วนย่อยๆหลายชิ้น หลักการนี้สามารถทำโครงสร้างที่ซับซ้อนให้ง่ายขึ้นและสามารถทำปัญหาให้เขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ซึ่งสามารถรวมกันให้อยู่ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ อีกทั้งแนวทางการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถวิเคราะห์ปัญหาความไม่เชิงเส้นด้านวัสดุ (Material Nonlinearity) ซึ่งวิธีวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ผู้ใช้สามารถเลือกหรือพัฒนาแบบจำลองวัสดุ (Material Model) และแบบจำลองชิ้นส่วน (Element Model) ที่เหมาะสมกับปัญหาที่ต้องการศึกษา [6]

2.7.1 ขนาดของการแบ่งในไฟไนต์เอลิเมนต์

การแบ่งชิ้นส่วนที่เหมาะสมจะมีผลกระทบต่อการวิเคราะห์ผนัง การแบ่งชิ้นส่วนละเอียดโดยไม่จำเป็นจะทำให้ระยะที่ใช้ในการคำนวณนานขึ้น ในขณะที่เดียวกันกับการแบ่งชิ้นส่วนอย่างหยาบจะไม่สามารถแทนพฤติกรรมของผนังได้อย่างถูกต้อง การแบ่งชิ้นส่วนที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณขึ้นอยู่กับปัญหาที่จะศึกษานั้นๆ เนื่องจากไม่มีกฎที่ตายตัวในการอธิบาย ในงานวิจัยนี้ตำแหน่งของการแบ่งชิ้นส่วนจะเกี่ยวข้องกับตำแหน่งของอิฐโบราณด้วย

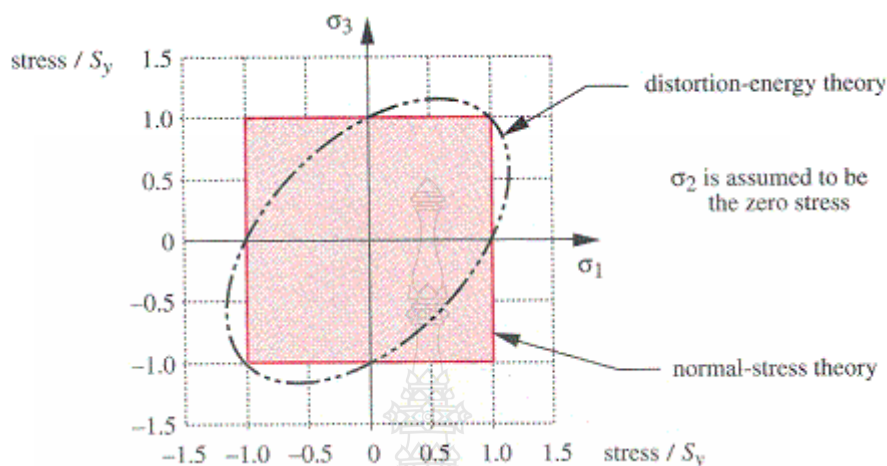
เนื่องจากอิฐโบราณจะถูกจำลองเป็นชิ้นส่วนแบบก้อน ตำแหน่งชิ้นส่วนของอิฐโบราณจะถูกออกแบบให้ใกล้เคียงกับตำแหน่งจริงของอิฐโบราณในมาก่อนเป็นผนัง

2.7.2 วิธีการของแรงกระทำ

ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนของอิฐโบราณจะมีวิธีการอยู่ 2 แบบ คือวิธีการแบบบังคับแรงกระทำ (Load-control Algorithm) และ วิธีแบบบังคับการเคลื่อนที่ (Displacement-control Algorithm) ในวิธีแบบบังคับแรงกระทำนั้น แรงกระทำจะเพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นของแรงกระทำ ในขณะที่วิธีการแบบบังคับการเคลื่อนที่ ระยะการเคลื่อนตัวที่จุดต่อที่ให้แรงจะเพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นของแรงกระทำ ได้กล่าวว่า วิธีแบบบังคับการเคลื่อนที่จะให้ผลการวิเคราะห์สำหรับชิ้นส่วนอิฐโบราณที่รับแรงกระทำแบบเป็นแรงอัดตามแนวแกนที่แม่นยำขึ้น ถ้ามีการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำมากอาจทำให้เกิดค่าความแข็งแรงของชิ้นส่วนทำให้ผลลัพธ์ไม่ได้ใกล้เคียง แต่ถ้าการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำมีขนาดเล็กเกินไป จะทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการวิเคราะห์ โดยที่วิธีการแบบบังคับการเคลื่อนที่จะให้ผลลัพธ์ที่มีเสถียรภาพมากกว่าวิธีแบบบังคับแรงกระทำ เนื่องจากระยะการเคลื่อนตัวที่กำหนดจะไม่เกินความสามารถในการเคลื่อนตัวของวัตถุ เนื่องจากประวัติการรับแรงรอบๆๆ ดังนั้นวิธีการแบบบังคับการเคลื่อนที่จะถูกใช้ในงานวิจัยนี้ ในการออกแบบชิ้นงานวิศวกรรมจำนวนมากนั้น ชิ้นงานต้องรับแรง เช่น ความเค้นดึง ความเค้นกด และความเค้นเฉือน ซึ่งเรียกว่าความเค้นผสม (Combined Stress) และเป็นสามมิติ โดยความเสียหายของชิ้นงานโดยเทียบจากการดึงชิ้นงานทดสอบในแนวแกนหรือมิติเดียว แล้วแบ่งวัสดุที่เสียหายเป็นวัสดุเหนียว (Ductile Material) และเปราะ (Brittle Material) มีลักษณะการเสียหายที่แตกต่างกัน โดยวัสดุเหนียวจะเกิดความเสียหายเมื่อค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุถึง Yield Point ถ้าความเค้นเกินค่านี้ไปแล้ววัสดุจะไม่สามารถคืนสู่สภาพเริ่มต้นได้ ดังนั้นเมื่อถึงความเสียหาย (Failure) ของวัสดุเหนียว ในส่วนวัสดุเปราะนั้นจะไม่มี Yield point ความเสียหายจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อวัสดุรับความเค้นจนเกิดการแตกหรือแยกของเนื้อวัสดุ ดังนั้นเมื่อก้าวถึงความเสียหาย (Failure) ของวัสดุเปราะก็ต้องพุดถึง Ultimate Stress ซึ่งคือค่าความเค้นที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก

Maximum Normal Stress Theory ทฤษฎีนี้กล่าวว่าวัสดุจะเกิดความเสียหาย เมื่อเกิดความเค้นจากภายในเนื้อวัสดุนั้นถึงค่า Ultimate Tensile Strength ของวัสดุ ภาพที่ 2.18 แสดงขอบเขตความปลอดภัยของวัสดุเปราะของ Maximum Normal Stress Theory ในสองมิติ ซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในควอดแดรนต์ที่ 1 และ 3 ค่าของ Maximum Normal Stress Theory จะเท่ากับค่าของ Maximum Shear Stress Theory แต่ในควอดแดรนต์ที่ 2 และ 4 ขอบเขตของทฤษฎีนี้จะอยู่ข้างนอกหรือมากกว่าทั้ง Maximum Shear Stress Theory และ Distorsion Energy Theory จากการทดลองจะแสดงให้เห็นว่า

สำหรับวัสดุเปราะการเสียหายจะใกล้เคียงกับ Maximum Normal Stress Theory มากกว่าทฤษฎีสำหรับวัสดุเหนียวทั้งสองทฤษฎี (Maximum Shear Stress และ Distortion Energy Theory)



ภาพที่ 2.18 ขอบเขตความปลอดภัยของวัสดุเปราะของ Maximum Normal Stress Theory [9]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับกำแพงรับน้ำหนักที่ผ่านมาในอดีต ได้มีการค้นคว้ามาเป็นเวลานาน โดยเฉพาะในต่างประเทศแถบอเมริกา แคนาดา ออสเตรเลีย และยุโรป ในประเทศก็มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยกำแพงรับน้ำหนักบ้างพอสมควร แต่ยังไม่มีการกำหนดรูปแบบและวางข้อบังคับที่เหมาะสมในการที่จะนำมาใช้งานก่อสร้าง

2.8.1 วัสดุอิฐ

Monk (1967) [10] ศึกษาอัตราส่วนของกำลังรับน้ำหนักของผนังอิฐก่อก่อต่อกำลังรับน้ำหนักของอิฐ เรียกว่า ประสิทธิภาพของผนังมีค่าอยู่ในช่วง 10 – 90 % จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของผนังก่ออิฐดินเหนียวมีค่าอยู่ในช่วง 10 – 40 % ประสิทธิภาพของผนังก่ออิฐปูนขาวผสมทรายมีค่าเพิ่มเป็น 50 % และประสิทธิภาพของผนังคอนกรีตบล็อกมีค่า 50 – 90 % โดยค่าที่ต่ำกว่าเป็นผนังที่ใช้ปูนก่อที่มีกำลังต่ำ และค่าที่สูงกว่าใช้ปูนก่อที่มีกำลังสูง

อนุเทพ แชนวตระกูล (1985) [11] ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงที่ทำจากอิฐท้องถิ่น ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้ง และ แผ่นกระจายสมำเสมอในการศึกษาครั้งนี้ทำการคัดเลือกอิฐมาสามชนิด คือ

ชนิดที่ 1 อิฐก่อสร้างสามัญขนาดใหญ่ (บบก.)

ชนิดที่ 2 อิฐก่อสร้างสามัญขนาดใหญ่ (ภราคร)

ชนิดที่ 3 อีฐก่อสร้างสามัญขนาดเล็ก (มอญเทียม)

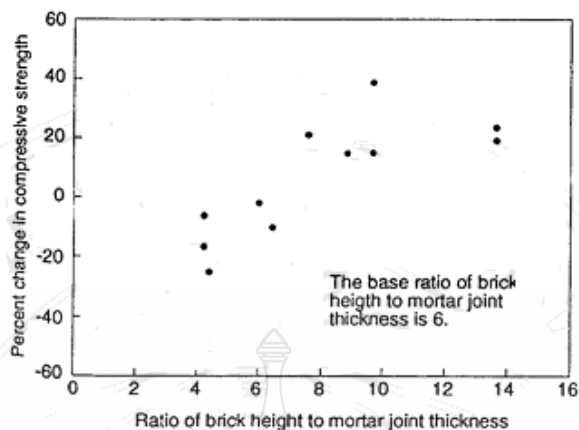
แล้วนำมาก่อกำแพงอิฐที่อัตราส่วนความชะลุด 5 อัตราส่วน โดยทำการถ่ายน้ำหนักบรรทุกในแนวคั้ง แบบผ่ากระจายตรงศูนย์กลาง จากการวิจัยพบว่า กำลังรับแรงอัดของกำแพงอิฐ ชนิดที่ 1 ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 85 ksc ถึง 91 ksc กำลังรับแรงอัดของกำแพงอิฐ ชนิดที่ 2 ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 23 ksc ถึง 53 ksc และกำลังรับแรงอัดของกำแพงอิฐอยู่ระหว่าง 40 ksc ถึง 64 ksc ซึ่งกำลังรับแรงอัดของกำแพงอิฐที่ได้มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความชะลุดมีมากขึ้น

2.8.2 การก่ออิฐ

ธีรพงษ์ สว่างปัญญากร และ นภคณ เกื้อนศิริ (2522) [12] ในการรับน้ำหนักกระทำตรงศูนย์กลาง โดยการเอาอิฐชนิดต่าง ๆ ที่พบในจังหวัดเชียงใหม่ และ คาดว่าจะสามารถนำมาก่อเป็นผนังรับน้ำหนักได้ และ ปูนก่อมาตรฐานศึกษาถึงคุณภาพคุณสมบัติทางวิศวกรรม ประกอบทฤษฎีที่ใช้ผลการวิจัยพบว่าอิฐชนิดต่าง ๆ ที่เลือกทำการศึกษานี้ ยังมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมที่จะใช้ก่อเป็นผนังรับน้ำหนักโดยตรงในโครงสร้างทั่วไปได้

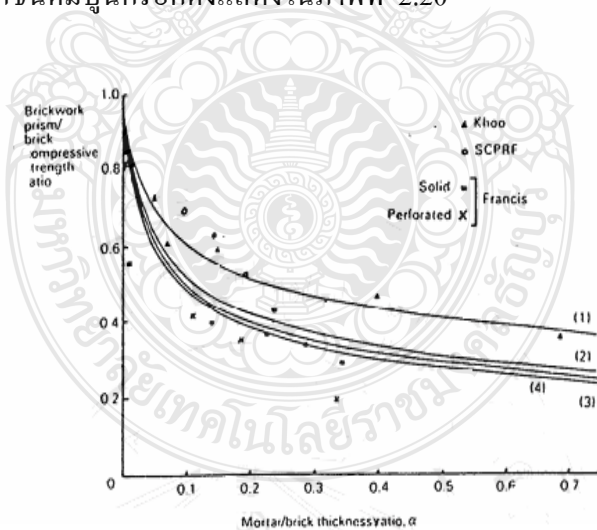
Francis et al. (1971) [13] พบว่าถ้าอัตราส่วนความหนาของปูนก่อต่อความหนาของอิฐสูงขึ้นกำลังรับน้ำหนักของผนังก่ออิฐจะลดลงซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของผนังก่ออิฐไม่ใช่ความหนาของปูนก่อหรือความหนาของอิฐแต่เป็นอัตราส่วนของทั้งสอง ที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของผนัง โดยทั่วไปในการก่อผนังจะใช้อิฐขนาดเดียวกันในการก่อดังนั้นอัตราส่วนดังกล่าวขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นปูนก่อซึ่งมาตรฐานความหนาของชั้นปูนก่อที่ยอมรับทั่วไปในต่างประเทศคือ 3/8 นิ้ว หรือประมาณหนึ่งเซนติเมตร

Hendry (1981) [14] ศึกษาผลของอัตราส่วนของความสูงของอิฐกับความหนาของปูนก่อต่อกำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐพบว่าถ้าอัตราส่วนของความสูงอิฐต่อความหนาของปูนก่อสูงขึ้นกำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐจะมีค่าสูงขึ้นนั่นคือถ้าความหนาของอิฐคงที่ความหนาของปูนก่อที่ลดลงจะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐสูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ผลของอัตราส่วนของความสูงอิฐกับความหนาของปูนก่อก่อกำลังรับแรงอัด [14]

Drysdale and Hamid (1979) [15] ได้ทดลองโดยเพิ่มความหนาของปูนก่อก่อจากประมาณหนึ่งเซนติเมตร ขึ้นไปเป็นสองเท่า เปรียบเทียบกำแพงคอนกรีตบล็อกชนิดมีปูนกรอกและไม่มีปูนกรอกพบว่าถ้าความหนาของปูนก่อก่อสูงขึ้น กำลังรับแรงของปริซึมของคอนกรีตบล็อกชนิดมีปูนกรอกและไม่มีปูนกรอกจะมีค่าลดลง โดยที่ความหนาของปูนก่อก่อมีผลต่อคอนกรีตบล็อกชนิดไม่มีปูนกรอกมากกว่าคอนกรีตบล็อกชนิดมีปูนกรอกดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 ผลของอัตราส่วนความหนาของปูนก่อก่อกับความหนาของอิฐต่อกำลังรับน้ำหนักของปริซึมอิฐก่อก่อ [15]

2.8.3 รูปแบบการจัดเรียงอิฐ

Hedstrom (1961) [16] ได้ศึกษาผลของการจัดเรียงของอิฐในลักษณะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 1.4 มีชื่อเรียกแบบต่าง ๆ ดังนี้ Running Bond Horizontal Stack Bound Vertical Stack Bound Diagonal Basket Weave Diagonal Running Bond และ Coursed Ashlar จากการศึกษาพบว่าผนังที่ก่อแบบ Running Bond และ Horizontal Stack Bound มีค่าใกล้เคียงกัน พบว่าประสิทธิภาพของผนังอยู่ระหว่าง 40 -60 % ผนังที่ก่อแบบ Vertical Stack Bound จะให้ค่ากำลังรับน้ำหนักประมาณ 78 % ของกำลังรับน้ำหนักของผนังที่ก่อแบบ Running Bond และ Horizontal Stack Bound ผนังที่ก่อแบบ Diagonal Running Bond Diagonal Basket Weave Basket Weave A และ Basket Weave B ให้ค่ารับน้ำหนักของผนังอยู่ระหว่าง 74 -77 % ของการก่อแบบ Running Bond ทั้งนี้เพราะว่าผนังที่ก่อแบบแนวเอียงเมื่อรับน้ำหนักจะมีผลจากแรงเฉือนมาเกี่ยวข้องด้วย และทำให้กำลังรับน้ำหนักของผนังลดลง ผนังที่ก่อแบบ Basket Weave A และ Basket Weave B ประกอบด้วยก้อนอิฐที่ก่อในลักษณะตั้งจึงทำให้กำลังรับแรงอัดของผนังลดลง ผนังที่ก่อแบบ Coursed Ashlar ให้กำลังรับน้ำหนักประมาณ 95 % ของผนังก่อแบบ Running Bond

Boult (1979) [17] ได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของวัสดุก่อ 3 กลุ่ม มีอัตราส่วนความสูงต่อความหนา (h/d) อยู่ระหว่าง 1 -3 3 -5 และ 5 - 12 พบว่าอัตราส่วนความสูงต่อความหนามีค่าระหว่าง 1- 3 ผลของการยัดที่ปลายจะเพิ่มกำลังรับน้ำหนักอัตราส่วนความสูงต่อความหนามีค่าระหว่าง 3 -5 การยัดที่ปลายจะมีผลน้อยลงกำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากผลของปลายยัด และเมื่ออัตราส่วนความสูงต่อความหนามีค่าระหว่าง 5 -12 จะพบว่าผลการยัดที่ปลายจะไม่มีอิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนักของผนังเลย

Grimm(1975) [18] ได้ทำการทดสอบผนังอิฐเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่เกี่ยวข้องของผนังอิฐ จากการศึกษาพบว่า กำลังอัดของผนังอิฐขึ้นอยู่กับกำลังอัดของอิฐ กำลังอัดของปูนก่อ คุณภาพของแรงงานที่ใช้ ขนาดและทิศทางของน้ำหนักระทำรูปร่างของผนังอิฐ นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดของผนังอิฐจะเพิ่มขึ้นเมื่อผนังมีการเรียงวางอิฐในการ

Drysdale & Hamid (1979) [15] ได้ทำการทดสอบปริซึมคอนกรีตบล็อกภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยได้มีการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของคอนกรีตบล็อกอัตราส่วนผสมของปูนก่อ การอุดช่องว่างของคอนกรีตบล็อกจากการทดสอบปรากฏว่า กำลังอัดโดยเฉลี่ยของปริซึมที่มีการอุดช่องว่างมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดโดยเฉลี่ยของปริซึมที่ไม่มีอุดช่องว่าง ซึ่งบ่งชี้ว่าการอุดช่องว่างในคอนกรีตบล็อกไม่มีผลในการเพิ่มกำลังอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อก

ธีระพงษ์ สว่างปัญญากร และ นพดล เกื้อนศิริ (2522) [12] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของอิฐชนิดต่างๆที่คาดว่าจะสามารถนำมาใช้เป็นผนังรับน้ำหนักโดยศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมแล้วนำมาแทนค่าในสูตรคำนวณกำลังรับน้ำหนักของผนังรับน้ำหนักโดยไม่ได้มีการทดสอบผนังอิฐจริง จากการศึกษาปรากฏว่า อิฐที่นำมาศึกษายังมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นผนังรับน้ำหนักโดยตรงในโครงสร้างทั่วไปได้ เพราะอิฐยังมีกำลังต้านทานเป็นผลมาจากชั้นตอนและกรรมวิธีการผลิตที่ยังไม่ได้มาตรฐาน วัสดุที่ใช้ทำอิฐมีคุณภาพต่ำ อย่างไรก็ตามผนังก่อด้วยอิฐที่นำมาศึกษานี้ ยังมีกำลังส่วนหนึ่งที่จะนำมาใช้รับน้ำหนักของโครงสร้างง่ายๆ ที่รับน้ำหนักไม่มากได้

เอนก ชมวงษ์ (1981) [19] ได้ศึกษากำแพงอิฐ 5 ตัวอย่าง ซึ่งใช้อิฐมอญและอิฐชลบุรี โดยก่อกำแพงแบบ Running Bond สูง 1.50 ม.แล้วทำการทดสอบโดยการใส่แรงทางด้านข้างจากการทดสอบปรากฏว่าความแข็งแรงของผนังอิฐต่อการรับแรงทางด้านข้างขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงดึงของผนังอิฐและอัตราส่วนความยาวต่อความสูงของผนังอิฐ (L/H)

Thayaparan (1982) [20] ได้ศึกษาอิฐ 4 ชนิด แล้วทำการคัดเลือกอิฐชนิดที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นเสาแล้วทำการทดสอบ โดยได้ทำการเปลี่ยนค่าของน้ำหนักบรรทุกทุกอายุของเสาอิฐส่วนผสมของปูนก่อ และอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของเสาอิฐ (H/L) โดยได้ทดสอบแบบแรงกระทำตรงศูนย์และแรงกระทำเอียงศูนย์

ประวัตติ ตั้งศิริวัฒนกุล (1982) [21] ได้ศึกษาความแข็งแรงระบบกำแพงรับน้ำหนักซึ่งรับน้ำหนักตามแนวแกนที่ทำจากคอนกรีตบล็อกในท้องถิ่นที่ได้รับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย ซึ่งกำแพงที่นำมาทดสอบแบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบเสริมเหล็กและแบบไม่เสริมเหล็ก แล้วนำผลการทดสอบที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาลำดับอัตราและนำไปเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาจากการทดสอบปรากฏว่า ผลการทดสอบสามารถนำมาสรุปเป็นสูตร และนำไปใช้การหาค่ากำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกในท้องถิ่นได้

ชีวลัก (2548) [9] ได้ศึกษาความเพื่อคำนวณการรับแรงตามแนวแกนของผนังก่อคอนกรีตบล็อกประสาน และการคำนวณการรับแรงตามแนวแกนของผนังอยู่ในรูปสูตร Empirical ผลการศึกษาพบว่าการวิเคราะห์แบบจำลองตามวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ให้ค่าแรงกดตามแนวแกนสอดคล้องกับผลการทดสอบแบบ Full-Scale และ สอดคล้องกับผลการคำนวณค่าแรงกดประลัยด้วยสูตร Empirical



ภาพที่ 2.21 การทดสอบผนังคอนกรีตบล็อกประสาน [9]



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เพื่อหาคุณสมบัติทางกล และทางกายภาพพื้นฐานของอิฐทดแทนอิฐโบราณและปูนก่อ จากนั้นนำวัสดุดังกล่าวมาก่อเป็นผนังเพื่อหาความสามารถการรับแรงอัดตามแนวแกนของผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ โดยผนังก่ออิฐจะแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ ผนังก่ออิฐที่ไม่ได้เสริมแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) ผนังก่ออิฐที่เสริมวัสดุแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว GFRP และผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริมวัสดุแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว GFRP จากนั้นเมื่อได้ข้อมูลจากการทดสอบแบบ Full-scale Test แล้วจึงได้ใช้วิธีวิเคราะห์วิธีไฟในอิฐาเมนต์ เพื่อมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบแบบ Full-scale Test โดยสามารถแบ่งขั้นตอนต่างๆ ได้ดังนี้

3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของอิฐทดแทนอิฐโบราณ

3.1.1 การวัดขนาดของอิฐ



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างของอิฐที่ใช้ในการทดสอบ

1) เครื่องมือ

บรรทัดเหล็กซึ่งแบ่งละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร หรือ เครื่องวัดระยะหรือคาลิเปอร์ซึ่งอ่านค่าได้จาก 10 ถึง 300 มิลลิเมตร และ เป็นชนิดที่มีปากขนานกันสำหรับใช้วัดขนาดของแต่ละก้อน เครื่องมือนี้ใช้สำหรับวัดขนาดของอิฐ

2) จำนวน และ ลักษณะก้อนตัวอย่าง

ใช้อิฐก้อนเต็มขณะแห้ง จำนวน 10 ก้อน อิฐเหล่านี้จะต้องเป็นตัวแทนของอิฐทั้งหมด ควรจะมีขนาด และ สีแตกต่างกันมากที่สุดเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า

3) วิธีวัดความยาว ความกว้าง ความหนาของอิฐแต่ละก้อน

ใช้เครื่องมือในข้างต้นวัดความยาวของก้อนทางหน้ายาวทั้ง 4 หน้า โดยวัดที่จุดกึ่งกลางของแต่ละหน้าบันทึกผลการวัดทั้ง 4 หน้า ให้ละเอียดถึง 0.5 มิลลิเมตร และ บันทึกค่าเฉลี่ยของความยาวให้ละเอียดถึง 0.5 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.2 การวัดขนาดของอิฐที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.2 การหาน้ำหนักของอิฐ

1) เครื่องมือ

ก. เครื่องชั่งต้องมีความไวภายในร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่เล็กที่สุดที่ถูกทดสอบ

ข. ตู้อบแห้งต้องมีอากาศภายในหมุนเวียนได้อย่างทั่วถึง และ รักษาระดับอุณหภูมิระหว่าง 110 ถึง 115 องศาเซลเซียส

ค. พัดลม

2) วิธีการทดสอบ

ก. การทำให้แห้งโดยทำก้อนตัวอย่างให้แห้งในตู้อบแห้ง ที่อุณหภูมิระหว่าง 110 ถึง 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก และเข้าอบใหม่นาน 2

ชั่วโมง นำออกมาชั่งน้ำหนักใหม่ หากปรากฏว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปไม่เกิน ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนัก ก่อนตัวอย่างในการชั่งครั้งที่ก่อนถือว่าก่อนน้ำหนักนั้นแห้งใช้ทดสอบต่อไปได้ หากน้ำหนักที่สูญเสียไปเกินเกณฑ์ดังกล่าว ให้อบแห้งนานครั้งละ 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.3 การทดสอบการหาน้ำหนักโดยการอบแห้ง

ข. การทำให้เย็นหลังจากทำให้แห้งแล้ว ทำให้เย็นลงในห้องทดลองรักษาระดับ อุณหภูมิ 24 ± 8 องศาเซลเซียส ให้มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 30 ถึง 70 เก็บตัวอย่างไว้ในที่ซึ่งไม่มีลม พัดผ่านโดยวางแยกกันไม่ให้ติดกันหรือ ซ้อนกันเป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง จนกว่าเมื่อสัมผัสไม่ รู้สึกอุ่นจึงนำไปชั่งต่อไปได้ การทำให้ก้อนตัวอย่างเย็นเท่าอุณหภูมิห้องโดยประมาณอาจทำได้อีกวิธี หนึ่ง คือ เก็บก้อนตัวอย่างโดยวางแยก ๆ กันในห้องที่อากาศถ่ายเทได้สะดวกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดย เปิดพัดลมให้กระแสลมพัดผ่านก้อนตัวอย่างเป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง

ค. นำก้อนตัวอย่างที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเรียกว่า น้ำหนักแห้ง



ภาพที่ 3.4 การทดสอบการหาน้ำหนักหลังจากการอบแห้ง

3) วิธีคำนวณ และ รายงานผล

ก. คำนวณหาน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ของก้อนตัวอย่าง โดยการหารน้ำหนักทั้งหมดเป็นกิโลกรัม ด้วย

ข. รายงานผลการคำนวณแต่ละก้อน และ ผลเฉลี่ยจาก 5 ก้อน หรือ มากกว่านั้น

3.1.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption Test)

1) ตัวอย่างทดสอบในการทดสอบนี้ ตัวอย่างทดสอบเป็นอิฐเต็มก้อนที่อยู่ในสภาพสมบูรณ์คือไม่มีแตกหักหรือบิ่น โดยจะใช้ตัวอย่างทดสอบที่แห้งและมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องจำนวน 5 ตัวอย่างทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบแต่ละก้อน

2) การวัดการดูดซึมน้ำ ทำได้โดยการจุ่มตัวอย่างทดสอบในน้ำสะอาดที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 15.5 ถึง 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง จากนั้น นำตัวอย่างทดสอบขึ้นจากน้ำและเช็ดตัวอย่างทดสอบด้วยผ้าที่ชื้น เพื่อเอาน้ำส่วนเกินที่ผิวของตัวอย่างทดสอบออก แล้วชั่งน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ การนำตัวอย่างทดสอบขึ้นจากน้ำและชั่งน้ำหนักจะต้องทำให้เสร็จภายใน 5 นาที

3) การคำนวณค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบจะหาได้จากสมการ

$$Absorption = \frac{100(W_s - W_d)}{W_d} \quad (3.1)$$

โดยที่

W_d = น้ำหนักของตัวอย่างทดสอบที่แห้ง

W_s = น้ำหนักของตัวอย่างทดสอบหลังจากแช่น้ำในน้ำเย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

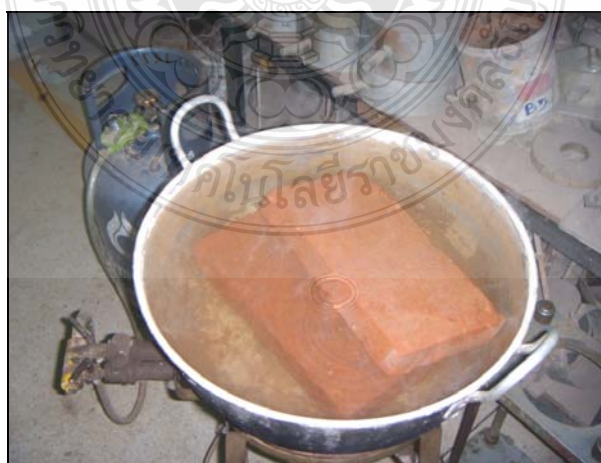


ภาพที่ 3.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำโดยการแช่น้ำ

3.1.4 การทดสอบการต้มเดือด (Boiling Test) แบบ 2 ชั่วโมง

1) ตัวอย่างทดสอบในการทดสอบนี้ ตัวอย่างทดสอบจะเป็นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการแช่น้ำ ซึ่งดูดซึมน้ำจนมีความอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว

2) ทำการต้มน้ำที่มีตัวอย่างทดสอบแช่อยู่ให้เดือดภายใน 1 ชั่วโมง แล้วทำการต้มต่อไปเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง จากนั้น ทำการดับไฟ รอจนกระทั่ง อุณหภูมิของน้ำลดลงอยู่ในช่วง 15.5 ถึง 30 องศาเซลเซียส แล้วนำตัวอย่างทดสอบขึ้นจากน้ำและเช็ดตัวอย่างทดสอบด้วยผ้าที่ชื้น เพื่อเอาน้ำส่วนเกินที่ผิวของตัวอย่างทดสอบออก แล้วชั่งน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ ขึ้นตอนที่นำตัวอย่างทดสอบขึ้นจากน้ำและชั่งน้ำหนักนี้จะต้องทำให้เสร็จภายใน 5 นาที



ภาพที่ 3.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำโดยการต้มเดือดแบบ 2 ชั่วโมง

- 3) การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบจะหาได้จาก
ค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบจะหาได้จากสมการ

$$Boiling = \frac{100(W_s - W_d)}{W_d} \quad (3.2)$$

โดยที่

W_d = น้ำหนักของตัวอย่างทดสอบที่แห้ง

W_s = น้ำหนักของตัวอย่างทดสอบหลังจากการต้มเดือด

3.1.5 วิธีทดสอบการรับแรงกดอัด (Compressive Strength Test) [2]

1) ตัวอย่างทดสอบ

ในการทดสอบนี้ตัวอย่างทดสอบจะเป็นอิฐเต็มก้อนที่อยู่ในสภาพสมบูรณ์คือไม่มีแตกหักหรือบิ่น โดยจะใช้ตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่าง

ก. การปรับผิวตัวอย่าง การปรับผิวที่รับแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นการปรับผิวด้วยปูนพลาสติก (Gypsum Capping) ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ทำการปรับผิว คือปูนพลาสติกและน้ำ โดยใช้อัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก การปรับผิวนี้将有ความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร หลังจากทำการปรับผิวแล้วผิวดังกล่าวจะต้องมีความลาดเอียงไม่เกิน 0.076 มิลลิเมตร ต่อ 406.4 มิลลิเมตร

ข. การวางตัวอย่างทดสอบโดยให้จุดกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบของด้านแบน (Flat Wise) ที่ได้รับการปรับผิวแล้วอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของหัวกดแบบ Spherical Upper Bearing ของเครื่องทดสอบ

ค. เครื่องมือที่ใช้ทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานของสมาคมเพื่อการทดสอบและวัสดุของอเมริกัน ASTM E4

ง. ความเร็วในการทดสอบ

ในการทดสอบนี้ เมื่อแรงกระทำมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของแรงกดอัดประลัยของอิฐดินเผา มาตรฐาน ASTM กำหนดให้ความเร็วในการทดสอบมีค่าเท่าใดก็ได้ ตามความเหมาะสมของเครื่องทดสอบ และเมื่อค่าแรงกระทำมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของแรงกดอัดประลัย มาตรฐาน ASTM กำหนดให้ความเร็วในการทดสอบจะต้องอยู่ในช่วงที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติภายใน 1 ถึง 2 นาที



ภาพที่ 3.7 การทดสอบการรับแรงกดอัด

2) การคำนวณ

กำลังรับแรงกดอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength) ของก้อนอิฐจะหาได้
สมการ

$$f'_{br} = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

โดยที่

f'_{br} = กำลังรับแรงอัดประลัยของตัวอย่างทดสอบมีหน่วยเป็น kg/cm^2 หรือ ksc

F = แรงกระทำสูงสุด มีหน่วยเป็น kg

A = พื้นที่เฉลี่ยของผิวด้านบน และ ด้านล่างของตัวอย่างทดสอบที่รองรับแรงกดอัด มีหน่วยเป็น cm^2

3.2 ผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ

เพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ อีกทั้งเป็นการตรวจสอบถึงวิธีการประมาณการรับแรงอัดตามแนวแกนของผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ

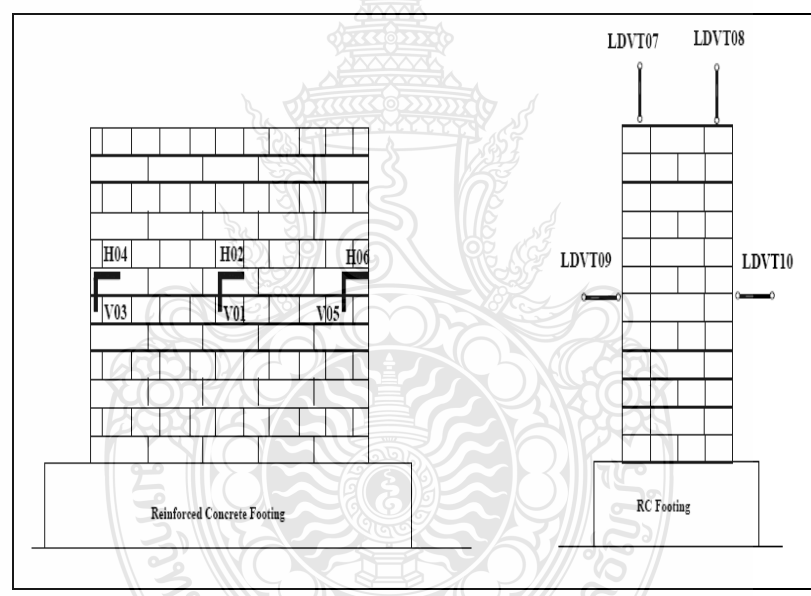
ตารางที่ 3.1 สรุปชนิดของผนังที่ใช้ทดสอบ

ผนังที่	ชนิดของผนังที่ทำการทดสอบ	หมายเหตุ
1	ผนังที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP	
2	ผนังที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP	
3	ผนังที่เสริมวัสดุ GFRP แบบ Full	
4	ผนังที่เสริมวัสดุ GFRP แบบ Strip	
5	ผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริมด้วย GFRP แบบ Full	
6	ผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริมด้วย GFRP แบบ Strip	

ผนังที่ทดสอบมีขนาด ความหนา 0.63 เมตร ความกว้าง 1.54 เมตร และ ความสูง 1.20 เมตร ผนังอิฐก่อทดสอบก่อด้วยอิฐโบราณซึ่งเป็นอิฐทดแทนอิฐโบราณสำหรับการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน ที่ผลิตใน ตำบลลุมพลี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ผนังอิฐก่อโบราณทดสอบก่ออยู่บนฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด ความกว้าง 0.90 เมตร ยาว 2.00 เมตร หนา 0.30 เมตร ด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบมีน้ำหนักรัดทาบระหว่างที่มีการให้แรงกระทำกับผนังขณะที่ทำการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ โดยการทดสอบผนังอิฐก่อ ผนังที่ 1 และ ผนังที่ 2 เป็นการทดสอบพฤติกรรม และหาค่าแรงอัดตามแนวแกน จากนั้นนำผนังก่ออิฐก่อ ผนังที่ 3 และ ผนังที่ 4 ทำการติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ GFRP ชนิดแบบแผ่น (Sheet) ในแนวตั้งฉากกับแรงที่กระทำโดยให้แรงอัดตามแนวแกนกับผนังอิฐก่อโบราณ จากนั้นนำผนังก่ออิฐก่อ ผนังที่ 1 และ ผนังที่ 2 ที่ทดสอบไปแล้วนำมาซ่อมแซมด้วยวัสดุ GFRP ให้เป็นผนังก่ออิฐ ผนังที่ 5 และ ผนังที่ 6 จึงให้แรงกระทำซ้ำอีกรอบการปล่อยแรงกระทำในแนวตั้งจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ระหว่างที่ทดสอบผนังเมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้นต้องทำการตรวจความเสียหายของผนังอิฐก่ออิฐพร้อมทั้งสังเกตภาพรอยร้าวและวัดความกว้างของรอยร้าวที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบผนังเมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้นต้องทำการตรวจความเสียหายของผนังอิฐก่ออิฐพร้อมทั้งสังเกตภาพรอยร้าวและวัดความกว้างของรอยร้าวที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ รวมทั้งต้องมีการตรวจความเสียหาย (Debonding) ของแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) สำหรับการวัดระยะการเคลื่อนที่ของ LVDT และ Strain Gauge ที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบ ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.8 ผนังเป็นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 3.9 ตำแหน่งของ LVDT



ภาพที่ 3.10 ตำแหน่งของ Strain Gauge

หมายเหตุ ตำแหน่งที่ 1-6 แสดงตำแหน่งของ Strain Gauge และ ตำแหน่งที่ 7-9 แสดงตำแหน่งของ LVDT

3.3 การทดสอบการหาค่ากำลังแรงกดอัด (Compressive Strength Test)

ของผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ โดยแบ่งออกเป็น 6 ผนังดังต่อไปนี้ คือ

3.3.1 การทดสอบการหาค่ากำลังแรงกดอัด (Compressive Strength Test) ของผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP ผนังที่ 1 และ ผนังที่ 2

1) วิธีการทดสอบ

ก. ทำการปรับผิวอิฐก่อนล้างสุด 1 ด้าน ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้การปรับผิว คือ ปูนพลาสติก และ น้ำ อัตราส่วน (2:1) โดยน้ำหนักรการปรับผิวนี้จะมีขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร จากนั้นทำการบ่มปูนพลาสติกเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปก่อผนัง

ข. นำอิฐตัวอย่างที่จะถูกก่อเป็นผนัง แช่น้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อลดการดูดซึมน้ำของอิฐจากปูนก่อ

2) ทำการก่อผนังอิฐโบราณโดยวางอิฐแบบ Stretcher และ มีรอยต่อแบบ Flush Joint โดยที่ความหนาของของรอยต่อมีความหนา 1 เซนติเมตร

3) การบ่มหลังจากการก่อจะเป็นแบบตั้งทิ้งไว้ในอาคารจะเป็นการใช้ถุงพลาสติกคลุมให้มิดชิด บ่มทิ้ง

4) การปรับผิวอิฐก่อนบนสุดของผนังก่อทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง

5) ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดที่ 28 วัน โดยบันทึกค่าของแรงกดอัด โดยใช้เครื่องแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) ขนาด 150 ตัน พร้อมแท่นยึดกดแล้วให้แรงกระทำ

6) นำผลการทดสอบที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกดอัด และความเครียดของแต่ละผนัง

$$f'_{br} = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

โดยที่

f'_{br} = กำลังรับแรงอัดประลัยของตัวอย่างทดสอบมีหน่วยเป็น kg/cm^2 หรือ ksc

F = แรงกระทำสูงสุด มีหน่วยเป็น kg

A = พื้นที่เฉลี่ยของผิวด้านบน และ ด้านล่างของตัวอย่างทดสอบที่รองรับแรงกดอัด มีหน่วยเป็น cm^2

3.3.2 การทดสอบการหาค่ากำลังแรงกดอัด (Compressive Strength Test) ของผนังที่เสริมวัสดุ GFRP ผนังที่ 3 และ ผนังที่ 4

1) วิธีการทดสอบ

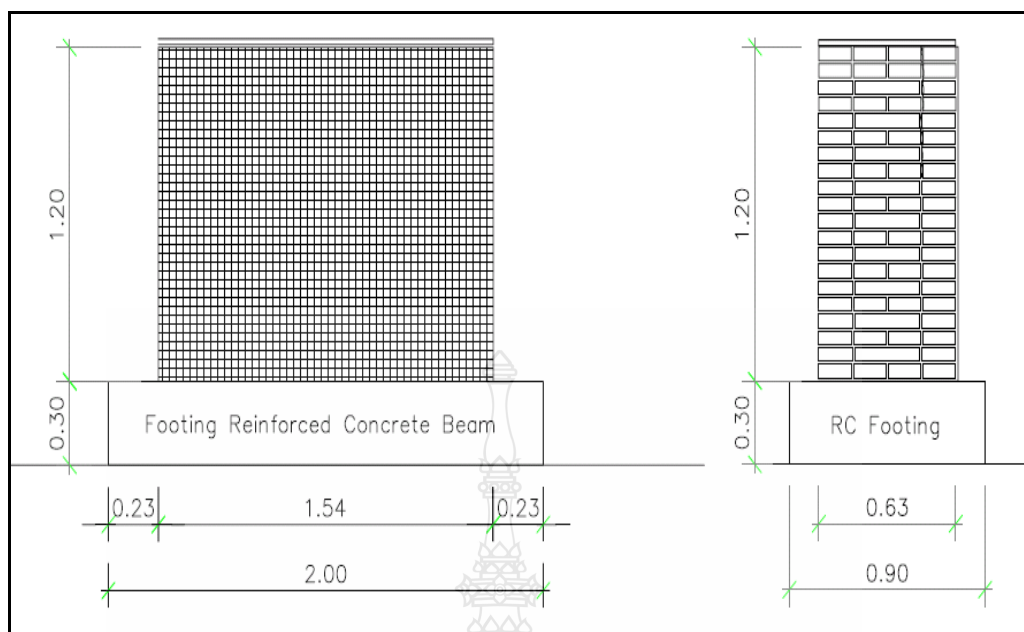
ก. ทำความสะอาดของพื้นผิวที่จะติดแผ่น GFRP ให้สะอาดปราศจากฝุ่นเพื่อช่วยเพิ่มการยึดเกาะของผนัง

ข. ผสมน้ำยาเรซินที่เตรียมไว้ทารองพื้นก่อน 2 ชั้น

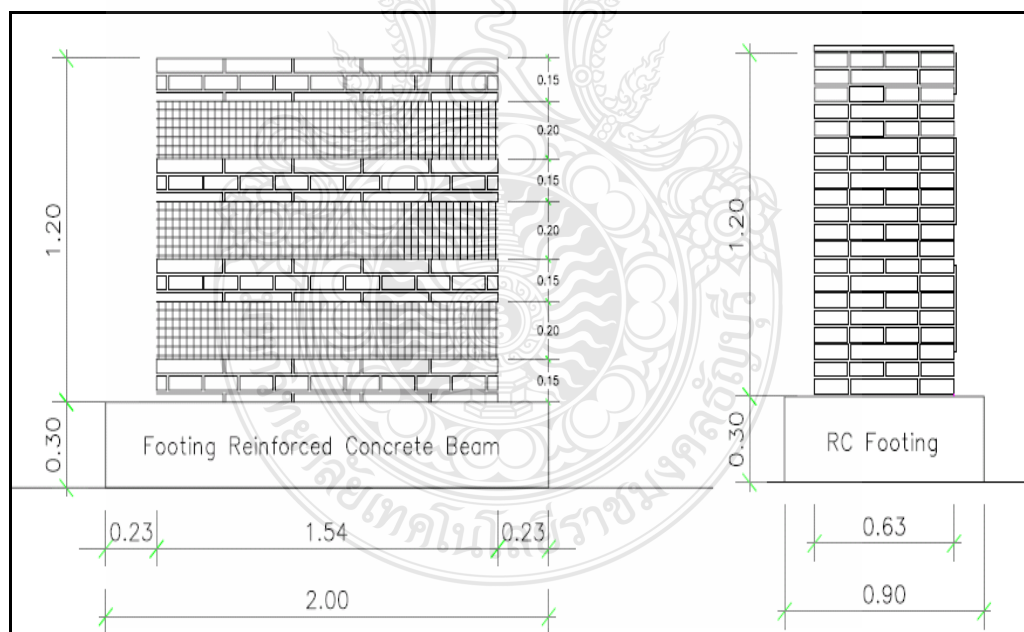
ค. นำแผ่น GFRP ที่ตัดตามแบบ จำนวน 2.77 ตารางเมตร แล้วนำไปยึดเกาะกับผนังโดยรีดด้วยลูกกลิ้งเหล็กให้เรียบแล้วทาน้ำยาเรซินซ้ำอีก 2 รอบ ทิ้งไว้ 7 วันจึงสามารถนำไปทดสอบได้

ง. ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดที่ 28 วัน โดยบันทึกค่าของแรงกดอัด โดยใช้เครื่องแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) ขนาด 150 ตัน พร้อมแท่นยึด กดแล้วให้แรงกระทำบันทึกข้อมูลพร้อมทั้งสังเกตภาพรอยร้าว และวัดความกว้างของรอยร้าว

จ. นำผลการทดสอบที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกดอัด และความเครียดของแต่ละผนัง



ภาพที่ 3.11 แบบการติดแผ่น GFRP ของผนังที่ 3



ภาพที่ 3.12 แบบการติดแผ่น GFRP ของผนังที่ 4

3.3.3 การทดสอบการหาค่ากำลังแรงกดอัด (Compressive Strength Test) ของผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริมวัสดุ GFRP ผนังที่ 5 และ ผนังที่ 6

1) วิธีการทดสอบ

ก. ในส่วนผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริม GFRP หลังจากทดสอบไป 1 ครั้งต้องซ่อมผนังปิดรอยร้าวที่เกิดขึ้นจากการให้ Load ก่อนหน้านั้นโดยอัดน้ำปูนเพื่อเข้าไปประสานระหว่างรอยร้าว

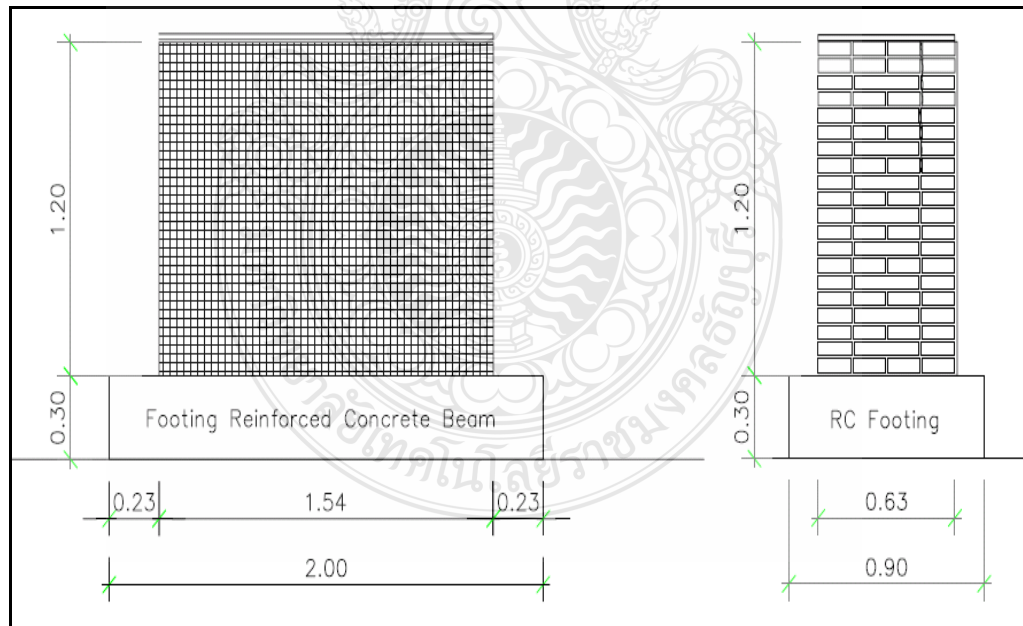
ข. เตรียมพื้นผิวที่จะทำการติดให้เรียบ จากนั้นทำความสะอาดเพื่อให้มั่นใจว่าแห้งสนิท

ค. ผสมน้ำยาเรซินที่เตรียมไว้ทารองพื้นก่อน 2 ชั้น

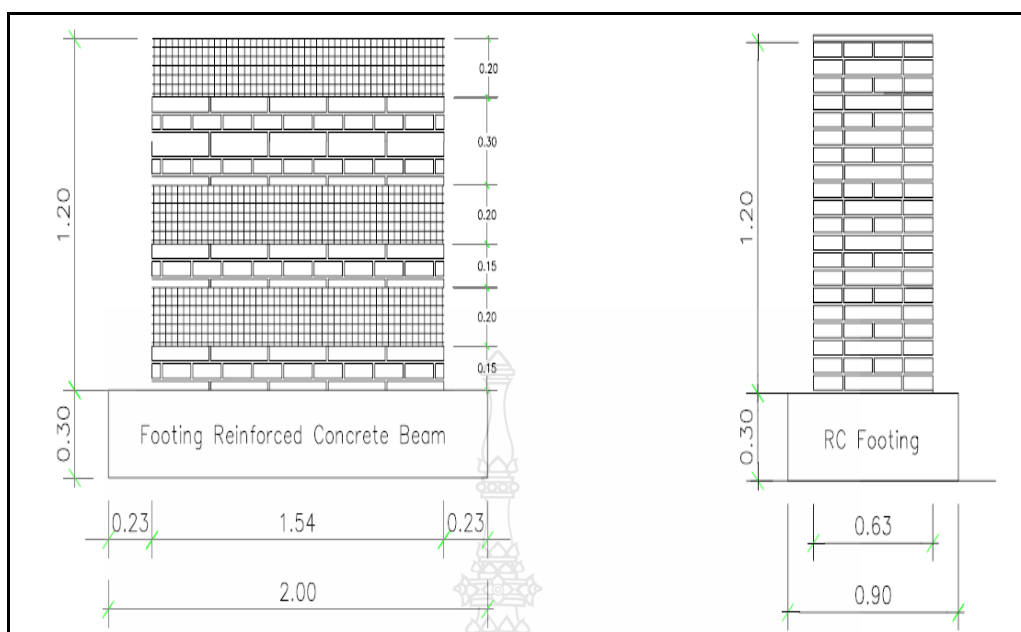
ง. นำแผ่น GFRP ที่ตัดตามแบบ จำนวน 2.77 ตารางเมตร นำยึดเกาะกับผนังแล้วทาน้ำยาเรซินซ้ำอีก 2 รอบ ทิ้งไว้ 3 วันจึงสามารถนำไปทดสอบได้

จ. ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดที่ 28 วัน โดยบันทึกค่าของแรงกดอัด โดยใช้เครื่องแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) ขนาด 150 ตัน พร้อมแท่นยึด กดแล้วให้แรงกระทำบันทึกข้อมูลพร้อมทั้งสังเกตภาพรอยร้าว และวัดความกว้างของรอยร้าว

ฉ. นำผลการทดสอบที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงกดอัด และ ค่าการเคลื่อนตัวของผนังเพื่อทราบพฤติกรรมของผนัง



ภาพที่ 3.13 แบบการติดแผ่น GFRP ของผนังที่ 5



ภาพที่ 3.14 แบบการติดแผ่น GFRP ของผนังที่ 6

3.4 วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้ได้ใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยกำหนดคุณสมบัติของแบบจำลองทั้งแบบไม่เสริม GFRP และ เสริม GFRP ดังนี้ คือ

3.4.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1) การสร้างชิ้นส่วน (Create Part)
 2) การสร้างคุณสมบัติวัสดุ (Create Material Properties) โดยจะแบ่งคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างรูปออกเป็น 3 วัสดุ คือ อิฐทดแทนอิฐโบราณ มอร์ต้า และวัสดุ GFRP

3) กำหนดคุณสมบัติวัสดุ (Assign Material Properties) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

อัตราส่วนปัวซอง	0.22
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของมอร์ต้า	14,530 กก./ซม ²
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของอิฐ	30,190 กก./ซม ²
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของGFRP	733,945 กก./ซม ²

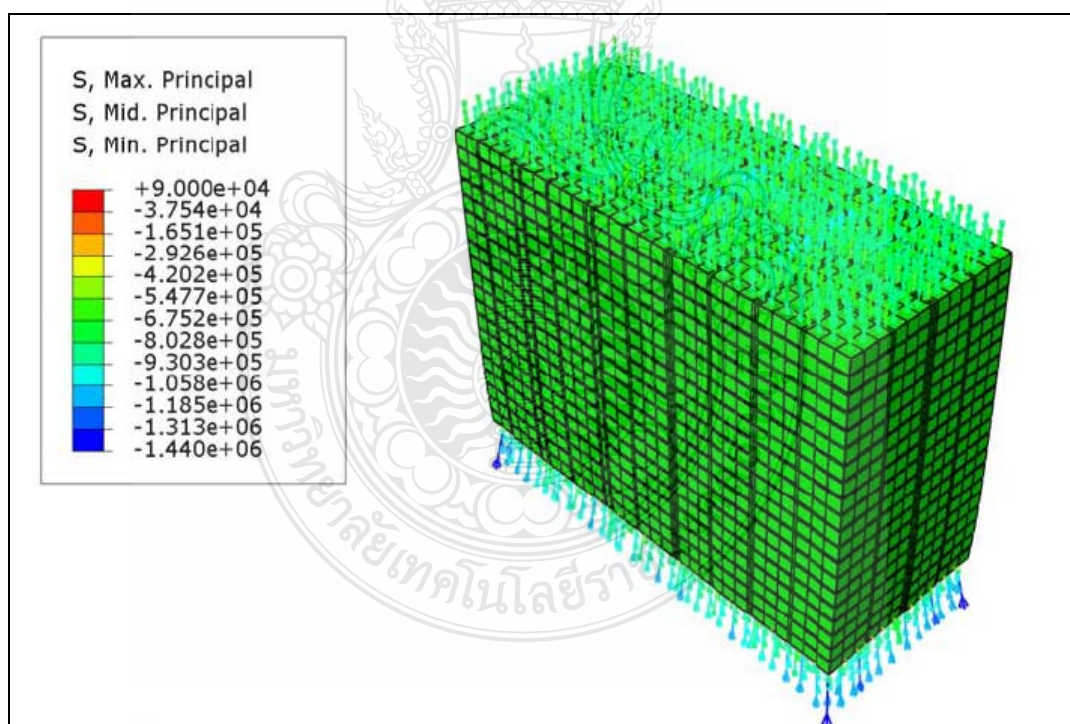
4) การสร้างตาข่ายเพื่อถ่ายแรงการวิเคราะห์ (Create Mesh) โดย กำหนดค่า Mesh ของวัสดุทั้งสามให้มีขนาดที่เท่ากันทั้งสาม วัสดุเพื่อวัสดุทั้งสามนั้นมีการถ่ายแรงในทิศทางเดียวกัน

5) การสร้างแรงที่กระทำหรือน้ำหนักบรรทุกและเงื่อนไขข้อกำหนดขอบเขต (Create Load & Boundary Condition) โดยแรงที่กระทำกำหนดเป็นแบบ Pressure

6) การสร้างไฟล์งานกำหนดการประมวลผลและส่งมอบประมวลผลงาน (Create Job & Submit Job)

7) การดูผลลัพธ์ (View Results)

ในส่วนการสร้างแบบจำลองนั้นได้จากการนำเอาก้อนอิฐแต่ละก้อนมาวางเรียงกันแล้วกรอกด้วยมอร์ต้าทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างก้อนอิฐ และมอร์ต้า จำนวน 20 ชั้น โดยได้กรอกข้อมูลทางกายภาพได้แก่ ค่า Modulus of Elasticity และ อัตราส่วนปัวซอง ของทั้งอิฐ และ มอร์ต้า สำหรับแรงที่กระทำนั้นถูกกำหนดให้เป็นแบบแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอ (Uniformly Distributed Load) ตลอดพื้นที่หน้าตัดตามแนวแกนที่ส่วนบนของแบบจำลอง เพื่อประโยชน์ในการเปรียบเทียบผลจากการศึกษาแบบจำลองกับการทดสอบผนังแบบ (Full-scale Test) จากนั้นจุดยึดที่ฐานรองรับของแบบจำลองเป็นแบบรับแรงอัดแต่ไม่รับโมเมนต์ได้ทั้งสามแกนดังแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.15 Model ของผนังก่ออิฐ

โครงสร้างของผนังก่ออิฐแบบโบราณเพื่อหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกของตัวโครงสร้างของผนังที่จะมีการเปลี่ยนแปลงจากการให้น้ำหนักบรรทุกไปเรื่อย ๆ จนกว่าผนังจะไม่สามารถรับแรงกระทำที่เกิดขึ้นหรือไม่สามารถที่จะรับแรงได้โดยใช้การวิเคราะห์โดยวิธีไฟในอิลลาเมนต์เพื่อช่วยในการตรวจสอบ และ เปรียบเทียบกับการทดสอบแบบ Full-scale Test

การวิเคราะห์แรงที่กระทำกับผนังแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) การวิเคราะห์ผนังที่ไม่เสริม GFRP
- 2) การวิเคราะห์ผนังที่เสริม GFRP

การวิเคราะห์โครงสร้างผนังก่ออิฐโดยทำแบบจำลองประกอบไปด้วย จุดต่อ 36,432 จุด และมีอิลลาเมนต์ 33,798 อิลลาเมนต์ จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้เมื่อนำข้อมูลไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งพบว่า เป็นสัดส่วนต่อกันเมื่อมีแรงเพิ่มขึ้นก็ทำให้มีการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นมาด้วย



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

การซ่อมแซมและการบูรณะโดยให้คงความเป็นโบราณสถานไม่ให้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก วัสดุที่ใช้ต้องเป็นวัสดุที่มีให้ในบริเวณนั้นด้วย จึงได้มีการเก็บตัวอย่างของซากโบราณสถานเดิมเพื่อมาทดสอบหาการรับกำลังแรงอัด แล้วเก็บข้อมูลนั้นไว้ แล้วหาแหล่งของดินเพื่อมาเผา แล้วนำมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าการรับแรงอัดให้มีค่าใกล้เคียงกับของเดิม รวมทั้งในส่วนของปูนก่อด้วย จากนั้นจึงนำวัสดุที่มีค่าใกล้เคียงของเดิมมาก่อนเป็นผนังแล้วเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างผนังที่เสริมวัสดุ Glass Fiber Reinforced Polymer GFRP ผนังที่ซ่อมแซมและเสริมวัสดุ GFRP นั้นสามารถรับแรงได้กำลังอัดได้มากกว่าผนังที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP จากนั้นนำข้อมูลมาเทียบกับวิธีไฟในอิลาเมนต์แล้วพบว่าสามารถรับแรงอัดให้ใกล้เคียงกับการทดสอบแบบ Full-scale-test ซึ่งมีผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของการทดลองดังต่อไปนี้ คือ

4.1 ผลการทดสอบทางกายภาพของอิฐ

4.1.1 การวัดขนาด และ น้ำหนักที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างของอิฐ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การวัดขนาดและน้ำหนักของอิฐจากการสุ่มตัวอย่างจากแหล่งบ้านลุมพลีจำนวน

10 ตัวอย่าง

ด้าน ลำดับ	กว้าง	กว้าง	กว้าง	ยาว	ยาว	ยาว	หนา	หนา	หนา	น้ำหนัก ของอิฐ (กรัม)
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	
1	14.9	14.8	14.9	29.9	29.9	29.6	4.7	5.0	4.9	3,129.4
2	14.2	14.9	14.7	29.7	29.5	29.3	4.9	5.0	4.5	3,150.8
3	14.5	14.5	14.5	29.5	29.6	29.4	4.9	5.1	4.4	2,980.5
4	14.4	14.6	14.4	29.2	29.0	29.2	4.9	4.9	4.9	3,122.3
5	14.5	14.7	14.6	29.0	29.0	29.0	4.5	5.0	5.0	2,991.7
6	14.6	14.7	14.7	29.3	29.3	29.3	5.0	4.7	4.9	3,119.8
7	14.8	14.8	14.7	29.4	29.2	29.4	4.6	4.7	4.8	2,899.7
8	14.5	14.9	14.6	29.0	29.9	29.2	5.0	5.1	4.7	3,038.1

ตารางที่ 4.1 การวัดขนาดและน้ำหนักของอิฐจากการสุ่มตัวอย่างจากแหล่งบ้านลุมพินีจำนวน 10 ตัวอย่าง (ต่อ)

9	15.0	14.7	15.0	29.2	29.4	29.0	4.3	4.7	4.6	2,909.4
10	14.6	14.6	14.4	29.0	29.0	29.0	4.9	4.6	4.4	2,871.8
เฉลี่ย	14.6	14.7	14.7	29.3	29.4	29.2	4.8	4.9	4.7	3,021.4

พบว่าขนาดของการวัดขนาดมีค่าความคลาดเคลื่อนความยาว ± 5 mm ความกว้าง ± 3 mm และ ความหนา ± 2 mm ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 77-2545 อิฐก่อสร้างสามัญ (Building Bricks)

4.2 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของอิฐ

ส่วนเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่ได้จากการทดลองพบว่าเมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักของอิฐจากการสุ่มตัวอย่างทั้ง 10 ก้อน พบว่าอยู่ที่ประมาณ 0.465 % ดังแสดงผลดังตารางที่ 4.2 และเปอร์เซ็นต์การต้มเคียวอยู่ที่ประมาณ 2 %

ตารางที่ 4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption Test)

ลำดับ	น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (กรัม)	น้ำหนักหลังแช่น้ำแล้ว 24 ชั่วโมง (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึม (เปอร์เซ็นต์)
1	3,129.4	3,125.3	0.13
2	3,150.8	3,143.6	0.22
3	2,980.5	2,967.7	0.42
4	3,122.3	3,095.4	0.86
5	2,991.7	2,957.7	1.13
6	3,119.8	3,107.8	0.38
7	2,899.7	2,886.1	0.46
8	3,038.1	3,018.3	0.65
9	2,909.4	2,902.9	0.22
10	2,871.8	2,867.9	0.13
เฉลี่ย	3,021.4	3,007.3	0.46

ตารางที่ 4.3 การทดสอบการต้มเดือด (Boiling Test) แบบ 2 ชั่วโมง

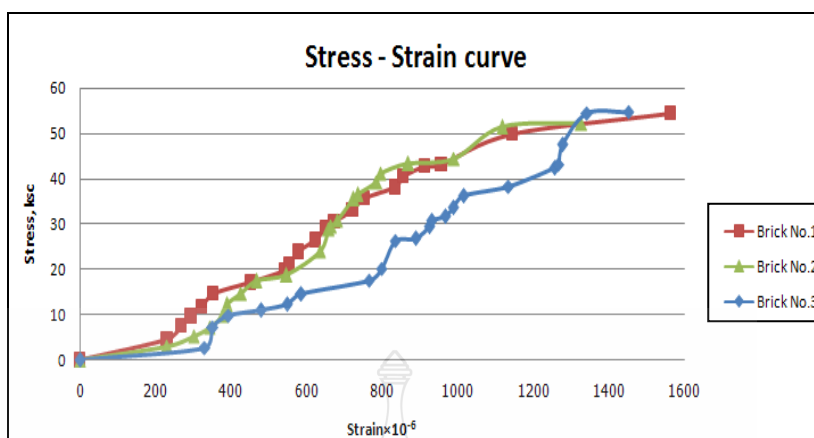
ลำดับ	น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (กรัม)	น้ำหนักหลังต้มเดือด (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การต้มเดือด (เปอร์เซ็นต์)
1	3,451.4	3,520.4	2.00
2	3,525.6	3,596.1	2.00
3	3,596.7	3,668.6	2.00
4	3,377.1	3,444.6	2.00
5	3,565.8	3,637.1	2.00
6	3,364.0	3,431.3	2.00
7	3,611.3	3,683.5	2.00
8	3,745.9	3,820.8	2.00
9	3,289.1	3,354.9	2.00
10	3,487.5	3,557.3	2.00
เฉลี่ย	3,501.4	3,571.5	2.00

4.3 ผลการทดสอบทางกายกลของอิฐ และ มอร์ต้า

ก่อนที่จะทำการทดสอบแบบ Full-scale -Test ได้นำอิฐที่สุ่มตัวอย่างจากแหล่งผลิตไปทดสอบค่ากำลังอัดประลัยและค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่นก่อนที่จะนำไปใช้งานเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลอิฐโบราณ พบว่าค่ากำลังอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบคือ 52.70 กก./ซม² และ ค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ 30,190 กก./ซม² และมอร์ต้าก่อแบบโบราณที่อายุ 60 วัน แล้วทดสอบค่ากำลังอัดประลัยที่ 64.80 กก./ซม² และ ค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ 14,530 กก./ซม² แสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าผลที่ทำการทดสอบมีค่าอิฐที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของสุคชาย (2543) [5]

ตารางที่ 4.4 การทดสอบการรับกำลังอัดของอิฐทดแทนอิฐโบราณ

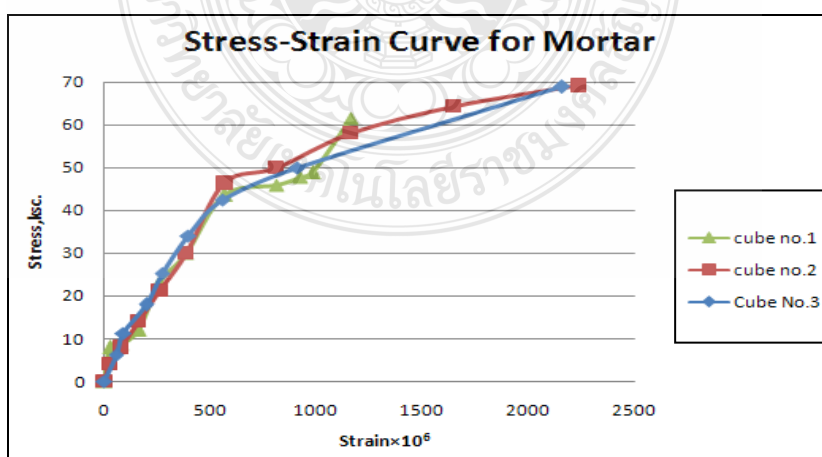
อิฐ	กำลังอัดประลัย (กก./ซม ²)	ค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่น (กก./ซม ²)
1.อิฐ No.1	54.84	31,430
2.อิฐ No.2	50.20	28,330
3.อิฐ No.3	54.58	30,420
ค่าเฉลี่ย	52.70	30,190



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของอิฐ

ตารางที่ 4.5 การทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ต้า

มอร์ต้า	กำลังอัดประลัย (กก./ซม ²)	ค้ำย โมดูลัสความยืดหยุ่น (กก./ซม ²)
1. มอร์ต้า No.1	61.60	13,370
2. มอร์ต้า No.2	64.40	14,340
3. มอร์ต้า No.3	68.20	15,890
ค่าเฉลี่ย	64.8	14,530



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของมอร์ต้า

4.4 ผลการทดสอบของผนังก่ออิฐแบบโบราณ

4.4.1 การทดสอบการรับแรงอัดและการแตกร้าว

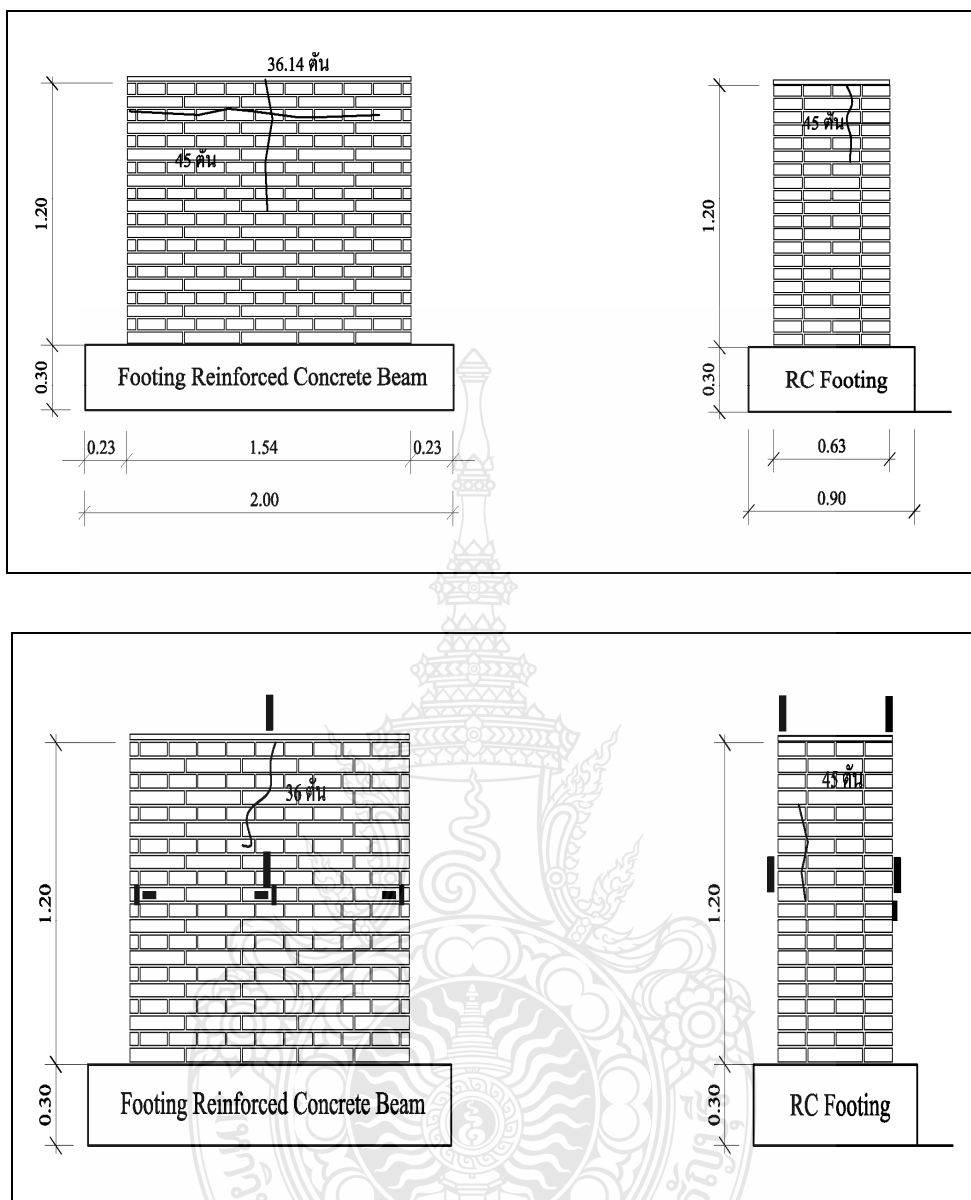
ในส่วนของผนังที่เสริมวัสดุ GFRP นั้นช่วยเพิ่มการรับแรงของผนังได้ดีกว่าไม่ได้เสริมอีก ซึ่งจะพบว่าด้านดันทันที่เสริม GFRP เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างผนังก่อนและหลังที่เสริม GFRP ดังตารางที่ 4.6 และไม่พบรอยร้าวเกิดขึ้นเลยกับด้านที่เสริม GFRP แต่รอยร้าวจะไปเกิดในด้านที่ไม่เสริม GFRP แสดงว่าวัสดุชนิดนี้เป็นตัวช่วยประสานระหว่างวัสดุที่มากกว่า 2 ชนิดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่ให้มีการแยกจากกัน ซึ่งผลทดสอบของผนังทั้ง 6 ผนัง ที่รับกำลังอัดประลัยเมื่อขนาดความกว้างของรอยร้าวที่เกิดขึ้นมีความกว้างมากกว่า 2 mm แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การทดสอบการรับกำลังอัดของผนัง ทั้ง 6 ผนัง

ผนังทดสอบ	No. 1, 2		No.3*	No.4*	No.5*	No.6*
	1	2				
เสริม	ก่อน		◇	◇		
GFRP	หลัง				◇	◇
กำลังอัดประลัย	47	84.	148	125	124	129
(ตัน)		27				
เปอร์เซ็นต์ระหว่างผนังก่อนและหลัง	-	-	68.2	62.4	62.09	63.56
เสริม GFRP (เปอร์เซ็นต์)						

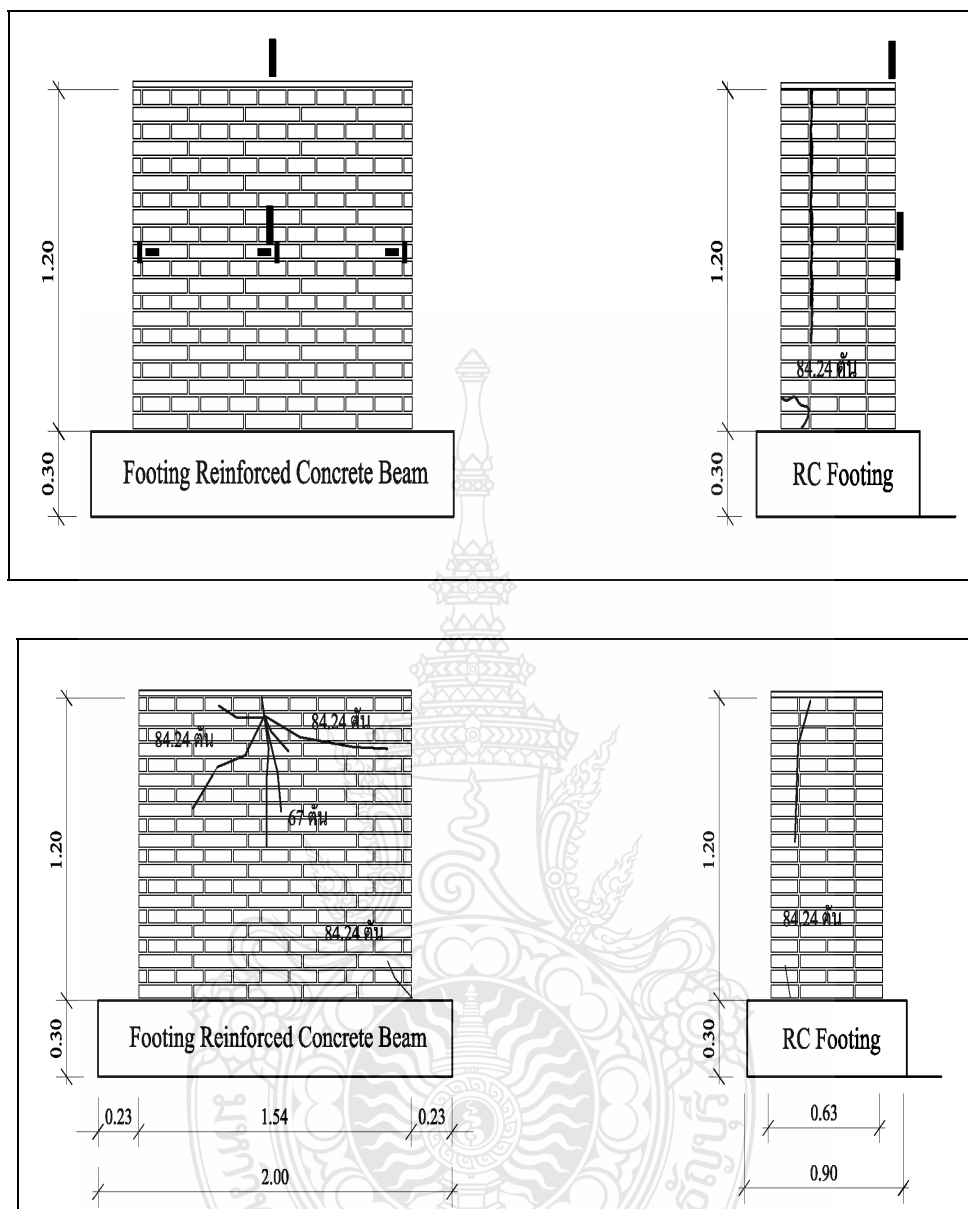
* ผนังตัวอย่าง No. 3 to 6 เสริม GFRP เพียงด้านเดียว

จากการทดสอบพบว่าผนังที่ 1 เมื่อให้แรงกระทำในแนวตั้งเริ่มที่ครั้งละ 1 ตัน ไปจนกว่าผนังจะไม่สามารถรับแรงเพิ่มขึ้นได้อีก ผนังเริ่มมีรอยร้าวแรกที่แรงกระทำที่ 36.14 ตัน ความกว้างและความยาวของรอยร้าว 0.3 มม. และ 42.5 ซม. จากนั้นเมื่อแรงกระทำที่ 45 ตัน ความกว้างและความยาวของรอยร้าว 1.6 มม. และ 120 ซม. ให้แรงกระทำไปเรื่อยๆ จนผนังสามารถรับแรงกระทำได้มากที่สุด 47 ตัน ความกว้างของรอยร้าวมากกว่า 2 มม. โดยผนังนี้จะเกิดรอยร้าวทั้ง 4 ด้านดังแสดงในภาพที่ 4.3



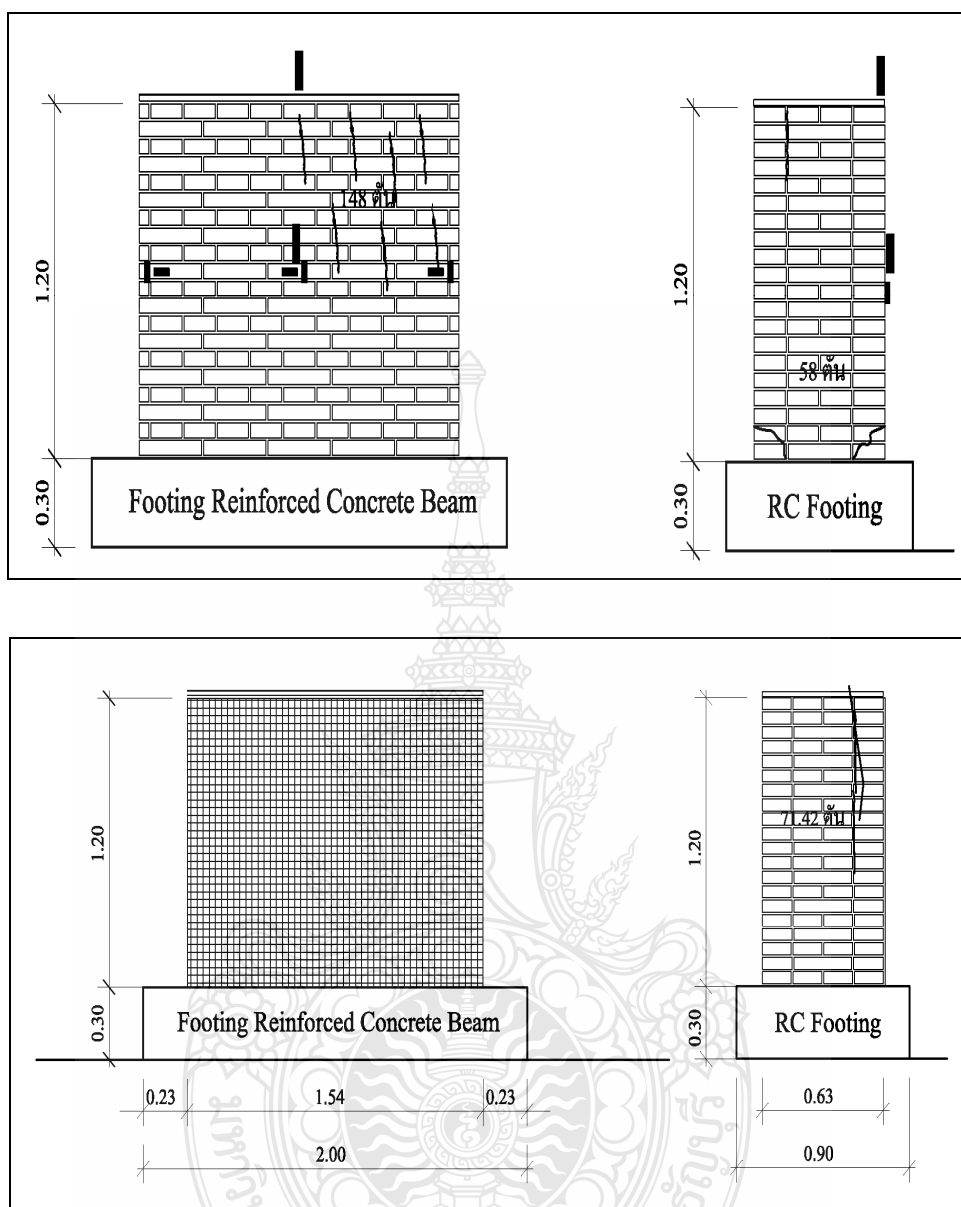
ภาพที่ 4.3 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้การทดสอบของผนังที่ 1 ด้านหน้าและด้านหลัง

ผนังที่ 2 นั้นก็เป็นผนังที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP แต่ผนังนี้จะรับแรงกระทำได้มากกว่าผนังที่ 1 โดยเมื่อย้ายผนังที่ 1 ออกแล้วให้แรงกระทำในแบบเดียวกันพบว่ารอยร้าวครั้งที่ 48.96 ตัน ความกว้าง และความยาวของรอยร้าว 0.2 มม. และ 17 ซม. ให้แรงกระทำไปเรื่อย ๆ จน ผนังสามารถรับแรงกระทำมากที่สุด 84.27 ตัน ความกว้างและความยาวของรอยร้าว 1.6 มม. และ 74 ซม. โดยผนังนี้จะเกิดรอยร้าวเพียง 3 ด้านดังแสดงในภาพที่ 4.4



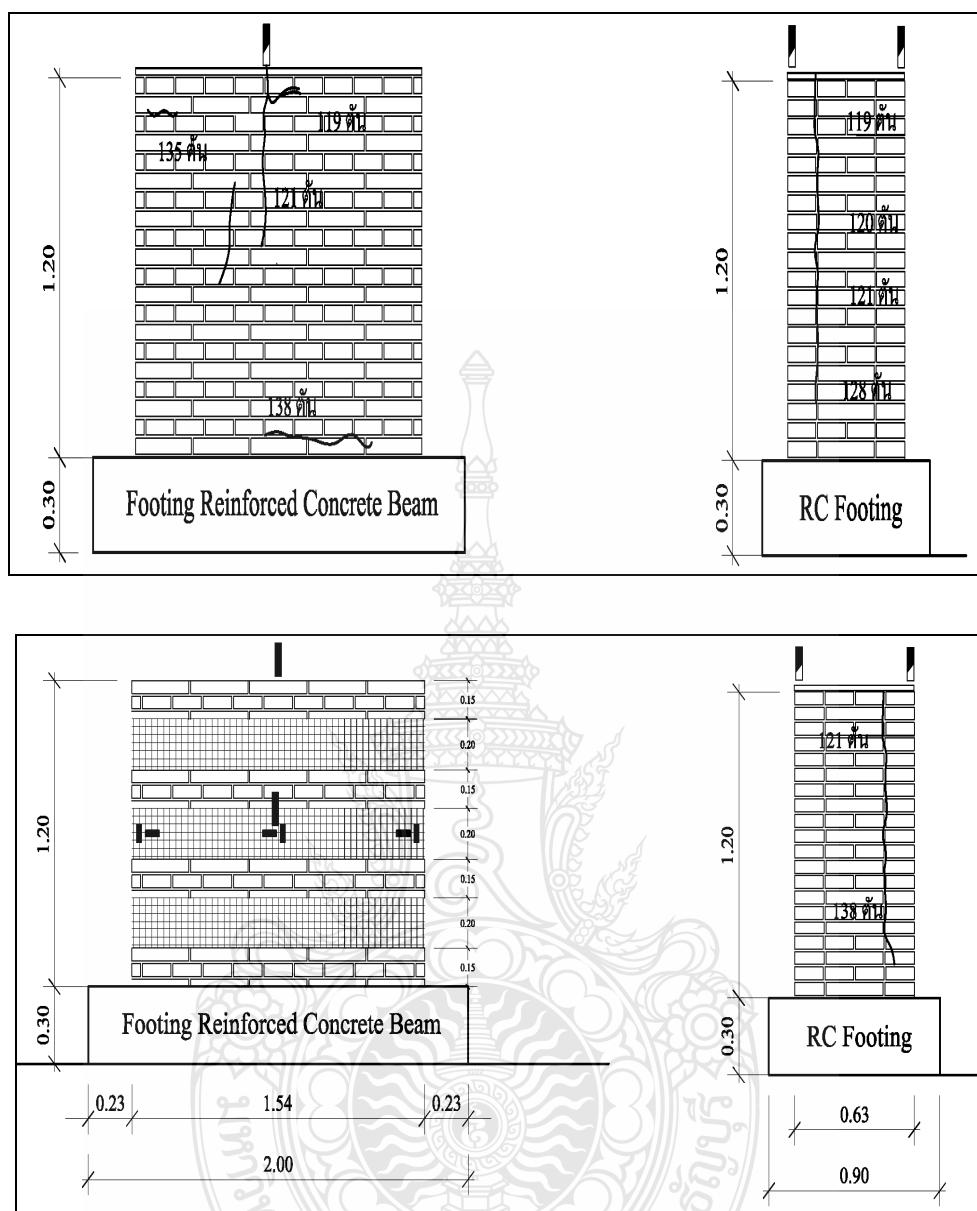
ภาพที่ 4.4 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้การทดสอบของผนังที่ 2 ด้านหน้าและด้านหลัง

ผนังที่ 3 ทำการทดสอบ โดยเมื่อย้ายผนังที่ 2 ออกแล้ว และให้แรงกระทำในแบบเดียวกันกับผนังที่ 2 พบว่ารอยร้าวครั้งแรกที่ 48.50 ตัน ความกว้าง และความยาวของรอยร้าว 0.3 มม. และ 58 ซม. ให้แรงกระทำไปเรื่อย ๆ จน ผนังสามารถรับแรงกระทำมากที่สุด 148 ตัน ความกว้างของรอยร้าวมากกว่า 2 มม. โดยผนังนี้จะเกิดรอยร้าวเพียง 3 ด้าน ยกเว้นด้านที่เสริมวัสดุ GFRP จะไม่พบรอยร้าว ดังแสดงในภาพที่ 4.5



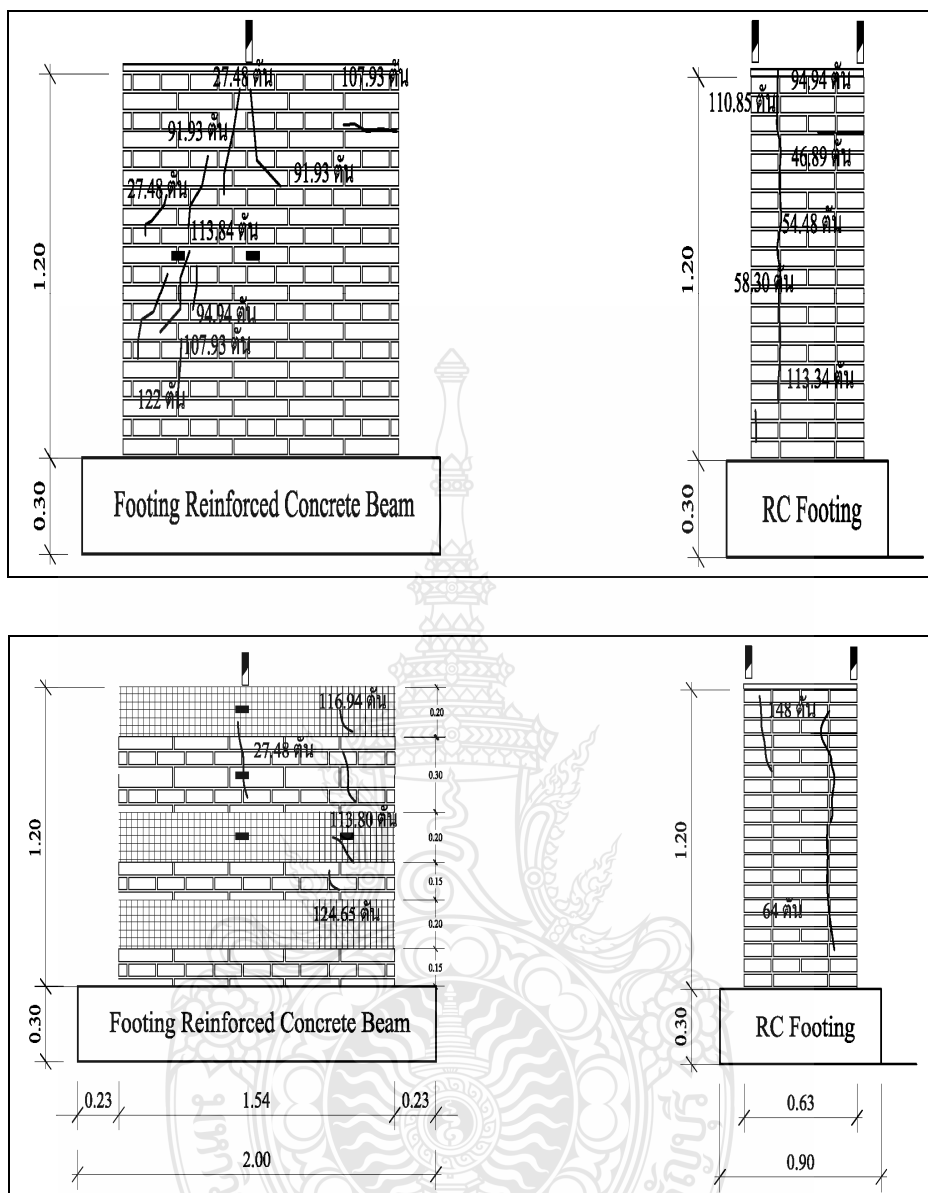
ภาพที่ 4.5 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้การทดสอบของผนังที่ 3 ด้านหน้าและด้านหลัง

ผนังที่ 4 ทำการทดสอบ โดยเมื่อย้ายผนังที่ 3 ออกแล้ว และให้แรงกระทำในแบบเดียวกันกับผนังที่ 3 พบว่ารอยร้าวครั้งแรกที่ 113 ตัน ความกว้าง และความยาวของรอยร้าว 0.02 มม. และ 32 ซม. ให้แรงกระทำไปเรื่อย ๆ จน ผนังสามารถรับแรงกระทำมากที่สุด 125 ตัน ความกว้างของรอยร้าวมากกว่า 2 มม. โดยผนังนี้จะเกิดรอยร้าวเพียง 3 ด้าน ยกเว้นด้านที่เสริมวัสดุ GFRP จะไม่พบรอยร้าว ดังแสดงในภาพที่ 4.6



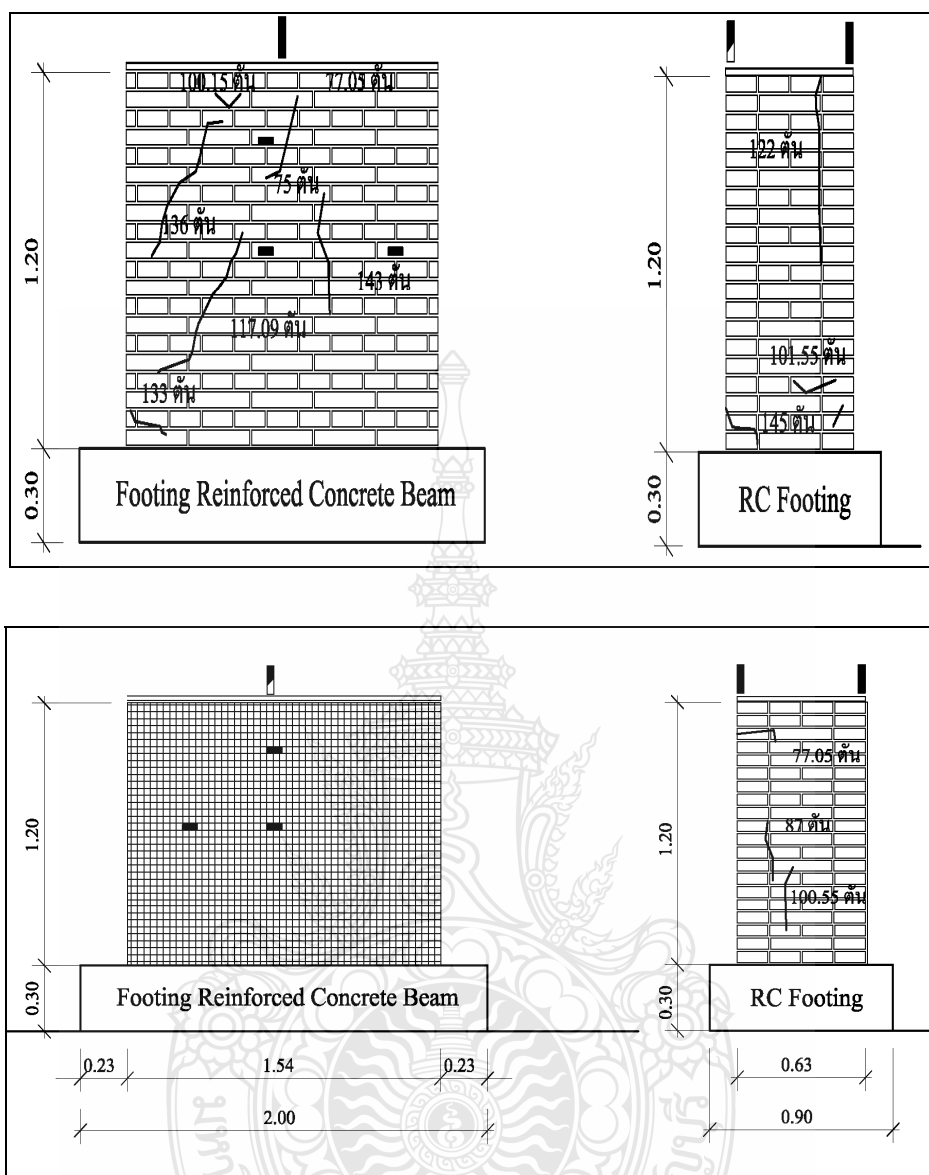
ภาพที่ 4.6 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้การทดสอบของผนังที่ 4 ด้านหน้าและด้านหลัง

ผนังที่ 5 เป็นผนังเสริมวัสดุ GFRP แบบ Strip หลังจากทำการทดสอบแล้วของผนังที่ 1 โดยเมื่อย้ายผนังที่ 4 ออกแล้ว และให้แรงกระทำในแบบเดียวกันกับผนังที่ 4 พบว่ารอยร้าวครั้งที่ 27.480 ตัน ความกว้าง และความยาวของรอยร้าว 0.1 มม. และ 24 ซม. ให้แรงกระทำไปเรื่อยๆ จนผนังสามารถรับแรงกระทำมากที่สุด 124 ตัน ความกว้างของรอยร้าวมากกว่า 2 มม. โดยผนังนี้จะเกิดรอยร้าวเพียง 3 ด้าน ยกเว้นด้านที่เสริมวัสดุ GFRP จะไม่พบรอยร้าว ดังแสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้การทดสอบของผนังที่ 5 ด้านหน้าและด้านหลัง

ผนังที่ 6 เป็นผนังเสริมวัสดุ GFRP แบบ Full sheet หลังจากทำการทดสอบแล้วของผนังที่ 2 โดยเมื่อย้ายผนังที่ 5 ออกแล้ว และให้แรงกระทำในแบบเดียวกันกับผนังที่ 5 พบว่ารอยร้าวครั้งแรกที่ 70.09 ตัน ความกว้าง และความยาวของรอยร้าว 0.7 มม. และ 52.50 ซม. ให้แรงกระทำไปเรื่อย ๆ จนผนังสามารถรับแรงกระทำมากที่สุด 129 ตัน ความกว้างของรอยร้าวมากกว่า 2 มม. โดยผนังนี้จะเกิดรอยร้าวเพียง 3 ด้าน ยกเว้นด้านที่เสริมวัสดุ GFRP จะไม่พบรอยร้าว ดังแสดงในภาพที่ 4.8

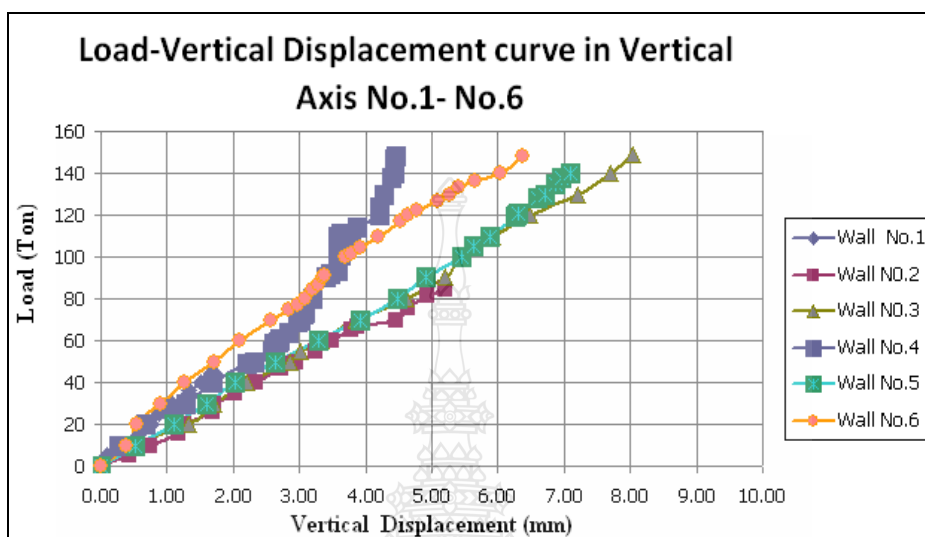


ภาพที่ 4.8 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้การทดสอบของผนังที่ 6 ด้านหน้าและด้านหลัง

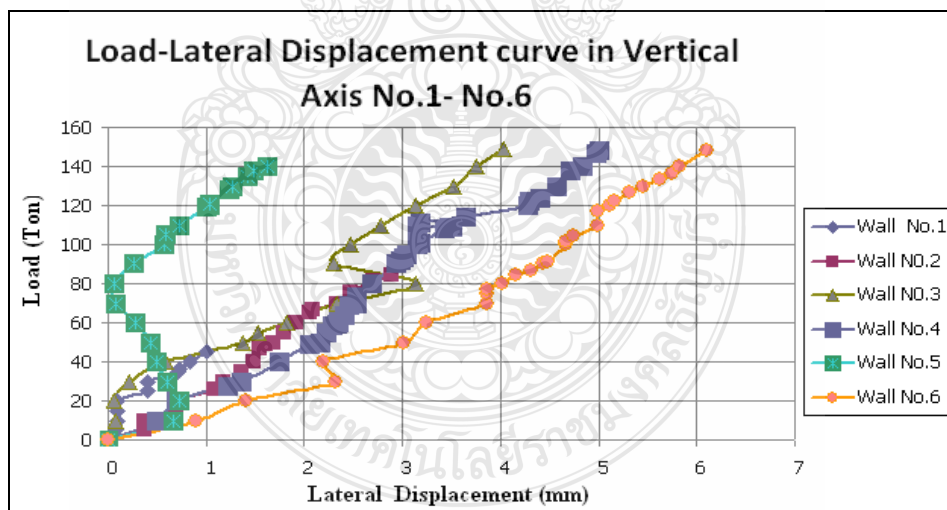
4.5 กราฟสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง ผนังทดสอบทั้งหกผนัง

เมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบมาสรุปเป็นกราฟความสัมพันธ์ของแรงกระทำระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้เมื่อนำข้อมูลไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งพบว่าเป็นสัดส่วนกันคือเมื่อมีแรงเพิ่มขึ้นก็ทำให้มีการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นมาด้วยดังแสดงในภาพที่ 4.9 และ 4.10 อีกทั้งจะเห็นได้ว่าผนังที่เสริม GFRP และผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริมวัสดุ GFRP จะไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้นในด้านที่เสริมวัสดุนั้น ฉะนั้นแสดงว่าวัสดุ

ชนิดนี้ช่วยเสริมการรับแรงที่กระทำกับผนังได้จริง อีกทั้งช่วยไม่ให้เกิดบริเวณที่เสริมผนังไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้นด้วย



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Load กับ Vertical Displacement ของผนังที่ 1- ผนังที่ 6

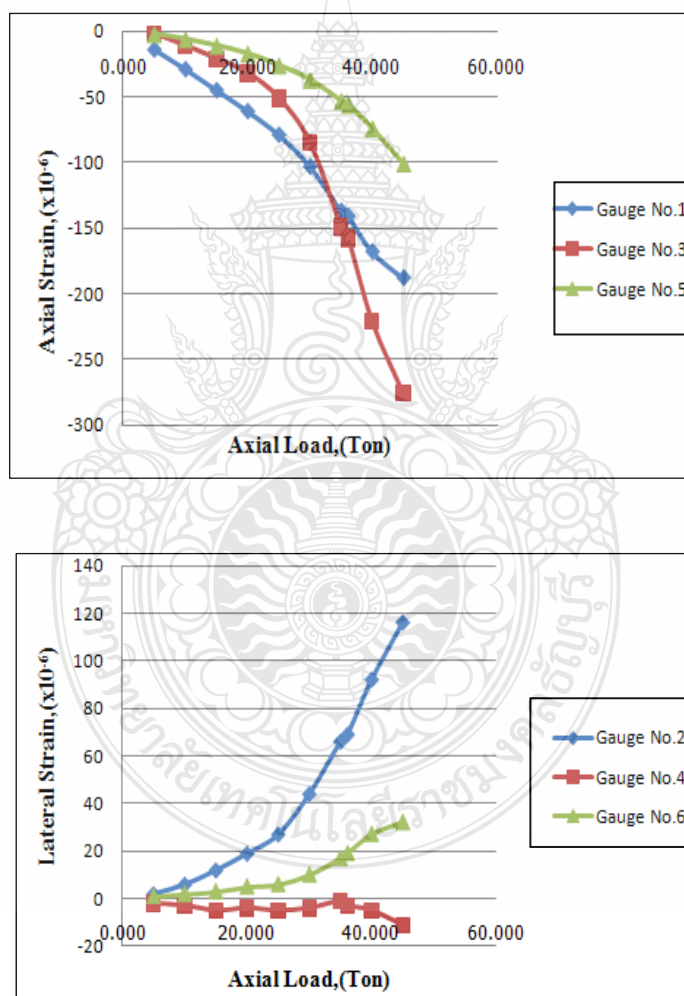


ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Load กับ Lateral Displacement ของผนังที่ 1-ผนังที่ 6

4.5.1 ผลการวิเคราะห์วัฏระยะการยืดตัวเมื่อรับแรงกดอัดของผนังทั้ง 6 ผนัง โดยใช้ Strain Gauges

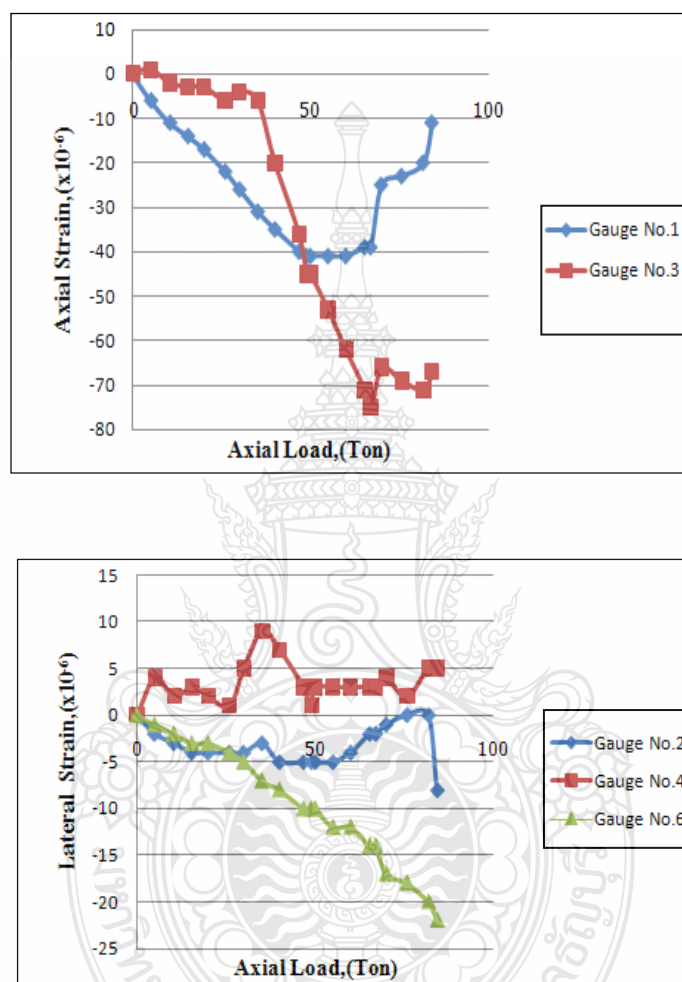
การวิเคราะห์วัฏระยะการยืดตัวเมื่อรับแรงกดอัดของผนังทั้ง 6 ผนัง ใช้ Strain Gauges ที่ติดตั้งในตำแหน่งบนผนัง และบริเวณกึ่งกลางคานผนังเพื่อดูผลการเสียรูปของผนังที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดอัด

การยืดตัวของผนังที่ 1 พบว่าในแนวตั้งจะยืดตัวมากใน Strain Gauges No.V03 ที่อยู่บริเวณริมฝั่งซ้ายผนังและในส่วนการยืดตัวในแนวราบจะยืดตัวมากใน Strain Gauges No.H02 ที่อยู่บริเวณกึ่งกลางผนังดังแสดงในภาพที่ 4.11



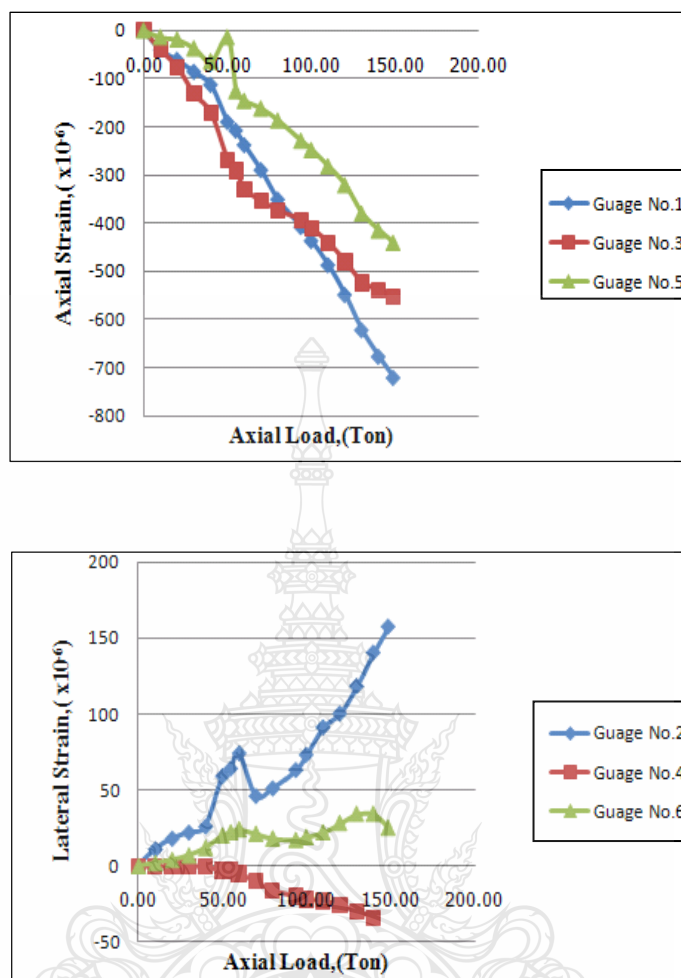
ภาพที่ 4.11 พฤติกรรมระหว่าง Load Strain ของผนังที่ 1

ผนังที่ 2 สามารถวัดค่าการยืดตัวในแนวตั้งได้ 2 ตำแหน่งเพราะ Strain Gauges No.V05 เสียหายก่อนการทดลองแต่ค่าทั้งสองตำแหน่งที่เหลืออ่านได้ค่าติดลบซึ่งเป็นแรงอัด ในส่วนการวัดค่าการยืดตัวในแนวราบจะยืดมากใน Strain Gauges No.H06 ฝั่งด้านขวามือดังภาพที่ 4.12



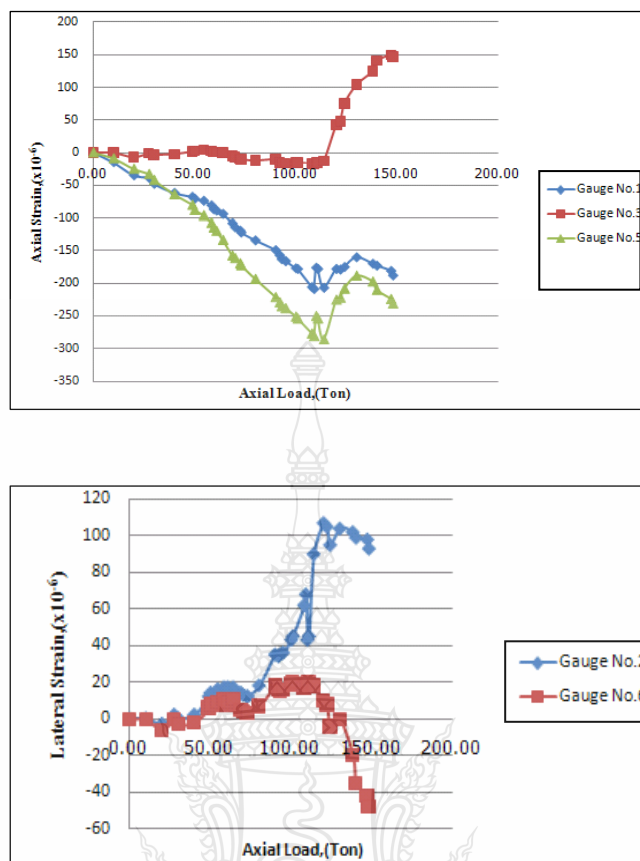
ภาพที่ 4.12 พฤติกรรมระหว่าง Load Strain ของผนังที่ 2

การยืดตัวของผนังที่ 3 พบว่าในแนวตั้งจะยืดตัวมากใน Strain Gauges No.V01 บริเวณกึ่งกลางของผนัง และใน ส่วนการยืดตัวในแนวราบจะยืดตัวมากใน Strain Gauges No.H02 บริเวณกึ่งกลางของผนังดังแสดงในภาพที่ 4.13



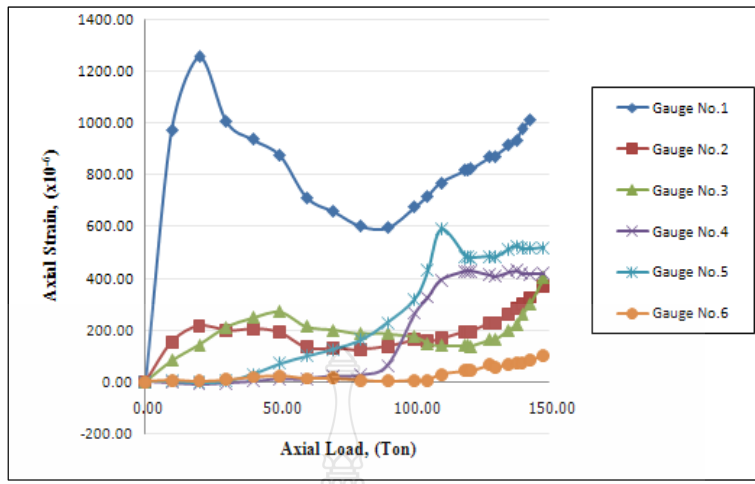
ภาพที่ 4.13 พฤติกรรมระหว่าง Load กับ Strain ของผนังที่ 3

การยึดตัวของผนังที่ 4 พบว่าในแนวดิ่งจะยึดตัวมากใน Strain Gauges No.V05 บริเวณริมด้านขวามือของผนัง และใน ส่วนการยึดตัวในแนวราบสามารถวัดค่าการยึดตัวในแนวราบได้ 2 ตำแหน่งเพราะ Strain Gauges No.H04 เสียหายก่อนการทดลองสามารถอ่านค่าการยึดตัวมากใน Strain Gauges No.H02 บริเวณกึ่งกลางของผนังดังแสดงในภาพที่ 4.14

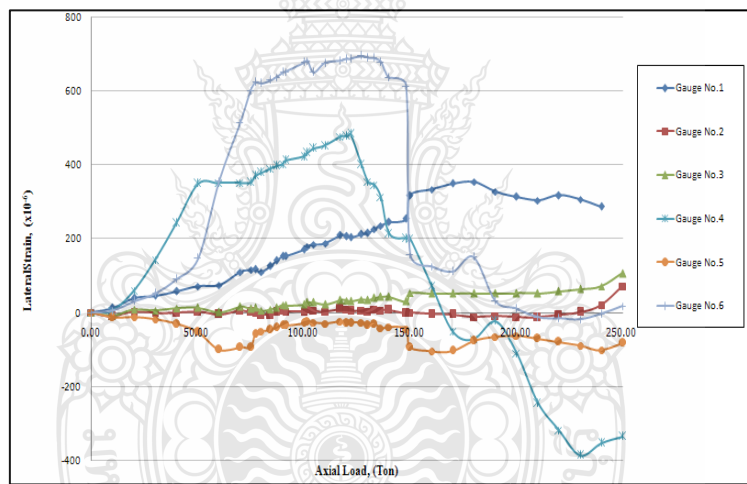


ภาพที่ 4.14 พฤติกรรมระหว่าง Load กับ Strain ของผนังที่ 4

ผนังที่ 5 และ 6 จะติดตั้ง Strain Gauges ในแนวตั้งเท่านั้นเพราะจากการทดสอบทั้ง 4 ผนังแล้วพบว่า การยืดตัวแนวในแนวตั้งจะเกิดมากกว่าในแนวราบเพราะพฤติกรรมของผนังเมื่อรับแรงอัดในแนวแกน ซึ่งสามารถอ่านค่าการยืดตัว Strain Gauges ดังแสดงในภาพที่ 4.15-4.16



ภาพที่ 4.15 พฤติกรรมระหว่าง Load Strain ของผนังที่ 5



ภาพที่ 4.16 พฤติกรรมระหว่าง Load Strain ของผนังที่ 6

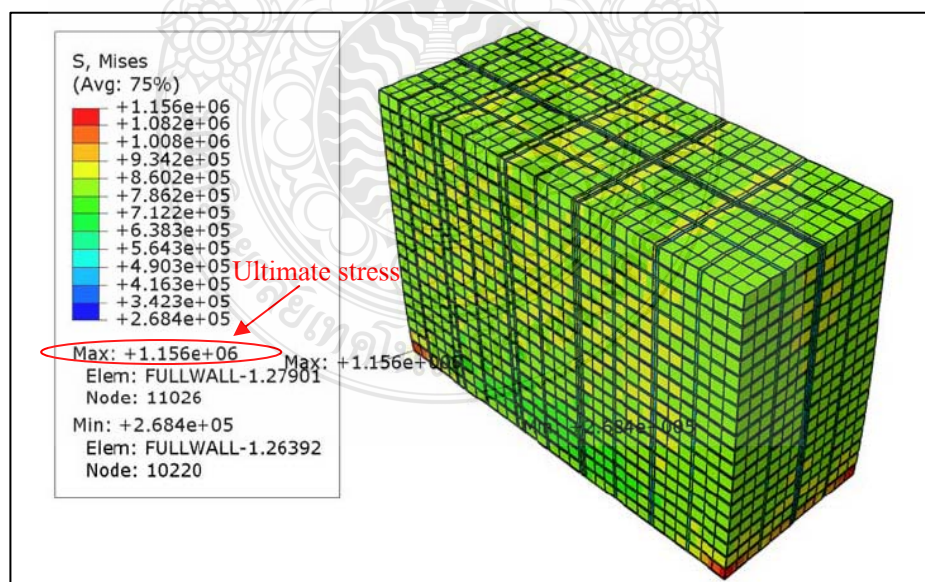
4.6 วิเคราะห์โดยวิธีไฟในอลิเมนต์

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบระหว่างวิธีไฟในอลิเมนต์กับการทดสอบ

ผนังที่	กำลังอัด	การเปลี่ยน	การเปลี่ยน	กำลังอัด	การเปลี่ยน	การเปลี่ยน
	ประลักษ์ของ ผนังใน แบบจำลอง (ตัน)	แปลงใน แนวตั้ง แบบจำลอง (มม.)	แปลงใน แนวราบ แบบจำลอง (มม.)	ประลักษ์ของ ผนัง (ตัน)	แปลงใน แนวตั้ง ทดสอบ (มม.)	แปลงใน แนวราบ ทดสอบ (มม.)
1. ผนังที่ 1	70	0.36	0.18	84.27	5.21	2.89
2. ผนังที่ 3	150	0.57	0.63	148	3.86	2.34
3. ผนังที่ 4	150	0.43	0.02	125	3.87	3.65

4.6.1 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟในอลิเมนต์ผนังที่ 1

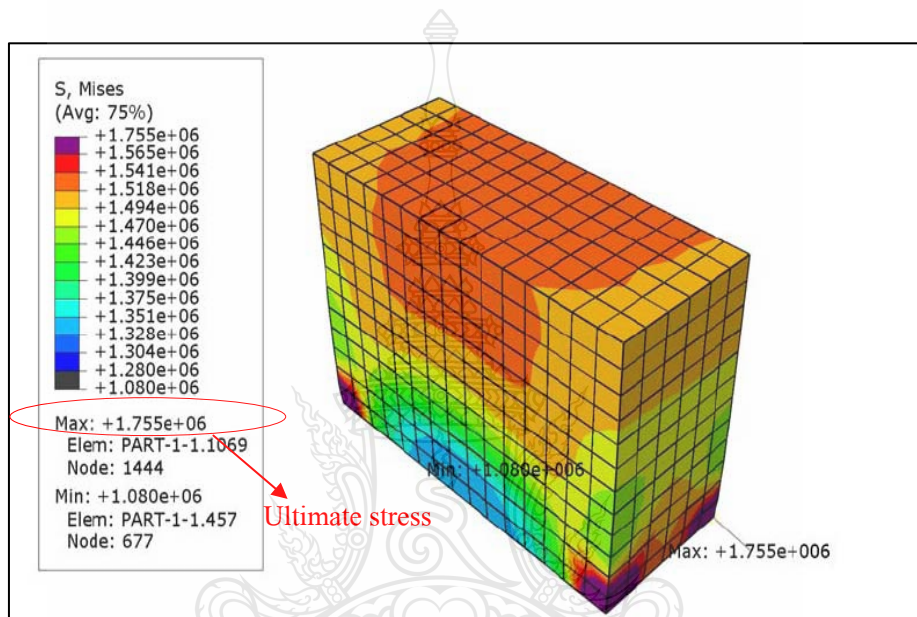
โดยให้ Load เป็น step load ทั้งหมด 10 step โดยเริ่ม 5 10 15 20 25 30 35 40 50 60 และ 70 ตัน พบว่าให้แรงกระทำที่ Step สุดท้ายแล้วได้ค่า Ultimate Stress ที่กระทำกับผนังพบว่าบริเวณที่มีการถ่ายแรงกจนเกิดการเสีรูปร่างอย่างถาวร โดยบริเวณที่รับแรงกคมีค่ามากความเข้มของหน่วยแรงจะแสดงเป็นสีแดงเข้ม บริเวณมีความเข้มของหน่วยแรงน้อยจะแสดงเป็นสีน้ำเงิน ดังแสดงดังภาพที่ 4.17



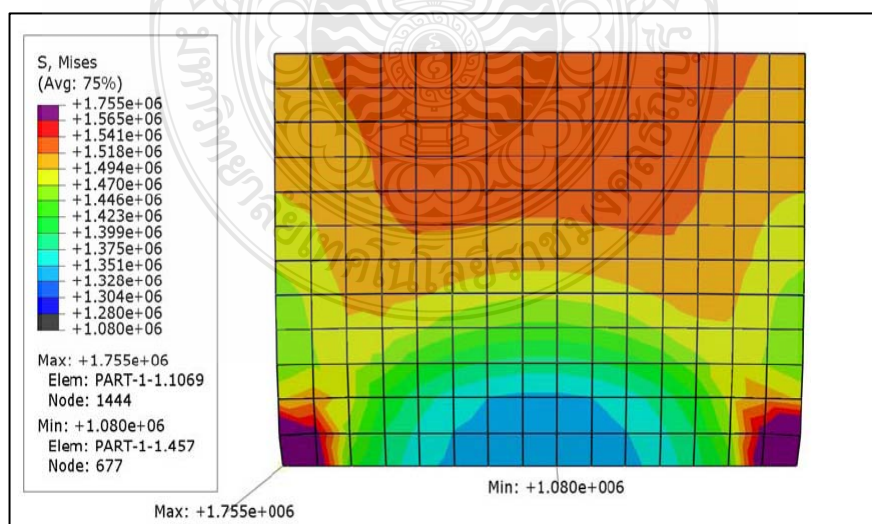
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate Stress ของผนังที่ 1

4.6.2 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผนังที่ 3

โดยให้ Load เป็น step load ทั้งหมด 15 step โดยเริ่ม 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 และ 150 ตัน พบว่าให้แรงกระทำที่ Step สุดท้ายแล้วได้ค่า Ultimate Stress ที่กระทำกับผนังพบว่าบริเวณที่มีการถ่ายแรงกคจนเกิดการเสียรูปอย่างถาวร โดยบริเวณที่รับแรงกคมีค่ามากความเข้มของหน่วยแรงจะแสดงเป็นสีแดงเข้ม บริเวณมีความเข้มของหน่วยแรงน้อยจะแสดงเป็นสีน้ำเงิน ดังแสดงดังภาพที่ 4.18



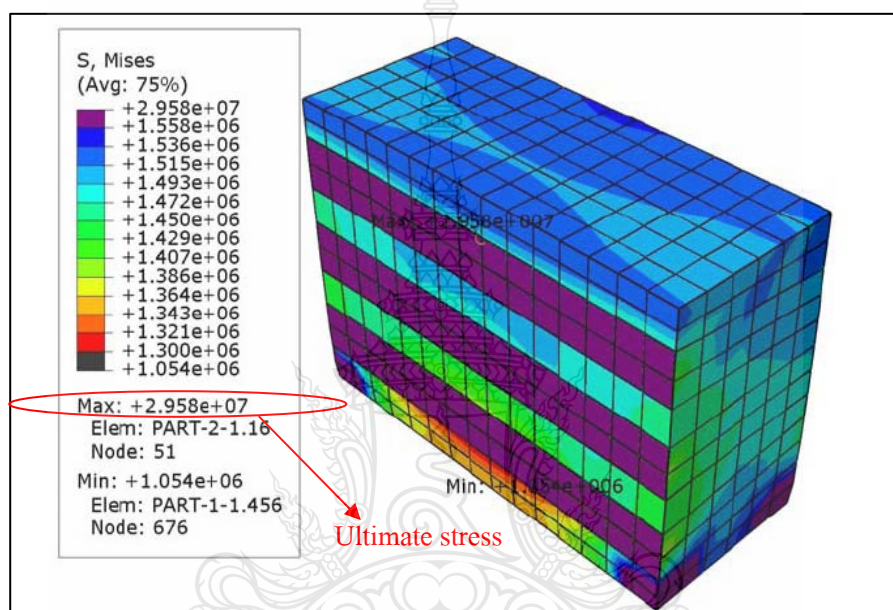
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate Stress ของผนังที่ 3 ด้านที่เสริมวัสดุ GFRP



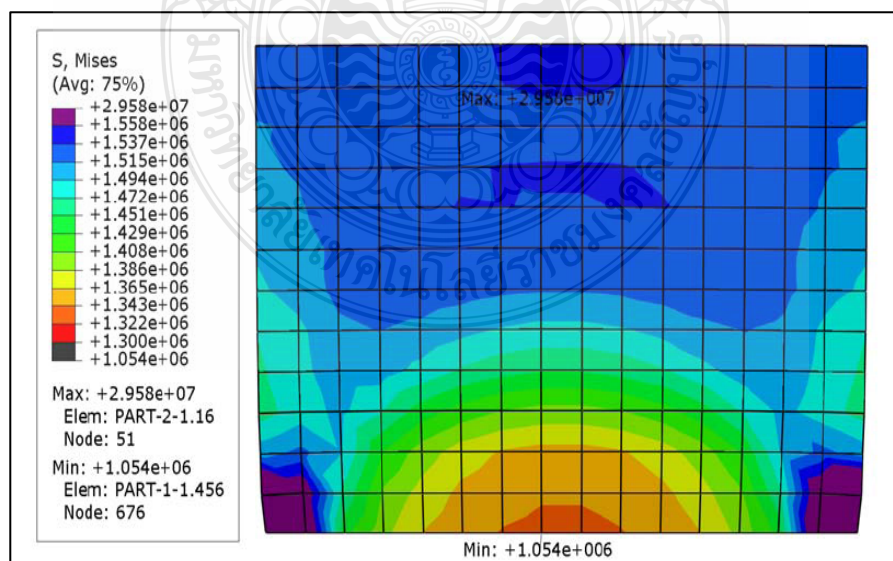
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate Stress ของผนังที่ 3 ด้านที่ไม่เสริมวัสดุ GFRP

4.6.3 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผนังที่ 4

โดยให้ Load เป็น Step Load ทั้งหมด 15 Step โดยเริ่ม 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 และ 150 ตัน พบว่าให้แรงกระทำที่ Step สุดท้ายแล้วได้ค่า Ultimate Stress ที่กระทำกับผนังพบว่าบริเวณที่มีการถ่ายแรงกจนเกิดการเสียรูปอย่างถาวร โดยบริเวณที่รับแรงกคมีค่ามาก ความเข้มของหน่วยแรงจะแสดงเป็นสีแดงเข้ม บริเวณมีความเข้มของหน่วยแรงน้อยจะแสดงเป็นสีน้ำเงิน ดังแสดงดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate Stress ของผนังที่ 4 ด้านที่เสริมวัสดุ GFRP



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate Stress ของผนังที่ 4 ด้านที่ไม่เสริมวัสดุ GFRP

4.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) กับ ผลการทดสอบผนัง (Full-Scale-Test)

พบว่าวัสดุ Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) นั้นมีคุณสมบัติที่เสริมการรับแรงอัดได้มากขึ้น อีกทั้งไม่พบรอยร้าวเกิดขึ้นในบริเวณที่เสริม หลังจากทดสอบแล้วพบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบผนังทั้ง 6 ผนัง แบบ (Full-scale Test) พบว่าผนังที่เสริมวัสดุ GFRP และ ผนังที่ซ่อมแซมแล้วจึงเสริมวัสดุ GFRP นั้นช่วยเพิ่มการรับแรงอัดได้มากกว่าผนังที่ไม่ได้เสริมวัสดุดังกล่าว โดยรูปแบบของการติดนั้นก็สามารถเพิ่มการรับแรงได้ใกล้เคียงกันเพราะฉะนั้นรูปแบบที่อยู่ที่เหมาะสมของพื้นที่ที่จะซ่อม อีกทั้งเมื่อเราใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วพบว่าค่าของข้อมูลที่ออกมา นั้นเมื่อนำข้อมูลทั้งสองเปรียบเทียบกัน พบว่าสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นี้ช่วยการคำนวณค่าการรับแรงอัดของผนังได้ใกล้เคียงกับผลทดสอบ (Full-scale Test)



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลงานวิจัยการเสริมวัสดุ Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) การรับแรงตามแนวแกนของผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ โดยนำวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง จากแหล่งที่ทางกรมศิลปากรนำมาใช้ทดแทนวัสดุเดิมเพื่อให้คงความเป็นโบราณสถาน โดยนำมาก่อเป็นผนัง ทั้ง 6 ผนัง โดยแบ่งเป็น 3 ชุดข้อมูล คือ ผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ ผนังเสริมวัสดุ GFRP และผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริม GFRP เพื่อเปรียบเทียบกับภาระทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสรุปผลการวิจัยที่ได้ดังนี้

5.1.1 การรับแรงอัดตามแนวแกนของผนังที่เสริม GFRP และผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริม GFRP หลังทดสอบจะรับแรงได้ดีกว่าผนังที่ไม่เสริมวัสดุนี้

5.1.2 รูปแบบของการเสริมวัสดุ GFRP และผนังที่ซ่อมแซมแล้วเสริม GFRP หลังทดสอบจะเห็นได้ว่าเสริมแบบ Full sheet และ แบบ Strip รับแรงอัดตามแนวแกนได้ใกล้เคียงกัน

5.1.3 ด้านที่เสริมวัสดุ GFRP นั้นเมื่อทดสอบแล้วจะไม่พบรอยร้าวเกิดขึ้นแสดงว่าวัสดุชนิดนี้ช่วยเสริมการรับแรงอัดตามแนวแกนที่กระทำกับผนัง

5.1.4 การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบจริงก็มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบจริง แสดงว่าการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ช่วยลดระยะเวลาในการทดสอบและค่าใช้จ่ายในการทดสอบด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทำงานวิจัยครั้งนี้จำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมตัวแปรที่สำคัญเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ทดสอบจริงโดยมีข้อควรระวังในการทำงานวิจัยที่มีผลต่อการศึกษาวิจัยดังต่อไปนี้

5.2.1 ชิ้นงานทดสอบมีขนาดที่ใกล้เคียงขนาดใหญ่ จึงต้องมีการเตรียมความพร้อมในเรื่องเครื่องมือที่ใช้ทดสอบและ อุปกรณ์ที่ให้เหมาะสมกับขนาดชิ้นงานที่ทดสอบ

5.2.2 แหล่งวัสดุที่นำมาทดสอบควรจะเป็นแหล่งที่ต้องมีการทดสอบว่ามีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงวัสดุเดิมจริงสามารถที่จะนำมาทดสอบได้ เช่น วัสดุก่อและอิฐที่ใช้เป็นของตำบลบ้านลุ่มพลี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

5.2.3 ปัจจัยในการสนับสนุนทุนการวิจัยและงบประมาณของผู้วิจัยที่มีจำกัด เครื่องมือวัดในการทดสอบที่มีราคาแพงเนื่องมาจากเป็นเครื่องมือเฉพาะทาง เช่น เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว Strain Gauges เป็นต้น

5.2.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่จะใช้ในการศึกษาวิจัยต้องมีการนำมาประยุกต์เพื่อการใช้งานหรือเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือให้มีลักษณะเดี่ยวเหมือนใกล้เคียงกับสภาพการทดสอบที่เกิดขึ้นจริง เครื่องมือบางอย่างที่จะนำมาใช้ขาดผู้ที่มีความรู้เฉพาะทางในการใช้เครื่องมือวัดหรืออุปกรณ์ที่จะนำมาใช้เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยงานนั้นๆและไม่มีการดูแลบำรุงรักษาการใช้งานอย่างต่อเนื่อง

5.2.5 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Math Model) ตัวอย่างโครงสร้างทดสอบที่มีความซับซ้อนมาก ๆ และขนาดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใหญ่ มีเงื่อนไขขอบเขต Boundary Condition ที่ใหญ่ มี Node, Element และ Meshing ที่ใช้ในการคำนวณของคอมพิวเตอร์มาก ต้องมีผู้ให้คำปรึกษาที่มีความเข้าใจในการใช้โปรแกรมที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Method (FEM) อย่างดี



รายการอ้างอิง

- [1] ชาดิชาย ร่มสนธิ, การศึกษาวิวัฒนาการองค์ประกอบและการใช้ประโยชน์ของดินเพื่อการตั้งถิ่นฐานในเกาะการเมืองพระนครศรีอยุธยา, สำนักโบราณคดีและพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติที่ 3, 2539.
- [2] สิทธิชัย แสงอาทิตย์, การทดสอบวัสดุ. นครราชสีมา:มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2545, บทที่ 6 หน้า 17-18.
- [3] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก 243-2520, วิธีชักตัวอย่างและทดสอบบอิฐและอิฐกลวง. กรุงเทพฯ: สมอ, 2543.
- [4] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, มาตรฐานสำหรับอาคารวัสดุก่อ. กรุงเทพฯ:วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2518.
- [5] สูดชาย พานสุวรรณ, การวิเคราะห์โบราณสถานก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543.
- [6] สดสวย สุจริตธรรมกุล, การวิเคราะห์แผ่นพื้นที่ซ่อมด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยโดยวิธีไฟในอิฐลามেন্ট, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [7] บริษัทเอเชียกันดั้ม จำกัด. 2552. “การสืบค้นข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.askn.co.th>, [สืบค้นเมื่อ 12 มิถุนายน 2552]
- [8] บริษัท เอ็มเค กรุ๊ป จำกัด. 2552. “การสืบค้นข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.muikwang.com>, [สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2552]
- [9] ชีวลักษณ์ พงษ์บุรณกิจ และ ตระกูล อร่ามรัศมี. “การตรวจสอบการรับแรงกดตามแนวแกนของผนังคอนกรีตบล็อกประสาน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 10, วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2548, ชลบุรี, 2548, หน้า STR 34-39.
- [10] Monk, “A Historical Survey and Analysis of the Compressive Strength of Brick Masonry”, **Research Report of Structure Clay Products Research Foundation, No.12**, 11 July 1967, Geneva, 1967.
- [11] อนุเทพ แช่วตระกูล, พฤติกรรมของกำแพงที่ทำจากอิฐทอ้งถิ่นภายใต้น้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2538.

- [12] ชีระพงษ์ สว่างปัญญากร และ นพดล เกื้อนศิริ, **กำลังของผนังรับน้ำหนัก**, วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2522.
- [13] Francis¹ and Horman², “The Effect of Joint Thickness and Other Factors on the Compressive
Strength of Brickwork”, **Proceeding of the Second International Brick Masonry
Conference**, Stoke-on-Trent, England, 1971, pp. 31-37.
- [14] Hendry, **Design of Masonry Structures**. 2d ed. University of Edinburgh, 1971, pp. 271.
- [15] Drysdale et al, “Behaviour of Concrete Block Masonry under Axial Compression”, **Journal of
the American Institute**, Proceedings V.76, No. 6, 1979, pp. 707-721.
- [16] Hedstrom, “Load Test of Patterned Concrete Masonry Walls”, **Journal of the American
Concrete Institute**, Proceeding Vol.57, 1961, pp. 1265-1286.
- [17] Boulton, “Concrete Masonry Prism Testing”, **Journal of the American Concrete Institute**,
Proceeding of the ASCE, Vol.76, 1979, pp.513-535.
- [18] Grimm, “Strength and Related Properties of Brick Masonry”, **Journal of the Structural
Division**, Proceeding of the ASCE, Vol. 101, No. ST1, 1975, pp. 217-232.
- [19] เอนก ชมวงษ์, **ความแข็งแรงของกำแพงอิฐในการรับแรงด้านข้าง**, วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
- [20] Thayaparan S., **The Strength of Thai Brick Columns**, Master of Engineering, Civil
Engineering, Asian Institute of Technology Pathumthani, 1982.
- [21] ประวีดี ตั้งศิริวัฒนกุล, **ระบบกำแพงคอนกรีตบล็อกรับแรงในแนวแกน**, วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ผลการทดลองของผนังทั้ง 6 ผนัง

ผลการทดลองของผนังที่ 1

ทดสอบที่ 90 วัน ผนังที่ 1

Load (ton)	Stress (ksc)	ระยะทรุดตัว (mm)		ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (mm)	
0.00	0.00	0	0	0	0
5.000	0.556	0.100	0.000	-0.080	0.020
10.000	1.111	0.340	0.200	-0.100	0.040
15.000	1.667	0.570	0.340	-0.100	0.040
20.000	2.222	0.760	0.480	-0.100	0.040
25.000	2.778	0.870	0.620	-0.400	0.040
30.000	3.333	1.080	0.670	-0.400	0.040
35.000	3.889	1.340	0.740	-0.710	0.150
36.140	4.016	1.330	0.730	-0.720	0.170
40.000	4.444	1.520	0.700	-0.840	0.280
45.000	5.000	1.690	0.690	-1.010	0.280

Load (ton)	Stress (ksc)	Strain					
		1	2	3	4	5	6
0.00	0.00	0	0	0	0	0	0
5.000	0.556	-14	2	-2	-2	-2	1
10.000	1.111	-29	6	-11	-3	-6	2
15.000	1.667	-45	12	-21	-5	-11	3
20.000	2.222	-61	19	-32	-4	-17	5
25.000	2.778	-79	27	-51	-5	-26	6
30.000	3.333	-103	44	-85	-4	-37	10
35.000	3.889	-137	66	-149	-1	-53	17
36.140	4.016	-141	69	-158	-3	-56	19
40.000	4.444	-168	92	-221	-5	-74	27
45.000	5.000	-188	116	-276	-11	-101	32

ผลการทดลองของผนังที่ 2

ทดสอบที่ 90 วัน ผนังที่ 2

Load (ton)	Stress (ksc)	ระยะทรุดตัว (mm)		ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (mm)	
0	0.000	0	0	0	0
10.000	1.111	0.750	0.510	-0.370	0.120
15.460	1.718	1.170	0.750	-0.690	0.200
20.000	2.222	1.260	0.960	-0.700	0.320
25.970	2.886	1.700	1.120	-1.080	0.400
30.000	3.333	1.710	1.360	-1.170	0.450
35.120	3.902	2.020	1.690	-1.360	0.600
40.000	4.444	2.350	2.030	-1.490	0.630
46.800	5.200	2.730	2.400	-1.550	0.630
48.960	5.440	2.870	2.570	-1.610	0.630
50.000	5.556	2.960	2.650	-1.680	0.630
55.000	6.111	3.250	2.890	1.800	0.630
60.000	6.667	3.480	3.080	-1.910	0.630
65.330	7.259	3.780	3.280	-2.050	0.610
67.000	7.444	3.880	3.350	-2.080	0.610
70.000	7.778	4.450	3.660	-2.340	0.360
75.770	8.419	4.650	3.700	2.470	0.360
81.820	9.091	4.940	3.870	-2.700	0.140
84.270	9.363	5.210	4.010	-2.890	0.090

Load (ton)	Stress (ksc)	Strain 1	Strain 2	Strain 3	Strain 4	Strain 5	Strain 6
0	0.000	0	0	0	0	0	0
10.000	1.111	-11.000	-3.000	-2.000	2.000	-	-2.000
15.460	1.718	-14.000	-4.000	-3.000	3.000	-	-3.000
20.000	2.222	-17.000	-4.000	-3.000	2.000	-	-3.000
25.970	2.886	-22.000	-4.000	-6.000	1.000	-	-4.000
30.000	3.333	-26.000	-4.000	-4.000	5.000	-	-5.000
35.120	3.902	-31.000	-3.000	-6.000	9.000	-	-7.000
40.000	4.444	-35.000	-5.000	-20.000	7.000	-	-8.000
46.800	5.200	-40.000	-5.000	-36.000	3.000	-	-10.000
48.960	5.440	-41.000	-5.000	-45.000	1.000	-	-10.000
50.000	5.556	-41.000	-5.000	-46.000	2.000	-	-11.000
55.000	6.111	-41.000	-5.000	-53.000	3.000	-	-12.000
60.000	6.667	-41.000	-4.000	-62.000	3.000	-	-12.000
65.330	7.259	-39.000	-2.000	-71.000	3.000	-	-14.000
67.000	7.444	-39.000	-2.000	-75.000	3.000	-	-14.000
70.000	7.778	-25.000	-1.000	-66.000	4.000	-	-17.000
75.770	8.419	-23.000	0.000	-69.000	2.000	-	-18.000
81.820	9.091	-20.000	0.000	-71.000	5.000	-	-20.000
84.270	9.363	-11.000	-8.000	-67.000	5.000	-	-22.000

ผลการทดลองของผนังที่ 3

ทดสอบที่ 90 วัน ผนังที่ 3

Load (ton)	Stress (ksc)	ระยะทรุดตัว (mm)		ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (mm)	
0.00	0.000	0	0	0	0
10.000	1.111	0.390	0.060	-0.520	0.070
20.000	2.222	1.340	0.070	-0.590	0.060
30.000	3.333	1.720	0.060	-0.730	-0.210
40.000	4.444	2.210	0.070	-0.720	-0.590
54.970	6.108	3.010	0.070	-0.540	-1.530
60.000	6.667	3.330	0.060	-0.540	-1.830
70.000	7.778	3.860	0.060	-0.550	-2.340
80.000	8.889	4.610	0.050	-0.550	-3.130
90.000	10.000	5.200	0.070	-0.550	-2.310
100.000	11.111	4.440	0.070	-0.550	-2.480
110.000	12.222	5.930	0.060	-0.540	-2.780
120.000	13.333	6.480	0.070	-0.550	-3.130
130.000	14.444	7.200	0.070	-0.450	-3.520
140.000	15.556	7.700	0.070	-0.550	-3.760
148.890	16.543	8.030	0.070	-0.550	-4.040

Load (ton)	Stress (ksc)	Strain 1	Strain 2	Strain 3	Strain 4	Strain 5	Strain 6
0.00	0.000	0	0	0	0	0	0
10.000	1.111	-40.000	11.000	-40.000	0.000	-14.000	2.000
20.000	2.222	-61.000	18.000	-76.000	0.000	-19.000	4.000
30.000	3.333	-86.000	22.000	-132.000	0.000	-37.000	7.000
40.000	4.444	-113.000	26.000	-171.000	0.000	-64.000	12.000
54.970	6.108	-208.000	64.000	-291.000	-3.000	-126.000	22.000
60.000	6.667	-238.000	74.000	-330.000	-5.000	-146.000	24.000
70.000	7.778	-290.000	46.000	-354.000	-10.000	-162.000	21.000
80.000	8.889	-351.000	51.000	-374.000	-16.000	-187.000	18.000
90.000	10.000	-408.000	63.000	-394.000	.20.000	-229.000	17.000
100.000	11.111	-437.000	73.000	-412.000	-22.000	-248.000	19.000
110.000	12.222	-487.000	91.000	-441.000	-23.000	-282.000	22.000
120.000	13.333	-549.000	100.000	-481.000	-26.000	-321.000	28.000
130.000	14.444	-622.000	118.000	-524.000	-30.000	-380.000	34.000
140.000	15.556	-677.000	140.000	-540.000	-34.000	-415.000	34.000
148.890	16.543	-721.000	157.000	-553.000	-36.000	-441.000	25.000

ผลการทดลองของผนังที่ 4

ทดสอบที่ 90 วัน ผนังที่ 4

Load (ton)	Stress (ksc)	ระยะทรุดตัว (mm)		ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (mm)	
0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1.111	-1.490	0.510	0.670	-0.610
40	4.444	-1.920	2.030	0.500	-1.410
50	5.556	-1.930	2.630	0.430	-1.880
60	6.667	-1.770	3.290	0.280	-2.090
70	7.778	-1.520	3.910	0.080	-2.510
80	8.889	-1.270	4.490	-0.060	-2.830
90	10.000	-1.040	4.900	-0.270	-2.950
110	12.222	-0.540	5.870	-0.730	-2.860
119	13.222	-0.350	6.250	-1.010	-2.210
120	13.333	-0.350	6.290	-1.030	-2.210
121	13.444	-0.350	6.300	-1.040	-2.210
128	14.222	-0.260	6.610	-1.230	-2.200
130	14.444	-0.230	6.720	-1.270	-2.220
135	15.000	-0.130	6.870	-1.420	-2.260
138	15.333	-0.100	6.960	-1.490	-2.280
140	15.556	-0.010	7.090	-1.620	-2.310

Load (ton)	Stress (ksc)	Strain 1	Strain 2	Strain 3	Strain 4	Strain 5	Strain 6
0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1.111	974	153	82	-2	4	6
40	4.444	973	204	249	3	28	19
50	5.556	875	191	270	11	72	24
60	6.667	712	134	213	12	101	13
70	7.778	657	131	199	23	125	15
80	8.889	601	125	186	27	164	6
90	10.000	594	136	185	64	228	3
110	12.222	768	169	141	393	589	29
119	13.222	817	193	141	427	484	44
120	13.333	819	192	139	428	480	43
121	13.444	821	194	138	428	478	43
128	14.222	867	228	164	414	484	66
130	14.444	870	227	164	406	480	54
135	15.000	912	263	199	423	512	69
138	15.333	933	282	219	430	525	74
140	15.556	975	303	259	418	514	73

ผลการทดลองของผนังที่ 5

ทดสอบที่ 90 วัน ผนังที่ 5

Load (ton)	Stress (ksc)	ระยะทรุดตัว (mm)		ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (mm)	
0.00	0.000	0	0	0	0
10.000	1.111	0.260	0.280	-0.490	0.010
20.000	2.222	0.680	2.600	-0.690	0.250
27.480	3.053	1.070	0.830	-1.220	0.350
30.000	3.333	1.290	0.990	-1.360	0.360
40.000	4.444	1.680	1.480	-1.750	0.630
48.890	5.432	2.210	1.890	-2.060	0.680
50.000	5.556	2.330	2.040	-2.170	0.720
54.480	6.053	2.600	2.220	-2.220	0.730
58.300	6.478	2.620	2.350	-2.290	0.730
59.390	6.599	2.670	2.390	-2.330	0.720
60.000	6.667	2.700	2.420	-2.350	0.720
60.800	6.756	2.700	2.420	-2.350	0.720
64.000	7.111	2.840	2.430	-2.410	0.730
68.660	7.629	2.980	2.410	-2.460	0.720
70.000	7.778	3.010	2.430	-2.530	0.720
72.500	8.056	3.070	2.430	-2.530	0.730
73.000	8.111	3.090	2.430	-2.530	0.730
80.000	8.889	3.190	2.430	-2.690	0.810
90.000	10.000	3.410	2.430	-2.940	0.870
92.000	10.222	3.470	2.430	-2.990	0.880
93.000	10.333	3.570	2.430	-3.010	0.890
94.940	10.549	3.570	2.430	-3.040	0.980
100.000	11.111	3.570	2.430	-3.160	1.000
100.910	11.212	3.260	2.430	-3.190	1.020

ทดสอบที่ 90 วัน ผนังที่ 5					
Load (ton)	Stress (ksc)	ระยะทรุดตัว (mm)		ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (mm)	
		107.910	11.990	3.770	2.430
109.000	12.111	3.590	2.430	-3.510	1.210
110.000	12.222	3.570	2.430	-3.160	1.000
110.850	12.317	3.620	2.430	-3.190	1.020
113.840	12.649	3.870	2.430	-3.650	1.210
120.000	13.333	4.210	2.430	-4.280	0.910
122.000	13.556	4.210	2.430	-4.290	0.860
124.000	13.778	4.220	2.430	-4.400	0.690
130.000	14.444	4.270	2.430	-4.570	0.560
138.000	15.333	4.390	2.430	-4.710	0.380
140.000	15.556	4.440	2.430	-4.840	0.260
147.000	16.333	4.440	2.430	-4.980	0.150
148.000	16.444	4.450	2.440	-5.000	0.140



Load (ton)	Stress (ksc)	Strain 1	Strain 2	Strain 3	Strain 4	Strain 5	Strain 6
0.00	0.000	0	0	0	0	0	0
10.000	1.111	-15.00	0.000	0.000	-	-9.000	0.000
20.000	2.222	-35.000	-3.000	-7.000	-	-25.000	-6.000
27.480	3.053	-39.000	2.000	-1.000	-	-33.000	0.000
30.000	3.333	-48.000	0.000	-3.000	-	-42.000	-3.000
40.000	4.444	-62.000	2.000	-2.000	-	-64.000	-2.000
48.890	5.432	-68.000	12.000	2.000	-	-80.000	6.000
50.000	5.556	-71.000	14.000	3.000	-	-88.000	8.000
54.480	6.053	-74.000	16.000	4.000	-	-96.000	9.000
58.300	6.478	-81.000	17.000	3.000	-	-107.000	11.000
59.390	6.599	-87.000	16.000	1.000	-	-114.000	8.000
60.000	6.667	-89.000	17.000	1.000	-	-119.000	9.000
60.800	6.756	-89.000	17.000	1.000	-	-119.000	9.000
64.000	7.111	-94.000	17.000	0.000	-	-133.000	11.000
68.660	7.629	-108.000	14.000	-5.000	-	-157.000	5.000
70.000	7.778	-114.000	13.000	-7.000	-	-161.000	4.000
72.500	8.056	-119.000	12.000	-9.000	-	-169.000	3.000
73.000	8.111	-122.000	12.000	-10.000	-	-172.000	3.000
80.000	8.889	-134.000	18.000	-12.000	-	-193.000	7.000
90.000	10.000	-149.000	35.000	-10.000	-	-221.000	18.000
92.000	10.222	-157.000	34.000	-15.000	-	-229.000	16.000
93.000	10.333	-163.000	35.000	-16.000	-	-235.000	15.000
94.940	10.549	-166.000	36.000	-16.000	-	-238.000	16.000
100.000	11.111	-177.000	43.000	-15.000	-	-251.000	19.000
100.910	11.212	-178.000	45.000	-15.000	-	-254.000	20.000
107.910	11.990	-206.000	62.000	-17.000	-	-277.000	17.000
109.000	12.111	-209.000	68.000	-17.000	-	-281.000	19.000

Load (ton)	Stress (ksc)	Strain 1	Strain 2	Strain 3	Strain 4	Strain 5	Strain 6
110.000	12.222	-176.000	43.000	-15.000	-	-250.000	19.000
110.850	12.317	-178.000	45.000	-15.000	-	-254.000	20.000
113.840	12.649	-207.000	90.000	-13.000	-	-286.000	18.000
120.000	13.333	-178.000	107.000	43.000	-	-225.000	10.000
122.000	13.556	-179.000	150.000	48.000	-	-222.000	8.000
124.000	13.778	-175.000	95.000	75.000	-	-208.000	-4.000
130.000	14.444	-160.000	104.000	104.000	-	-188.000	0.000
138.000	15.333	-170.000	102.000	125.000	-	-197.000	-20.000
140.000	15.556	-173.000	99.000	141.000	-	-210.000	-35.000
147.000	16.333	-181.000	98.000	150.000	-	-224.000	-42.000
148.000	16.444	-188.000	93.000	147.000	-	-231.000	-48.000



ผลการทดลองของผนังที่ 6

ทดสอบที่ 90 วัน ผนังที่ 6

Load (ton)	Stress (ksc)	ระยะทรุดตัว (mm)		ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (mm)	
0.00		0	0	0	0
10.000	1.111	0.390	0.840	0.100	-0.890
20.000	2.222	0.550	1.590	0.460	-1.410
30.000	3.333	0.910	2.220	0.710	-2.316
40.000	4.444	1.270	2.670	0.770	-2.190
50.000	5.556	1.710	3.160	0.770	-3.010
60.000	6.667	2.100	3.660	0.770	-3.250
70.000	7.778	2.570	4.220	0.840	-3.870
75.000	8.333	2.830	4.480	0.860	-3.860
77.000	8.556	2.970	4.620	0.880	-3.860
80.000	8.889	3.090	4.790	0.880	-4.010
84.310	9.368	3.200	4.980	0.870	-4.160
87.000	9.667	3.280	5.160	0.880	-4.310
90.000	10.000	3.350	5.250	0.880	-4.430
91.310	10.146	3.380	5.300	0.880	-4.480
100.000	11.111	3.700	5.710	0.870	-4.660
101.550	11.283	3.780	5.780	0.880	-4.660
104.500	11.611	3.920	5.970	0.880	-4.740
110.000	12.222	4.190	6.290	0.870	-4.990
117.090	13.010	4.520	6.650	0.800	-4.990
120.000	13.333	4.640	6.860	0.800	-5.120
122.000	13.556	4.770	6.960	0.720	-5.160
127.000	14.111	5.090	7.240	0.610	-5.320
130.000	14.444	5.280	7.390	0.480	-5.460
133.000	14.778	5.400	7.430	0.480	-5.620
136.000	15.111	5.660	7.440	0.350	-5.750

ทดสอบที่ 90 วัน ผนังที่ 6					
Load (ton)	Stress (ksc)	ระยะทรุดตัว (mm)		ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (mm)	
140.000	15.556	6.040	7.440	0.340	-5.830
148.000	16.459	6.370	7.440	0.150	-6.100
150.000	16.667	-	-	-	-
160.000	17.778	-	-	-	-
170.000	18.889	-	-	-	-
180.000	20.000	-	-	-	-
190.000	21.111	-	-	-	-
200.000	22.222	-	-	-	-
210.000	23.333	-	-	-	-
220.000	24.444	-	-	-	-
230.000	25.556	-	-	-	-
240.000	26.667	-	-	-	-
250.000	27.778	-	-	-	-



Load (ton)	Stress (ksc)	Strain 1	Strain 2	Strain 3	Strain 4	Strain 5	Strain 6
0.00	0	0	0	0	0	0	0
10.000	1.111	13.000	-10.000	-8.000	5.000	-13.000	5.000
20.000	2.222	40.000	3.000	8.000	59.000	-12.000	30.000
30.000	3.333	45.000	-1.000	6.000	142.000	-18.000	52.000
40.000	4.444	57.000	0.000	11.000	242.000	-31.000	90.000
50.000	5.556	71.000	2.000	13.000	349.000	-53.000	146.000
60.000	6.667	74.000	-5.000	1.000	2823.000	-101.000	357.000
70.000	7.778	110.000	5.000	15.000	3984.000	-94.000	514.000
75.000	8.333	115.000	1.000	10.000	3995.000	-94.000	600.000
77.000	8.556	117.000	0.000	12.000	3605.000	-58.000	622.000
80.000	8.889	110.000	-6.000	5.000	3421.000	-51.000	620.000
84.310	9.368	126.000	-6.000	8.000	3330.000	-47.000	628.000
87.000	9.667	140.000	1.000	13.000	3222.000	-40.000	636.000
90.000	10.000	153.000	5.000	20.000	3199.000	-35.000	650.000
91.310	10.146	153.000	2.000	18.000	3187.000	-35.000	651.000
100.000	11.111	171.000	3.000	21.000	3115.000	-29.000	676.000
101.550	11.283	178.000	8.000	27.000	3101.000	-26.000	681.000
104.500	11.611	184.000	6.000	27.000	3081.000	-27.000	3081.000
110.000	12.222	187.000	2.000	22.000	3041.000	-30.000	674.000
117.090	13.010	209.000	10.000	33.000	2991.000	-24.000	680.000
120.000	13.333	207.000	8.000	32.000	2970.000	-28.000	686.000
122.000	13.556	203.000	4.000	30.000	2966.000	-28.000	686.000
127.000	14.111	212.000	5.000	35.000	2947.000	-27.000	694.000
130.000	14.444	215.000	2.000	34.000	2930.000	-34.000	689.000
133.000	14.778	226.000	8.000	40.000	2928.000	-31.000	688.000
136.000	15.111	234.000	5.000	42.000	2898.000	-42.000	677.000
140.000	15.556	244.000	7.000	43.000	2725.000	-39.000	635.000

Load (ton)	Stress (ksc)	Strain 1	Strain 2	Strain 3	Strain 4	Strain 5	Strain 6
148.000	16.459	254.000	-2.000	30.000	2587.000	-45.000	611.000
150.000	16.667	317.000	-1.000	53.000	198.000	-94.000	157.000
160.000	17.778	333.000	-4.000	52.000	74.000	-105.000	125.000
170.000	18.889	349.000	-5.000	52.000	-51.000	-104.000	111.000
180.000	20.000	354.000	-12.000	52.000	-72.000	-76.000	150.000
190.000	21.111	327.000	-9.000	51.000	23.000	-66.000	31.000
200.000	22.222	313.000	-12.000	52.000	-111.000	-63.000	10.000
210.000	23.333	303.000	-13.000	52.000	-245.000	-71.000	-13.000
220.000	24.444	317.000	-7.000	58.000	-319.000	-80.000	-16.000
230.000	25.556	306.000	1.000	64.000	386.000	-90.000	-18.000
240.000	26.667	287.000	20.000	71.000	-353.000	-102.000	-4.000
250.000	27.778	276.000	71.000	106.000	-336.000	-83.000	17.000





ภาคผนวก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



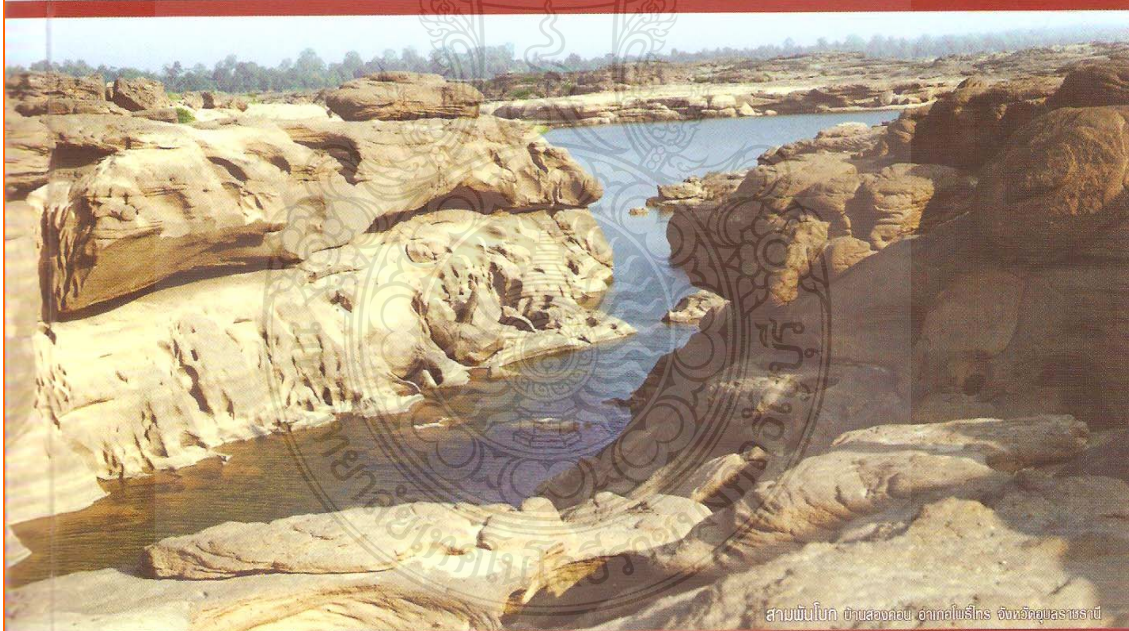
The 15th National Convention on Civil Engineering (NCCE15)

วิศวกรรมโยธากับการพัฒนาท้องถิ่น



NCCE15

UBON RATCHATHANI วันที่ 12-14 พฤษภาคม 2553 จ.อุบลราชธานี
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ร่วมกับ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์



สามพันโบก ตำบลจองคอน อำเภอน้ำโสม จังหวัดอุบลราชธานี





เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ

วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15

PROCEEDINGS OF THE 15TH NATIONAL CONVENTION ON CIVIL ENGINEERING

วิศวกรรมโยธากับการพัฒนาท้องถิ่น

CIVIL ENGINEERING WITH LOCAL DEVELOPMENT

12 – 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2553

ศูนย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ อุบลราชธานี

12 – 14 May 2010

Sunee Grand & Convention Center, UbonRatchathani



ร่วมจัดโดย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ร่วมกับ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์



สารบัญบทคัดย่อ (ต่อ)

		หน้า
MAT022	ผลกระทบของปริมาณคลอไรด์และสัดส่วนผสมคอนกรีตต่อประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ EFFECT OF CHLORIDE CONTENT AND MIX PROPORTION ON EFFECTIVENESS OF CORROSION INHIBITOR TO PREVENT CORROSION OF REINFORCING STEEL ปภาพันธ์ ปรารมภ์, วันศิริ วรรัตน์วิจิตร, ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ, วิฑิต ปานสุข, สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล	194
MAT023	การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี REHABILITATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE BY ELECTROCHEMICAL CHLORIDE REMOVAL METHOD วิศิษฏ์ แซ่ลิ้ม, วันชัย ขอดสุดใจ	196
MAT024	การศึกษากำลังรับแรงดัดของบล็อกดินซีเมนต์เสริมใยไผ่ THE STUDY OF FLEXURAL STRENGTH OF SOIL CEMENT BLOCKS REINFORCED WITH BAMBOO FIBER วัลลีย์ เชยชม, สำเนียง ณ ตะกั่วทุ่ง, วุฒินัย กนกกันทร	197
MAT025	ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูน CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE AND CHLORIDE THRESHOLD CONTENT OF CONCRETE WITH LIMESTONE POWDER ชัยเฉลิม ราศรี, ทวีชัย สารญวานิช, เฉลิมชัย วาณิชชัยลีส, สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล	198
MAT026	ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่ EFFECTS OF MACROCELL CORROSION ON DURABILITY OF PATCHING REPAIR OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE ตามยศ สมชายภักดิ์, ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ, ปิณฑานต์ ภิรมมาตร, สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล	199
MAT027	การศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขี้เถ้าผสมตะกอนน้ำประปา A STUDY OF GEOPOLYMER MORTAR FROM BAGASSE ASH AND WATER SUPPLY SLUDGE อธิกา วงศ์วานกลอม, สหสาภ ทอมวุฒิวงศ์	201
MAT029	PREDICTION OF CRACKING AGE OF CONCRETE DUE TO RESTRAINED SHRINKAGE Sontaya Tongaroonsri, Somnuk Tangtermsirikul	202
MAT030	ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE AND CHLORIDE THRESHOLD OF FLYASH CONCRETE วสุ วิทเขตต์ปภา, ทวีชัย สารญวานิช, ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ, สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล	203



STUDY ON THE BEHAVIOR OF ANCIENT MASONRY WALLS RETROFITTED USING GLASS FIBER REINFORCED POLYMER UNDER AXIAL LOAD

(Ratchaneewan Kerdmongkon)¹
(Meng Jing)²
(Werasak Raongjant)³

¹ Under Education of Master Degree of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, rnk_july@hotmail.com

² School of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, jingmeng72@hotmail.com

³ School of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, werasaky@hotmail.com

ABSTRACT: The purpose of this research is to determine the mechanical properties of ancient masonry walls (AMW) retrofitted with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) under axial load through experimental method. Six full scale ancient masonry wall specimens were tested under axial load acted at the top surface. Two wall specimens were served as reference without retrofitting. Other four walls were retrofitted with GFRP before or after the damage. The tested results demonstrated that the bearing capacity of ancient masonry walls was distinctly improved after GFRP strengthening.

KEYWORDS: Ancient Masonry Wall, Retrofit, Glass Fiber Reinforced Polymer, bearing capacity, axial load

1. INTRODUCTION

There are many ancient places situated in Thailand. It was constructed at least one hundred years ago. To date, the maintenance of those places is responsibility of the Fine Art Department. Continuous repairs are required due to damage to the ancient building. To maintain the buildings to be similar to the original building, the repairs must be performed. In the former time, the Fine Art Depart used Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) to fix those building, but the cost was too high and the surface is quite black.

In light of the information given in the preceding part, the GFRP was submitted and utilized to repair those buildings in lieu of CFRP owing to the fact that the GFRP material is lighter in color, and the cost is cheaper when compared to the CFRP.

In this study, full-scale test was processed to study the behavior of ancient masonry wall retrofitted with GFRP. The materials of the specimens are presently made at Ban Lum Plee, Ayuttaya province, which have the same mechanical properties as that of the history masonry wall at Ban Lum Plee. [1]

2. Full-Scale Test

2.1 Properties of materials

Relevant materials must be tested in accordance with American Society for Testing and Materials (ASTM) C67 [8]. The dimension of brick is 15x30x5cm. The standard testing is stipulated and determined as follows:

compressive strength, Young Modulus, absorption test, boiling test, and initial rate of absorption test. The mortar ratio is: 1:2:9 (1 parts of white cement, 2 parts of white ancient mortar, and 9 parts of coarse sand) [1]. Table 1 shows the properties of bricks and mortar.

Table 1 The source and tested result for bricks and mortar.

Source of bricks	Unit weight (g/cm ³)	Compressive strength (kg/cm ²)	Modulus of elasticity (kg/cm ²)
1.Banlumpee source	1.373	40.12	31,033
2.Phukaotong pagoda	1.383	41.61	41,200
3. Khunsan temple	1.403	57.19	26,633
4.Naphrameru addition	1.359	39.54	42,400
5. Phraram temple	1.463	37.58	32,400
6. Kudidao temple	1.457	44.01	32,450
7.Samanakoti temple	1.475	50.12	37,033
8. Mortar New	1.924	82.53	165,467
9. Pomphet fort	1.322	39.60	29,876



The properties of GFRP used in this study are shown in Table 2

Table 2 Technical considerations (nominal value) of GRFP

Properties	
Width (mm)	1,000
Thickness (mm)	0.5
Warp x Weft (each/inch)	6 x 6
Weight (g/m ²)	150
Filament Diameter (µm)	14
Nominal row length (m)	50 (+ 0.50 -0)
Nominal row width (m)	1 (+0.05 -0)*
Moisture content (%)	< 0.3
Loss on Ignition (L.O.I)	15
Mesh Density (%)	10 x 10 strands (warp & weft)
Nominal strand tensile strength 1,700 MPa	Per 10 cm
Elastic Modulus 72 GPa	

The resin to be used in this experiment is “Vianova Resins”, VIAPAL UP 355E/66. The specification is given in Table 3

Table 3 Data of cured VIAPAL UP 355 E/66

Properties		Unit
Barcol hardness (935)	84	--
Density at 20°C	1.21	g/cm ³
Refractive index n _D ²⁰	1.557	--
Tensile strength	55	N/mm ²
Elongation	2.0	%
Flexural strength	110	N/mm ²
Modulus of elasticity	3200	N/mm ²
Impact strength	7	KJ/m ²
Impact strength with notch	1.0	KJ/m ²
Compressive strength	160	N/mm ²
Hardness after 10 sec	175	N/mm ²
Water absorption	0.3	%

2.2 Dimension and retrofitting mode of specimen walls

Six specimen walls tested in this research are constructed as one size. The dimension of walls is specified as drawing in Fig.1.

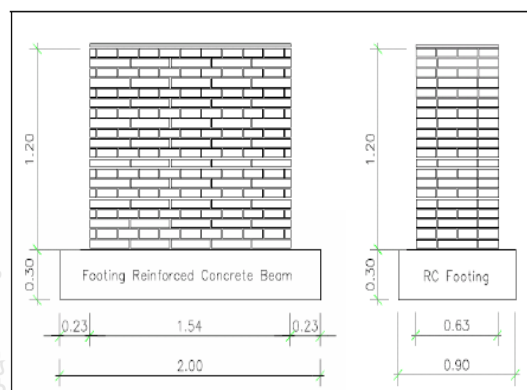


Fig. 1 The dimension of walls



Fig. 2 Photo of specimens

The bricks must be laid in the stretcher as per the English bond as shown in Fig. 3. The joint must be constructed as the flush joint. A string line and spirit level must be used to ensure that bricks are laid on an even plane. The joint between each brick layer is 1cm. Inspection must be thoroughly carried out during the laying brick wall.

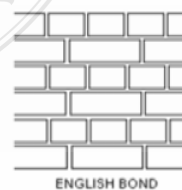


Fig. 3 English bond

Specimens No.1 and No.2 were tested as reference without GFRP retrofitting. Specimens No.3 and No.5 were retrofitted with full GFRP sheets before and after damage respectively, as shown in Fig.4. Specimens No.4 and No.6 were retrofitted with three GFRP strips before and after damage respectively, as shown in Fig. 5.

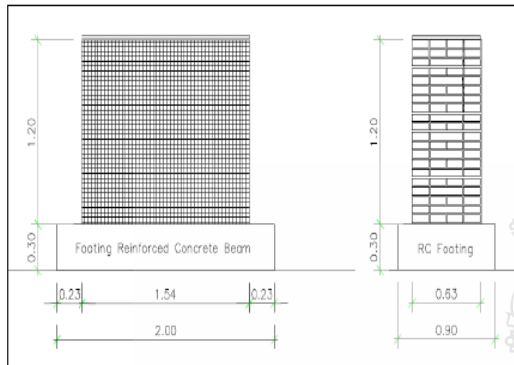


Fig. 4 Retrofitted with full GFRP sheet

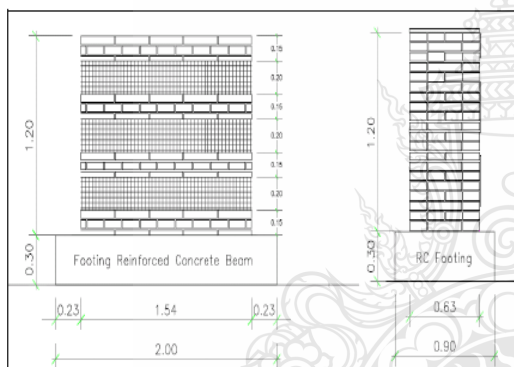


Fig. 5 Retrofitted with GFRP strips

2.3 Test set-up

The steel structure frame was fabricated and fixed, and the hydraulic jack and load cell and relevant accessories shown in Fig. 6 were installed to determine the compressive load.



Fig.6 Test set-up and relevant instruments

2.4 Test process and results

The loading was acted at the top surface of specimens until failure. Crack modes of six specimens are shown in Fig. 7 to Fig. 9.

The test results were concluded in Table 4.

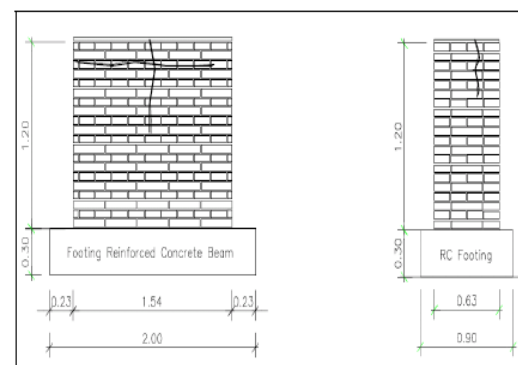
Table 4 tested data

Specimen No.	1	2	3	4	5	6
Damage	before		√	√		
	after				√	√
Ultimate Load (tons)	45	84	148	148	148	148
Retrofit effect (%)	-	-	56.7	56.7	56.7	56.7

The axial load was acted to the six specimen walls. The load has increased one ton in each step. Meanwhile, damage to the walls, i.e. crack has been observed and recorded. It was noted that the first crack was observed, at the load approximately 36.14 tons. Afterwards, crack numbers have been increased in compliance with the axial load acted until the maximum load was acted at 45 tons, and cracks were recorded as shown in Fig. 7.

The specimen No. 1 was removed. The axial load was acted to the specimen No. 2. The first crack was observed at the load approximately 48.96 tons. The load was continually acted to the specimen until crack numbers have been increased at the maximum load of 84.27 tons. The corresponding crack was recorded as shown in Fig. 8. This demonstrated that the compressive load of specimen No. 1 was less than specimen No. 2.

Both specimens were carefully removed from the testing location. Repair with mortar and retrofitting with GFRP (in full sheet and three strips) was carried out for specimen No. 5 and 6. Afterwards, both were tested and compared with the axial load of before and after retrofitting with GFRP.



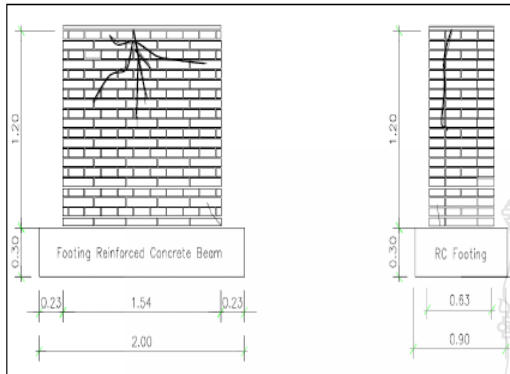


Fig. 7 Specimens No-1 and No-2 after cracking

Specimen No. 3 retrofitted with full sheet of GFRP was tested. The first crack was noted at the load approximately 54.97 tons. Continue load was acted to wall until crack numbers have increased in line with the load acted, at maximum load of 148.89 tons. Crack modes were shown in Fig. 8. Specimen No. 3 was then removed and specimen No. 4 (three strips with GFRP) was tested. The first crack was noted at 119 tons. Continue test was carried out until the compressive load was at 148 tons, as shown in Fig. 8.

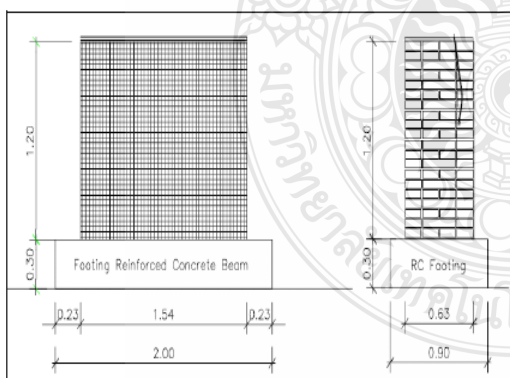


Fig. 8 Photo of specimens No-3 and No-4 after cracking

Specimen No. 5 was tested until the first crack was noted at the load approximately 27.48 tons. The maximum load acted to specimen was approximately 148 tons. The specimen was then removed. The specimen No. 6 was tested and the first crack was noted at the load approximately 70.09 tons. Continue load was acted to the specimen until the maximum load was 148 tons. These results demonstrated that the compressive load of the specimens retrofitted with GFRP for before and after was in excess of the specimens with no GFRP retrofitting.

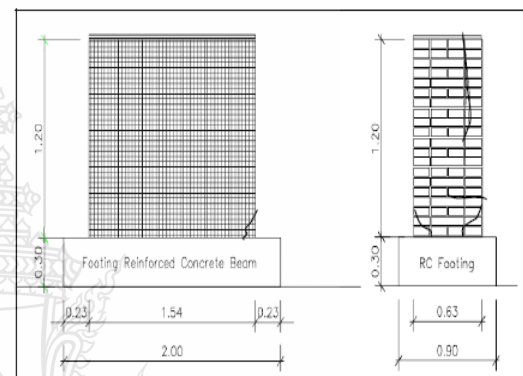


Fig. 9 Photo of Specimens No-5 and No-6 after crack

Fig. 10 show the response curves of six axial loads – vertical displacements.

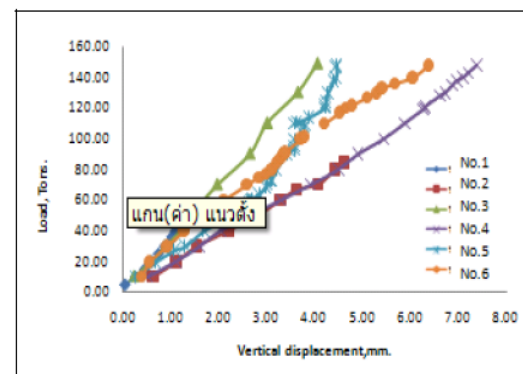
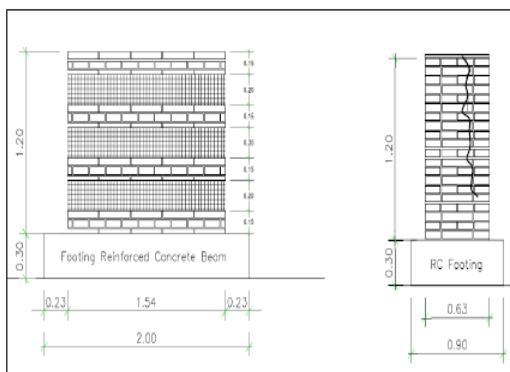




Fig.10 Show load – displacement response of six specimens.

3. Conclusions

The six specimens of ancient masonry walls retrofitted with GFRP before and after damage were tested in this study. Some conclusions are derived as follows:

1. It is anticipated that the compressive load of the walls retrofitted with GFRP for before and after is in excess of the walls with no retrofitting. The test results demonstrated that the compressive load is higher than 56.7 % of the walls with no GFRP retrofitting.
2. After the walls retrofitted with GFRP were tested, the side of walls retrofitted with GFRP has no crack observed. It was, however, noted that there were cracks on the side of wall with no GFRP.
3. In this research, the GFRP material was applied to increase the compressive axial load in comparison to the walls with no GFRP. This will be executed for improving and repairing relevant ancient deterioration places using the masonry walls in various locations in Thailand.

Acknowledgements

Assoc.Prof.Benjapon Wethyavivorn and Mr.Sudchai Pansuwan, who are experts in ancient masonry wall. The structural frame for testing, including relevant testing equipment was carried out at Italian-Thai Industrial Complex, Saraburi. Furthermore, thank you very much for relevant engineers who recommended each stage of the testing process until the testing of the whole specimens were completely carried out.

References

- [1] Mr. Sudchai Pansuwan, 43. Engineering Analysis of Masonry Historic Monument. Master of Engineering, Kasetsart University
- [2] Mr. Chivaluck Pongburanakit, 47. Investigation of Axial Load Resistance of Interlocking Concrete Block Wall. Doctor of Engineering .Kasetsart University
- [3] Jahangir Bakhteri, Ahmad Mahir Makhtar and Shamala Sambasivam, 2004. Finite Element Modelling of Structural Clay Brick Masonry Subjected To Axial Compression. Journal Teknologi, University Teknologi Malaysia
- [4] N.Mojsiović, 2005. A Discussion of Masonry Characteristics Derived From Compression Tests. 10th Canadian Masonry Symposium, ETH Zurich, Switzerland

[5] Tarek H.Almusallam, Yusef Al-Salloum and Saleh H. Alsayed, Rehabilitaion of Infrastructure Using Externally Bonded FRP Composites. King Saud University

[6] H.Mahmood, A.P.Russell, J.M.Ingham, Laboratory Testing of Unreinforced Masonry Walls Retrofitted With Glass FRP Sheets. Department of Civil &Environment Engineering, the University of Auckland, New Zealand

[7] Y.Liu, J. Dawe and J.Mcinnerney, Behavior of GFRP Sheets Bonded To Masonry Walls. 2005 International Institute for FRP in Construction (IIFC), the University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada

[8] Sitichai Lertvichai and Sitichai Seangatith , Behaviors of mortarless Reinforced Concrete Masonry Wall Under Axial Compression. Department of Civil &Environment Engineering, The University of Suranaree University of Technology

[9] Hernan Santa Maria, Pablo Alcaino and Carl Luders, Experimental Response of Masonry Walls Externally Reinforced With Carbon Fiber Fabrics. April 18-22, 2006, Proceedings of the 8th U.S. National on Earthquake Engineering, San Francisco, California, USA



**7th International
Conference on
Structural Analysis of
Historic Constructions**

Strengthening and Retrofitting

Edited by
Xianglin Gu
Xiaobin Song

7th International Conference on Structural Analysis of Historic Constructions

Strengthening and Retrofitting

Selected, peer reviewed papers from the
7th International Conference on
Structural Analysis of Historic Constructions,
October 6-8, 2010, Shanghai, People's Republic of China

Edited by

Xianglin Gu and Xiaobin Song

Department of Building Engineering,
Tongji University, Shanghai, P. R. China

ttp TRANS TECH PUBLICATIONS LTD
Switzerland • UK • USA

Improving Hurricane Survivability of Heritage Structures P.S. Sparks	867
Structural Evaluation and Strengthening of Zeynelbey Tomb in Hasankeyf, Turkey A. Turer	873
Strengthening Proposals for the Trigonio Tower at the City Walls of Thessaloniki V. Delizisi, M. Axiotidou, I.N. Doudoumis and C. Ignatakis	879
The Research on the Rust of Reinforced Bar and the Strengthening Measures to the Existed R.C. Frame nearby the Sea J.J. Miao, B. Qi and Y.C. Liu	885
Stabilization and Strengthening the Foundation of the Two Entrance Gates of the Holy Shrine of Imam Reza (PBUH) P. Homami and M. Golabchi	891
Blasting near Old Foundations and Strengthening of Foundation Walls for the Headquarters of the Ministry for Foreign Affairs of Finland K. Avellan	897
Strengthening of Historical Masonry Buildings with Fiber Reinforced Polymers (FRP) A. Kheyroddin, M.H. Saghafi and S. Safakhah	903
Study on Effect of FRP Reinforced Manners on Seismic Performance of Concrete Frame Structure Y.P. Peng, M. Ma and M.X. Chen	911
Bond between Concrete and Multi-Directional CFRP Laminates J. Sena-Cruz, J. Barros and M. Coelho	917
Lightweight Ribs for the Strengthening of Single Leaf Vaults Undergoing Seismic Actions L. Ferrario, E. Marchina, A. Marini, M. Preti and E. Giuriani	923
Analysis of Strengthening Methods for Retained Exterior Walls during a Structural Retrofit Y. Ouyang and Y. Hu	929
Retrofitting and Strengthening Design for the Former Yihe Spinner Factory in Shanghai Y. Ouyang and Y. Yi	935
The Use of High-Strength Composites in the Reinforcement of Timber B. Kasal and A. Heiduschke	941
Design of the Seismic Upgrading of the Tambour of the S. Nicolò's Church in Catania with the DIS-CAM System M. Di Croce, F.C. Ponzio and M. Dolce	947
The S. Marco Church in L'Aquila: Provisional Interventions after the 2009 Abruzzo Earthquake M. Carraro, T. Ghedina, A. De Sabbata, C. Modena, F. Casarin and D.M. Benetta	953
Behaviors of Historic Masonry Walls Retrofitted with GFRP under Axial Load W. Raongjant, M. Jing and R. Kerdmongkon	959
Compressive Strengthening of Damaged Historic Masonry Walls Repaired with GFRP M. Jing, W. Raongjant and R. Kerdmongkon	965
Retrofitting and Moving Protection for Historical Buildings in Jinan City X. Zhang, S.B. Li and T. Liu	971
Mortar Replacement Reinforcement Method for Existing Masonry Structures L. Luo, M. Zhao and Y. Liu	977
 Rehabilitation and Retrofitting	
On 4R Principle in the Rehabilitation of Concrete Historic Buildings J.Z. Xiao, W.G. Li and M.M. Tawana	985
Seismic Retrofitting of Historic Masonry Buildings – Case Study A.R. Santhakumar, M.S. Mathews, S. Thirumurugan and R. Uma	991
Strike a Balance - Repair or Replace? E.S.T. Leung, E.S. Yeung and S.W. Chan	997
Structural Restoration and Adaptation to Modern Architecture of the Baroque Oppersdorf Palace, Wrocław, Poland P. Berkowski, G. Dmochowski, M.Y. Minch and J. Szolomicki	1003

Behaviors of Historic Masonry Walls Retrofitted with GFRP under Axial Load

RAONGJANT Weresak^{1,a}, JING Meng^{1,b} and
 KERDMONGKON Ratchaneewan^{1,c}

¹School of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand

^awerasaky@yahoo.com, ^bjingmeng72@hotmail.com, ^crnk_july@hotmail.com

Abstract The purpose of this research is to determine the mechanical properties of historic masonry walls retrofitted with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) under axial load through experimental method. Four ancient masonry wall specimens were tested under axial load acted at the top surface. Two wall specimens were served as reference without retrofitting. The third wall was retrofitted with GFRP on full surface before loading. The fourth wall was strengthened with three GFRP strips before loading. The behaviors of historic masonry walls in Thailand were particular because of their special bond manner and dimension. The tested results demonstrated that the bearing capacity of historic masonry walls was distinctly improved after GFRP strengthening.

Keywords: Historic masonry wall, retrofit, glass fiber reinforced polymer, GFRP, axial load

Introduction

In Thailand, there are many historic structures which were built around the eleventh and the twelfth Buddhist centuries. Most of them were made of bricks. Being fruitful archeological information about Thai heritage, restorations of such Thai historic structures are always an engineering challenge and are now taken charged by Bureau of Archeology and Museums, Thailand. Most restorations were executed in traditional engineering manners. There was report after report of failure both prior to and after restorations. This research work conducted with aiming of finding a new retrofitting method based on experimental and theoretical investigations.

FRP (Fiber Reinforced Polymer) laminates or fabric sheets used as a feasible material for retrofit reinforced concrete (RC) structures have been studied and applied in practice in the last few years. It is proved that FRP retrofitting can distinctly improve RC member's strength capacity and seismic capacity. But only until recent years, some reported researches have focused on strengthening of masonry walls. This is due to the well-known advantages of FRP composites including good resistance, high strength and ease for site handling due to their light weight. The continuous reduction in the material cost of FRP composites has also contributed to their popularity.

A large survey of research related to rehabilitation of masonry structures has been reported by Musiker (Musiler 2002). In Canada, Nigel G. et al (Nigel et al. 2001) performed the test that using Glass FRP (GFRP) sheets to increase the flexural capacity and energy absorption characteristics of plain and reinforced concrete block walls. In USA, Amir Fam et al. (Amir et al. 2002, Hernan et al. 2006) conducted in-plane test of damaged masonry wall repaired with FRP. In Europe, especially in Italy and Greece, some research works were focus on repair and strengthening of historic masonry building in seismic area (Thanasis et al. 1997, Binda et al. 2004). In Thailand, the research about retrofitting historical building using FRP has also been executed in analytical program (Suddchai 2000). However experimental research and more insight analysis are much needed.

In this study, test investigation was processed to study the behavior of historic masonry wall retrofitted with GFRP.

Experimental Program

Brick and Mortar A great number of fallen bricks of historic buildings in Ayutthaya province, which has been designated by UNESCO as a World Heritage Site, more than 400 years as capital of Thailand, were collected to test their material properties. Then new bricks were produced according to these material properties to built specimen walls. The dimension of brick is $15 \times 30 \times 5$ cm. The ancient cement mortar was specially prepared according to original method which involved soaking raw lime in water for at least 60 days before mixing it with white cement and coarse sand at 1:2:9 ratios. Table 1 shows the properties of bricks and mortar.

Table 1: Properties of bricks and mortar

Material	Unit weight [g/cm ³]	Compressive strength [MPa]	Elastic modulus [MPa]
Brick	1.373	4.012	3103.3
Mortar	1.924	1.06	1460.5

GRFP sheets and epoxy resin were come from company in Thailand. GFRP sheet has weight of 50g/m^2 with 0.5 mm thickness and 1000 mm width. Nominal tensile strength of it is 1,700 MPa and elastic modulus of 72 GPa. The epoxy resin has tensile strength of 55MPa and elastic modulus 3.3 GPa.

Dimension and Retrofitting Mode of Specimen Walls Four specimen walls were built as that of the history masonry wall at Ban Lum Plee, Ayutthaya. The bricks must be laid in the stretcher as per the English bond, as shown in Fig. 1. The joint must be constructed as the flush joint. A string line and spirit level must be used to ensure that bricks are laid on an even plane. The joint between each brick layer is 1 cm.

Figure 1: English bond

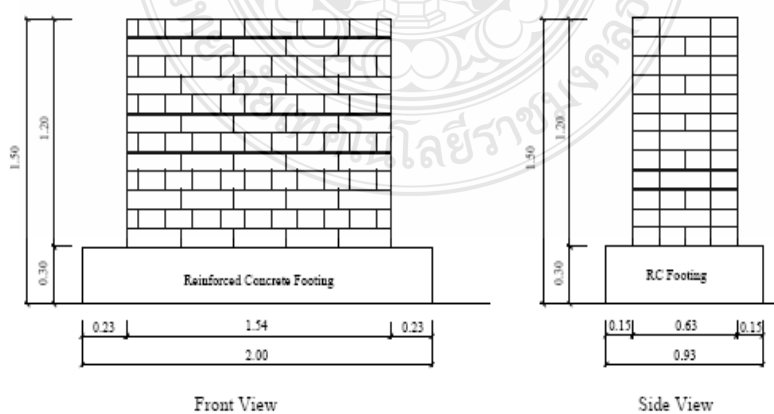


Figure 2: Dimension of walls (m)

Four walls are in the same dimension, as shown in Fig.2. The thickness of the walls is 600 mm, as the ancient wall in Ayutthaya, Thailand. Specimen N-1 and N-2 are used as reference wall without any retrofitting. Specimen N-3 was fully reinforced with GFRP sheets on only one face of the wall. Specimen N-4 was reinforced with three GFRP stripes of 20cm width at spacing of 35cm on center on only one face of the wall. Fig.3 shows the different retrofit scheme.



(a) Specimen N-3

(b) Specimen N-4

Figure 3: Different retrofit scheme

Test Set-up and Instruments Steel structure frame was fabricated and fixed, and hydraulic jack were installed to apply vertical load on the top of the wall through distribution steel beam. Four LDVT (Linear Variable Differential Transformer) were erected at top surface and mid-height of the wall to control in-plane vertical and out-plane lateral displacements. Six strain gauges were pasted on the face of the brick and the GFRP sheets at mid-height to monitor the strain development, as shown in Fig. 4

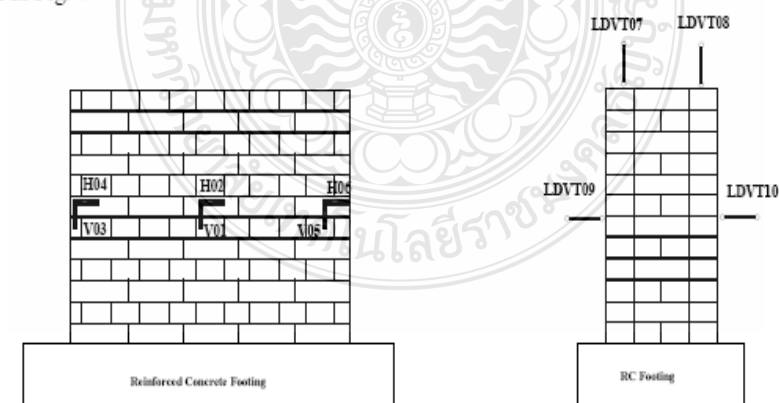


Figure 4: Test instruments

Test Process and Results The vertical loading was increased gradually with increment of approximately 3 tons until specimen failure.

For Specimen N-1, when the load is applied to 77% of its ultimate load, 36.14 ton, vertical cracks began to appear at the top center position, run through the mortar joints and some layer of bricks. The main crack is 42.5 cm long and 0.30 mm wide. With the load continued to increase, previous vertical cracks gradually opened and developed downwards and new vertical cracks were initiated. At the load of 45 tons, crack appeared throughout the first horizontal mortar joint, which has the distance of one

layer from the top edge of the wall. It is about 120 cm long and 1.6 mm wide. At the same time, cracks opened throughout the vertical mortar joints at the side face, 17cm long from the top edge and 0.1 mm wide on one side face and 34 cm long and 0.7 mm wide on the other side face. At end the wall was fail at the load of 47 ton.

For Specimen N-2, when the load is applied to 58% of its ultimate load, 48.96 ton, vertical cracks began to appear at the top center position, run through the mortar joints and some layer of bricks. The main crack is 17 cm long and 0.20 mm wide. With the load continued to increase, previous vertical cracks gradually opened and new cracks initiated. At the load of 70 tons, crack appeared throughout the first horizontal mortar joint, extend from center of the wall length to about 20 cm. At the ultimate load of 84.27 ton, first appeared horizontal crack developed to both side faces. At the same time, cracks opened throughout the vertical mortar joints at the side face, 74cm long and 1.6 mm wide on one side face and 37 cm long and 0.3mm wide on the other side face.

For Specimen N-3, GFRP sheet was pasted on the full surface. When the load reached 71.42 ton, 48% of the ultimate load, vertical crack appeared on one side face with length of 48.5 cm. At the load of 79.62 ton, vertical cracks also appeared on the other side face with 58 cm long from the top edge. At the same time, some vertical cracks opened on the face of the wall without GFRP sheets. However, no cracks appeared on the face with GFRP sheets until wall failure. Finally, the wall was fail at the load of 148 ton due to cracks on the side face of more than 2mm wide. It is observed that the color of some local parts in GFRP sheets changed, and pop cracking voice can be heard clearly. This can be taken as the peeling-off of GFRP from wall surface. Thanks to the good quality of paste work, only few local peeling-off happened.

For specimen N-4, three strips were pasted on the surface. Its load-displacement response was similar to wall N-3. When the load reached 113 ton, vertical crack appeared at the top center position of the face of the wall without GFRP sheets. At the load of 120 ton, vertical cracks also appeared on the side face with 32 cm long from the top edge. At this load level, 35cm long horizontal crack of emerged through mortar at 18 cm distance from the top edge of the wall. However, no cracks appeared on the face with GFRP sheets until wall failure. Finally, the wall was fail at the load of 125 ton due to cracks on the side face of more than 2mm wide.

Discussion of Test Results

The load-deformation responses of four walls are shown in Fig.5 and Fig.6. All of four specimen walls show linear behaviors in both vertical and lateral direction under axial in-plane vertical load. Ignoring the unordinary behavior of wall N-1 due to weak mortar joints at the first top layer, the elastic properties of un-strengthened wall N-2 and strengthened wall N-3 and N-4 are almost the same. Compared wall N-2, the ultimate compressive strength and peak deformation of specimen N-3 were improved at about 50%. Similarly, the ultimate load of wall N-4 with three GFRP strips also is higher than un-strengthened wall N-2, about 1.5 times.

Fig.7 shows the strain developments in vertical and transverse directions on the masonry surface. In vertical direction, they are compressive strain due to the axial vertical load. In transverse direction, they are tensile strain due to the horizontal tensile force in the perpendicular direction of loading. It can be seen from the diagram that, load-strain developments of reference wall N-2 and strengthened wall N-3 and N-4 are the same, which indicates that constraints effect of GFRP sheets didn't play in vertical direction. In transverse direction, the axial vertical compressive stress suffered by specimen wall was smaller in the initial loading stage, and the corresponding transverse stain was very small. So it can be seen that transverse strain in un-strengthened wall N-2 and strengthened wall N-3 and N-4 are almost the same until load of 30 ton, which means that the constraints effect of GFRP still didn't played. With the increase of load, transverse strain began increased rapidly with the appearance of initial cracks. However, Fig.7 shows clearly that increasing of transverse strain in GFRP strengthened wall N-3 and N-4 are obviously slower than that in un-strengthened wall N-2. It demonstrates that most of transverse tensile force was resisted by GFRP sheets. Tensile force subjected by masonry wall

was reduced obviously. So the widths of cracks were reduced and even the emergences of cracks were avoided.

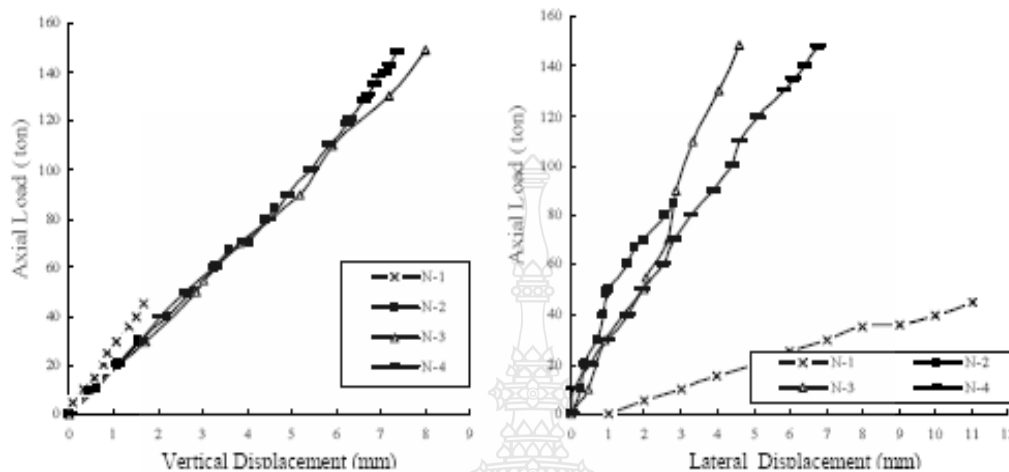


Figure 5: Load-vertical deformation responses of specimens Figure 6: Load-lateral deformation responses of specimens

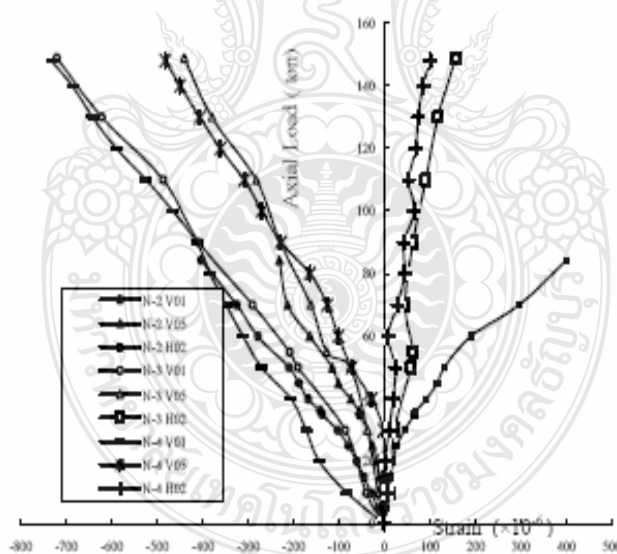


Figure 7: Strain developments on the masonry surface of specimens

Conclusions

Historic masonry walls in Thailand are particular due to their special English bond and big thickness. Through test it can be observed that the crack and failure modes of them under axial vertical loading are different from that of some historic masonry walls in other districts described in published research reports. More experimental tests and theoretical study are needed about their mechanical behaviors.

The compressive strength of the historic masonry wall was obviously improved by 50 percent after retrofitted with GFRP sheets. The constrain role of GFRP sheets delay or even prevent the emergence of cracks.

Different retrofitting schemes have little effect on the compressive strength of the historic masonry wall. Considering the economical and labor reasons, it is more practical to strengthened historic masonry walls with GFRP stripes instead of full face GFRP sheets.

Further research is needed about the relationship between material properties and the retrofitting effects of historic masonry wall.

Acknowledgements

The author wishes to acknowledge Dr. Suddchai Pansuwan, and Dr. Manoch for their advices. The author also acknowledges Italian-Thai Industrial Complex, Saraburi, for their efforts during experimental program.

References

- [1] Amir, F, Daniel, M, Mervyn, K, and Sami, R. (2002). "In-plane testing of damaged masonry wall repaired with FRP." *Advanced Composites Letters*, 11(6), 275-281.
- [2] Hernan, S M, Pablo, A, and Carl L. (2006). "Experimental Response of Masonry Walls Externally Reinforced With Carbon Fiber Fabrics," in *Proceedings of the 8th U.S. National on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, 263-267.
- [3] L. Binda, L. Cantini, F. Fernandes, A. Saisi, C. Tedeschi, and Zanzi L (2004), "Diagnostic investigation of the historical masonry structures of a castle by the complementary use of NON destructive techniques," in *13th International Brick and Block Masonry Conference Amsterdam*, July 4-7, 126-130.
- [4] Musiler, D (2002). "Repair and strengthening of masonry walls with Fiber Reinforced Polymers." *Master's of Civil Engineering project*, North Carolina State University.
- [5] Nigel, G, Shrive, Mark, J, Masis, and Shelley, L Lissel(2001). "Strengthening and rehabilitation of masonry using fibre reinforced polymers." *Historical Constructions*, 1047-1056.
- [6] Suddichai P (2000). "*Structural modeling of historic masonry monuments: the Ayutthaya world heritage case.*" Master thesis, Departement of Civil Engineering, Kasetsart University, Thailand.
- [7] Thanasis, C, Triantafillou, Michael, N F (1997). "Strengthening of historic masonry structures with composite materials." *Materials and Structures*, 30, 486-496.

Structural Analysis of Historic Constructions

doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134

Behaviors of Historic Masonry Walls Retrofitted with GFRP under Axial Load

doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.959



Advanced Materials Research Vols. 133-134 (2010) pp 965-970
 Online available since 2010/Oct/19 at www.scientific.net
 © (2010) Trans Tech Publications, Switzerland
 doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.965

Compressive Strengthening of Damaged Historic Masonry Walls Repaired with GFRP

JING Meng^{1,a}, RAONGJANT Werasak^{1,b} and KERDMONGKON Ratchaneewan^{1,c}

¹School of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology, Thanyaburi, Thailand

^a jingmeng72@hotmail.com , ^b werasaky@yahoo.com , ^c rnk_july@hotmail.com

Abstract The purpose of this research is to determine the mechanical properties of damaged historic masonry walls retrofitted with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) under axial load through experimental method. Five masonry wall specimens were tested under axial load acted at the top surface. One wall specimen was served as reference without retrofitting. Two walls were retrofitted with GFRP before damage. Other two walls were repaired using epoxy injection and GFRP sheets after predefined damage. The results show that the bearing capacity of historic masonry walls was completely restored and even exceeded the original capacity.

Keywords: Historic masonry wall, repair, retrofit, glass fiber reinforced polymer, axial load

Introduction

In Thailand, many historic buildings have been designated by UNESCO as a World Heritage Site due to their cultural value in Buddhism. Most of them were made of bricks. Earthquakes, soil settlements, strength degradation of materials due to wind and weather are high risk factors for the architectural heritage. Time shows that many historical constructions have collapsed. In recent years, Bureau of Archeology and Museums in Thailand has paid more attention on restoration of these historic structures. Some traditional retrofit methods were ever used, such as repair with external layer of reinforced concrete or cement paste, external un-bond steel wire. However, there was report after report of failure after restorations (Suddchai 2000, Kriangsak 1996). This research work conducted with aiming of finding a new retrofitting method based on experimental and theoretical investigations.

In recent years, many researches have shown that using fiber reinforced polymers (FRP) is a feasible solution to increase strength and ductility of masonry walls (Hernan et al. 2006, Amir Fam 2002, L Binda 2004). This is due to the well-known advantages of FRP composites including good resistance, high strength and ease for site handling due to their light weight. However, most of the researches have focus on strengthening of undamaged masonry walls (Triantafillou 1998, Liu Jifu 2007, Miha, et al. 2009).

The objective of this study is to examine the performance of a severely damaged and repaired historic masonry walls using GFRP sheets, applied on one side of the walls. This experiment is more practical for repair of existing historic masonry walls which are normally damaged before repair.

Design of Test Specimens

Five wall specimens were constructed in the stretcher as English bond with a mortar joint of 10 mm thickness. The nominal dimensions of these walls are 1200 mm height, 1500 mm length, and 630 mm width (Fig.1)

Material's Properties The test walls are representative of a typical un-reinforced historic masonry wall built 300 to 400 years ago at Ban Lum Plee, Ayutthaya, Thailand. At Ban Lum Plee, a great number of fallen bricks of historic buildings were collected to test their material properties (Suddichai 2000). So the bricks were selected such that test specimens would reflect structural characteristics of an ancient masonry wall. The brick unit is 300×150×50 mm, with compressive strength of 4 MPa and

elastic modulus of 3.103 GPa. The ancient cement mortar was specially prepared according to original method which involved soaking raw lime in water for at least 60 days before mixing it with white cement and coarse sand at 1:2:9 ratio. The mortar has compressive strength of 1.06 MPa and elastic modulus of 1.406 GPa.

GFRP sheets and epoxy resin were come from Thai company. Nominal tensile strength of it is 1,700 MPa and elastic modulus of 72 GPa. The epoxy resin has tensile strength of 55Mpa and elastic modulus 3.3 Gpa.



Figure 1: Sizes of five specimens

Repairing Method and Retrofitting schemes Specimen MD-1 was un-reinforced as reference wall. Other four specimens were retrofitted in different modes before or after defined damaged (shown in Fig.2). Specimen MD-2 was fully reinforced with GFRP sheets on only one face of the wall before loading. Specimen MD-3 was reinforced with three GFRP stripes of 20cm width at spacing of 35cm on center on only one face of the wall before loading.

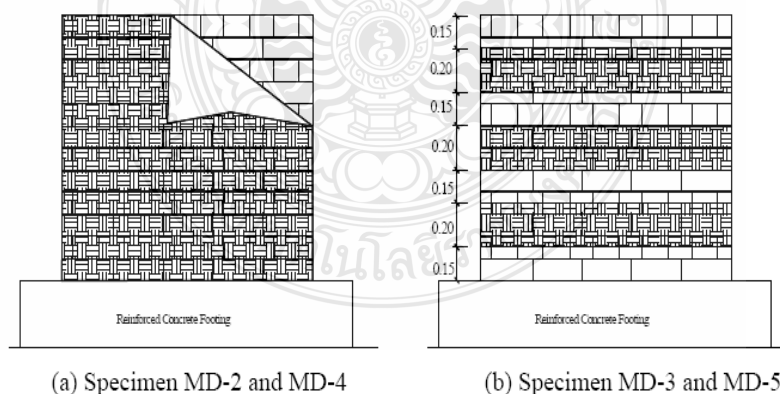


Figure 2: Retrofitting schemes of specimens

For specimen MD-4 and MD-5, at first step they were subjected to vertical axial load applied on the top surface until its ultimate compressive strength of 85 ton and 45 ton, respectively. Then GFRP repair scheme was applied as following. All loose particles were removed and the wall was readjusted to vertical position. The missing parts of the bricks as well as the mortar joints were patched with new mortar after being wetted and allowed to dry. All cracks were patched using epoxy. Quick-setting hydro cement, dried with a heat gun, was used to stop epoxy leaks from the surface. Later, the cement and epoxy patches were removed from the surface using hammers and grinder. After these processes, the cracks were closed tightly by the epoxy grout. Then, specimen MD-4 and MD-5 were

strengthened with GFRP sheets in the same modes as specimen MD-2 and MD-3, respectively. The GFRP repair system was left to cure for at least one week.

Test Process and Performance of Test Specimens

The vertical axial load was transferred through steel distribution beam to the top of the wall uniformly and increased gradually until specimen failure. Four LDVT (Linear Variable Differential Transformer) were erected at top surface and mid-height of the wall to control in-plane vertical and out-plane lateral displacements. Six strain gauges were pasted on the face of the brick and the GFRP sheets at mid-height to monitor the strain development, as shown in Fig. 3.



Figure 3: Test set-up and instruments

Un-retrofitted Wall MD-1. When the load of 48.96 ton was applied and the vertical deformation 2.72 mm, cracks began to appear at the vertical mortar joints at the top center of wall length. When the wall was loaded to 60 ton, the main crack is extended to 17 cm long and 0.20 mm wide. The vertical displacement of 3.28 mm was measured. At vertical displacement 4.06 mm, the measured load was 70 ton. Crack appeared in the first horizontal mortar joint from the top, extend from center of the wall length to left and right of about 20 cm. At the ultimate load of 84.27 ton, horizontal crack developed to both side faces. At the same time, cracks up to 1.6 mm wide with 74 cm long and 0.3 mm with 37 cm long respectively throughout the vertical mortar joints at the side face were observed. The vertical displacement is 4.61 mm. The crack pattern of wall MD-1 is shown in Fig. 4 (a).

Retrofitted by Full GFRP before Damaged, Wall MD-2. At the load of 71.42 ton, vertical cracks appeared on one of the side face of the wall and extend about 48.5 cm long from the top. Vertical deformation of 3.90 mm was measured. At the load of 79.62 ton, vertical cracks initiated on the other side face, extend 58 cm long from the top. Some vertical cracks throughout several layer of mortar and bricks appeared only on the face of the wall without GFRP sheets. Vertical displacement was 4.7 mm. Due to the constraints effect of GFRP sheets, no cracks were observed on the face pasted with GFRP until wall failure. With the load increasing, the constraint roles of GFRP sheets delay the emergence of new cracks. Finally, compared with MD-1, the ultimate compressive strength of specimen MD-2 was improved at about 50% to 125 ton. Crack on the side face up to 2 mm was observed and vertical displacement 7.20 mm. The crack pattern is shown in Fig.4 (b).

Retrofitted by Three Strips GFRP before Damaged, Wall MD-3. When the load reached 113 ton, transverse strain began increased rapidly with the appearance of initial vertical and horizontal cracks at top center of the wall. With the load increasing, vertical crack developed downward through may layers, about 80 cm long. At the load of 120 ton, vertical cracks opened on both side face and more horizontal cracks initiated on the wall face. Finally, when compressive load reached its ultimate

value of 125 ton, the width of cracks on both side faces reached 2.00 mm, which denoted the failure of the wall. Nevertheless, on the wall face with GFRP strips, no crack appeared and no peel-off of GFRP is observed (Fig.4 (c)). Compared with MD-1, the ultimate compressive strength was improved 50%.

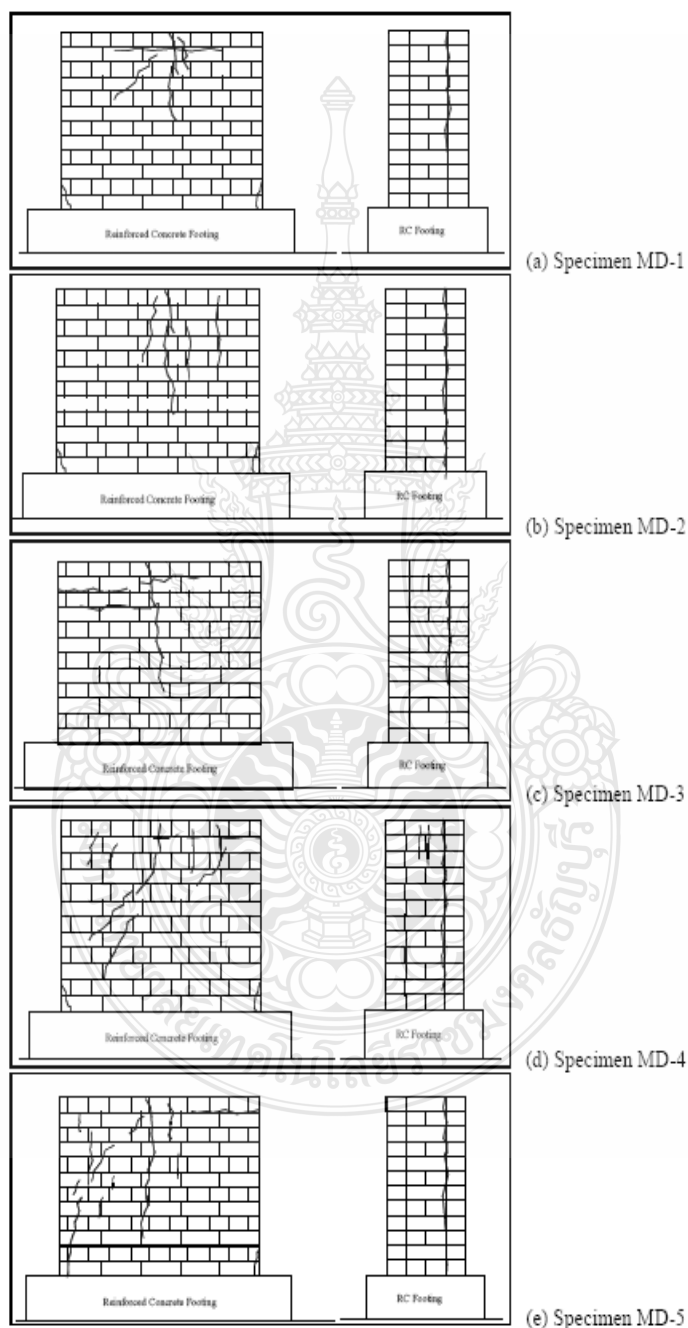


Figure 4: Crack pattern of five walls

Damaged, Repaired and Retrofitted with Full GFRP, MD-4. After repaired with epoxy and pasted with GFRP, specimen MD-4 was retested using the same test setup and the vertical loading was increased gradually until specimen failure. At early loading stages, about 83.5% of its original ultimate strength before damage, some vertical cracks began to open at the top center on the wall face

without GFRP sheets. At the load of 77.05 ton, horizontal crack appeared also on the face in the mortar of top layer. At the load of 77 ton, vertical crack opened on one side face, 52.5 cm long and 0.7 mm wide. It was noticed that, all the cracks appeared at new positions which were different from the damaged cracks before repair. It revealed that a new pattern of cracks developed and that the old cracks did not open. The crack development is shown in Fig.4 (d). It was observed that at failure point, the cracks densely covered almost the whole wall face. However, no crack was observed on the face with GFRP sheets. It should also be noted that the compressive strength of the repaired wall even exceeded the strength of MD-1 and MD-2 to 129 ton.

Damaged, Repaired and Retrofitted with Three GFRP Strips, MD-5. Specimen MD-5 was also retested after repaired under vertical loading until failure. When the load reached 60% of original ultimate strength of wall MD-3, initial cracks appeared at top center on the wall face without GFRP strips. Vertical crack on the side face was observed at load of 42 ton and 59.4 ton, respectively. It is same to specimen MD-4 that, a new crack pattern developed. With the increasing of load, more new cracks appeared and the initial cracks opened downward continuously. At the load of 101 ton, cracks emerged on the wall face between top and middle GFRP strips and opened to the bricks under top GFRP strips. When the load reached 124 ton, these cracks developed downward through the middle strips to the top edge of the bottom strips. Finally, when peak load of 125 ton was reached, no crack is observed under bottom GFRP strips and no GFRP sheets peel-off happened (Fig.4 (e)).

Test Data Analysis

The load-vertical displacement responses of five specimen walls are described in Fig.5. The vertical displacements of all five test walls show linear direct proportion with axial loading increasing, which means that GFRP retrofitting don't change the elastic properties of masonry walls. Ultimate displacements of specimen MD-4 and MD-5 are obviously smaller than that of specimen MD-2 and MD-3, which indicates that the stiffness or the elastic modulus of MD-4 and MD-5 were increased due to repairing of epoxy resin.

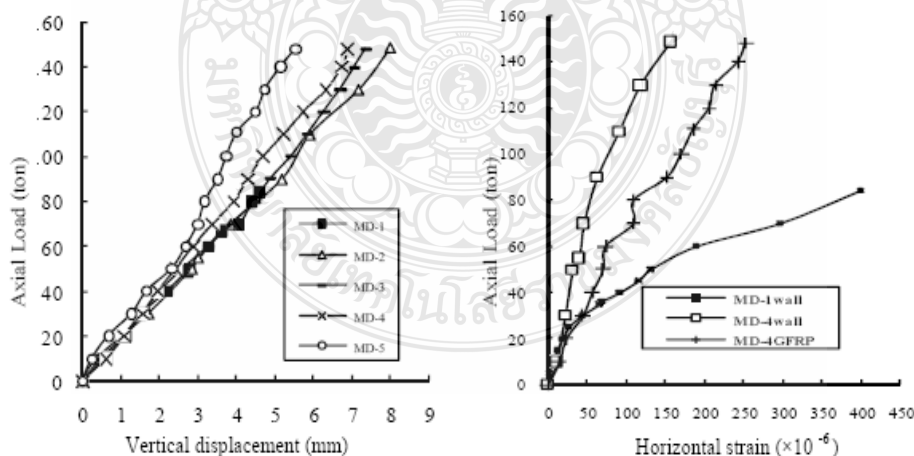


Figure 5: Load-vertical displacement response Figure 6: Strain developments in GFRP sheets and wall surface

Fig. 6 describes the load-horizontal strain responses in wall surface of reference specimen MD-1 and in wall surface and GFRP sheets of repaired specimen MD-4. Due to constraints of GFRP sheets, at the same load level, horizontal strain in wall surface of MD-4 is obviously smaller than that of MD-1. Most of tensile force was resisted by GFRP sheets. After the load reached to about 25% of its ultimate load, tensile strain of GFRP sheets increases quickly and much bigger than that in wall at the same position on the other surface.

Conclusions

Five test walls were subjected to vertical axial until failure. Within the scope of this study, the following preliminary conclusions can be made:

- This test confirms that the compressive strength of the historic masonry wall was obviously improved by 50 percent after retrofitted with GFRP sheets. Due to the constraints of GFRP sheets, the cracks densely covered the wall surface before failure.
- After repaired with GFRP sheets, the bearing capacity of damaged historic masonry wall was completely restored and even exceeded the original capacity. A new crack pattern developed and the old cracks didn't open after repair. Different retrofitting mode effect little on the compressive strength of historic masonry walls.
- This study also confirmed that retrofitted with GFRP after damage or before damage have the similar function. The laboratory test investigation on masonry wall strengthened with GFRP before damaged can present the practical results of repair with GFRP on damaged historic masonry walls on site.
- Further research should be focus on the repair technique at the joint on the side face and the parameters to decide the suited retrofitting schemes for historic masonry walls in different damage level.

Acknowledgements

The author wishes to acknowledge Dr. Suddchai Pansuwan and Dr. Manoch for their advices. The author also acknowledges Italian-Thai Industrial Complex, Saraburi, for their efforts during experimental program.

References

- [1] Amir F, Daniel, M, Mervyn, K, and Sami, R (2002). "In-plane testing of damaged masonry wall repaired with FRP." *Advanced Composites Letters*, 11(6), 276-281.
- [2] Hernan, S M, Pablo, A, and Carl, L (2006). "Experimental Response of Masonry Walls Externally Reinforced With Carbon Fiber Fabrics." in *Proceedings of the 8th U.S. National on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, April 18-22, 2006.
- [3] Kriangsak, C (1996). "Multi purpose building for disaster situations in Thailand." UNESCO Principal Regional Office for Asia and the Pacific, Thailand.
- [4] L Binda, L, Cantini, F, Fernandes, A, Saisi, C, Tedeschi, L, and Zanzi (2004). "Diagnostic investigation of the historical masonry structures of a castle by the complementary use of NON destructive techniques." in *13th International Brick and Block Masonry Conference Amsterdam*, July 4-7, 2004.
- [5] Liu, J, Liu, M, and Song, Y (2007). "Experimental investigation on flexural performance of masonry walls reinforced with GFRP." *Journal of Wuhan University of Technology*, 22(1), 59-62.
- [6] Miha tomazvic, et al. (2009). "Seismic upgrading of old masonry buildings by seismic isolation and GFRP laminates: a shaking table study of reduced scale models." *Bull Earthquake Engineering*, 2009, 7: 293-321.
- [7] Suddchai, P (2000). "Structural modeling of historic masonry monuments: the Ayutthaya world heritage case." Master thesis, Department of Civil Engineering, Kasetsart University, Thailand.
- [8] Triantafillou, T C (1998). "Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2(2), 96-100.

Structural Analysis of Historic Constructions

doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134

Compressive Strengthening of Damaged Historic Masonry Walls Repaired with GFRP

doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.965



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวรัชนีวรรณ เกิดมงคล
วัน เดือน ปีเกิด	20 กรกฎาคม 2525
ที่อยู่	31/84 หมู่ที่ 17 ตำบลบึงคำพร้อย อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ปี พ.ศ. 2548
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2549 - 2551 วิศวกรโยธา พ.ศ. 2551 – ปัจจุบัน วิศวกร (ด้านระบบประกันคุณภาพ) บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน)

