



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

พฤติกรรมของผนังอิฐโบราณเสมือนจริงเสริมด้วย FIBER-REINFORCED POLYMER

ภายใต้แรงกระทำทางด้านบน

THE BEHAVIOR OF ANCIENT MASONRY WALL RETROFITTED USING FIBER-
REINFORCED POLYMER UNDER VERTICAL LOAD

ดร.หมิง จิง

นายอมเรศ บกสุวรรณ

ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์

นายนิติ วิทยาวิโรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี 2553 ภายใต้โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการ มทร.ธัญบุรี

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

พฤติกรรมของผนังอิฐโบราณเสมือนจริงเสริมด้วย FIBER-REINFORCED POLYMER

ภายใต้แรงกระทำทางด้านบน

THE BEHAVIOR OF ANCIENT MASONRY WALL RETROFITTED USING FIBER-
REINFORCED POLYMER UNDER VERTICAL LOAD

โดย

ดร.หมีง จิง⁺

หัวหน้าโครงการ

นายอมเรศ บกสุวรรณ

ผู้ร่วมวิจัย

ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์

ผู้ร่วมวิจัย

นายนิติ วิทยาวิโรจน์

ผู้ร่วมวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี 2553 ภายใต้โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการ มทร.ธัญบุรี

ส่วนที่ 1 รายละเอียดโครงการ

1.ชื่อโครงการวิจัย พฤติกรรมของผนังอิฐโบราณเสมือนจริงเสริมด้วย FIBER-REINFORCED POLYMER ภายใต้แรงกระทำทางด้านบน

THE BEHAVIOR OF ANCIENT MASONRY WALL RETROFITTED USING FIBER-REINFORCED POLYMER UNDER VERTICAL LOAD

2.หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบงานวิจัยและสถานที่ตั้งพร้อมทั้งชื่อหน่วยงาน ลักษณะของการร่วมงานวิจัยกับหน่วยงานอื่น (ถ้ามี)

หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-2549-3410 โทรสาร 0-2549-3412

3.คณะผู้วิจัย บทบาทของนักวิจัยแต่ละคนในการทำวิจัยและสัดส่วนที่ทำการวิจัย (%)

หัวหน้าโครงการ (วางแผนงาน, ควบคุมงานวิจัย, วิเคราะห์ และสรุปผล)

ดร.หมีง จิ่ง

สัดส่วนที่ทำวิจัย 65 %

ผู้ร่วมงานวิจัย (ดำเนินงานวิจัย, วิเคราะห์ผล และถ่ายทอดเทคโนโลยี)

นายอมเรศ บกสุวรรณ

สัดส่วนที่ทำวิจัย 15 %

ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์

สัดส่วนที่ทำวิจัย 10 %

นายนิติ วิทยาวิโรจน์

สัดส่วนที่ทำวิจัย 10 %

4.ประเภทของการวิจัย การวิจัยประยุกต์

5.สาขาวิชาการและกลุ่มวิชาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

กลุ่มวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีพื้นฐานทางวิศวกรรมศาสตร์

ส่วนที่ 2 เนื้อหาโครงการ

บทคัดย่อ

โบราณสถานในประเทศไทยเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีอารยธรรมมาช้านาน มีประวัติศาสตร์ และเป็นสิ่งสำคัญในการบ่งบอกถึงประเพณี วัฒนธรรม ตลอดจนความรู้ ความชำนาญ ในการใช้เทคโนโลยีในงานก่อสร้าง แต่เนื่องด้วยโบราณสถานมีอายุหลายร้อยปี ทำให้เกิดการชำรุดเสียหาย ต้องมีการบูรณะซ่อมแซม การใช้วัสดุเสริมแรงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบูรณะซ่อมแซม โบราณสถาน เนื่องจากมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานโครงสร้าง แต่การซ่อมแซมนั้น ต้องทำให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเบื้องต้น และพฤติกรรมของวัสดุเสริมแรงที่จะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างนั้นคือแรงกระทำทางด้านบน

การทดสอบครั้งนี้เริ่มจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเบื้องต้น ต่อจากนั้นได้ทำการก่อสร้างผนังอิฐก่อโบราณขนาด ความสูง 1.20 เมตร กว้าง 1.54 เมตร ซึ่งก่ออยู่บนฐานราก คอนกรีตเสริมเหล็กขนาด กว้าง 0.90 เมตร ยาว 2.00 เมตร หนา 0.30 เมตร จำนวน 4 ชุด ทำการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณโดยการให้แรงกระทำทางด้านบน โดยทำการทดสอบผนังเปล่าจำนวน 2 ผนัง และทดสอบผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) แบบเต็มผนังและแบบ 3-stripe ซึ่งผลการทดสอบการเปรียบเทียบพฤติกรรมของผนังอิฐโบราณ ปรากฏว่า ผนังเปล่ามีความสามารถในการรับแรงได้น้อยมาก ผนังเสริม GFRP แบบ 3-stripe รับแรงได้ 148.00 tons ผนังอิฐที่เสริม FRP แบบเต็มผนังมีความสามารถในการรับแรงดีที่สุดเท่ากับ 148.89 tons เมื่อเปรียบเทียบกับผนังทั้งหมด แล้วพบว่าผนังเสริม GFRP มีความสามารถในการรับแรงใกล้เคียงกัน แต่แนะนำให้ใช้วิธีแบบ 3-stripe เนื่องจากความประหยัดและความสะดวกในการติดตั้ง เหมาะสำหรับการใช้งานกับโครงสร้าง

คำสำคัญ เสาไม้แก้ว ผนังอิฐก่อโบราณ แรงกดอัด วัสดุเสริมแรง

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็เนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์จาก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ ทดสอบต่างๆ และงบประมาณจากโครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการของมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ใช้สำหรับเป็นค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัยในโครงการโดย ตลอดจนโครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ต่างๆอย่างมากมายหลายด้าน ทำให้คณะผู้จัดทำสามารถนำความรู้เหล่านั้นมาใช้ประโยชน์ในการ ดำเนินงานวิจัย

คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป โดยขอยกส่วนดีของโครงการนี้ทั้งหมด ให้แก่ผู้ที่มีพระคุณทุกท่านที่ช่วยส่งเสริมให้งานวิจัยนี้ สำเร็จขึ้นมาได้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 ความหมายของวัสดุก่อ	7
2.3 ขนาดและคุณลักษณะของอิฐก่อ	8
2.4 ส่วนผสมและวิธีทำอิฐก่อ	12
2.5 คุณสมบัติของมอร์ตาร์	14
2.6 รอยต่อของผนังอิฐก่อ	15
2.7 รูปแบบการเรียงอิฐ	16
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการรับแรงอัดของวัสดุก่อ	17
2.9 อิฐที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน	18
2.10 มอร์ตาร์ที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน	21
2.11 การเสื่อมสภาพของมอร์ตาร์	22
2.12 วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Polymer Composite หรือ FRP Composite)	23
2.13 ชนิดของเส้นใย (Fiber Reinforcement Type)	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14 ลักษณะหรือรูปทั่วไปของเส้นใย (Fiber Reinforcement Form)	26
2.15 เรซิน (Resin)	26
2.16 การติดตั้ง Fiber-Reinforce Polymer (FRP)	27
2.17 การออกแบบและข้อกำหนดรายละเอียด FRP	29
2.18 ข้อควรระวังในการออกแบบติดตั้ง Fiber-Reinforce Polymer (FRP)	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	32
3.1 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอิฐโบราณตัวอย่าง	32
3.2 ทดสอบคุณสมบัติทางกลของอิฐโบราณตัวอย่าง	37
3.3 การทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ	39
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	46
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ	46
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล	47
4.3 ผลการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ	48
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	62
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุป	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม	66
ภาคผนวก ก	68
ตารางผลการทดสอบอิฐโบราณ	68
ภาคผนวก ข	78
รูปแสดงอุปกรณ์และการทดสอบ	78

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ขนาดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้และขีดจำกัดในการทดสอบ	8
2.2	แรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	9
2.3	กำลังอัดของวัสดุก่อคิณเนื้อที่รวมสำหรับวัสดุก่อชนิดก้อนตัน	10
2.4	หน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงที่เกิดจากการตัดสำหรับงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก	11
2.5	ข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างอิฐโบราณ	18
2.6	สรุปค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของอิฐโบราณจากการทดสอบ	20
2.7	คุณสมบัติของอิฐโบราณแยกตามกลุ่มอายุ	18
3.1	คุณสมบัติของวัสดุ GFRP ที่ใช้ในการทดสอบ	40



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รอยต่อของผนังก่ออิฐ	15
2.2	รูปแบบการเรียงอิฐ	16
2.3	ลักษณะเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber)	24
2.4	เส้นใยเคฟลาร์ (kevlar fiber)	25
2.5	เส้นใยแก้ว (glass fiber)	25
2.6	Stress – Strain เส้นใย (Fiber Reinforcement)	25
2.7	ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยแบบ Unidirectional (0°), Bidirectional ($0^{\circ}+90^{\circ}$), Bidirectional (45°)	26
2.8	การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP) อย่างมีประสิทธิภาพ	28
2.9	การติดตั้งโดยเส้นใย (Fiber Reinforcement) อยู่ด้านล่าง เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังลดลง	28
2.10	ฟองอากาศในเรซินเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังลดลง	29
3.1	ผนังอิฐก่อโบราณและตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge	42
3.2	ตำแหน่งการติดตั้ง LVDT (Front View)	43
3.3	ตำแหน่งการติดตั้ง LVDT (Side View)	43
3.4	ลักษณะการติดตั้ง Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) แบบ 3-stripe	44
3.5	ลักษณะการติดตั้ง Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) แบบเต็มผนัง	45
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Vertical Displacement	48
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Lateral Displacement	49
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Vertical Strain 1	50
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Vertical Strain 3	51
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Vertical Strain 5	52
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Lateral Strain 2	53
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Lateral Strain 4	54
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Lateral Strain 6	55
4.9	ตัวอย่างการ Crack ของผนังเปล่า 1	56
4.10	การ Crack ของผนังเปล่า 1 (Front View)	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	การ Crack ของผนังเปล่า 1 (Side View)	57
4.12	ตัวอย่างการ Crack ของผนังเปล่า 2	57
4.13	การ Crack ของผนังเปล่า 2 (Front View)	58
4.14	การ Crack ของผนังเปล่า 2 (Side View)	58
4.15	ตัวอย่างการ Crack ของผนังเสริม GFRP แบบ (3-stripe)	59
4.16	การ Crack ของผนังเสริม GFRP แบบ 3-stripe (Front View)	59
4.17	การ Crack ของผนังเสริม GFRP แบบ 3-stripe (Side View)	60
4.18	ตัวอย่างการ Crack ของผนังเสริม GFRP แบบเต็มผนัง	60
4.19	การ Crack ของผนังเสริม GFRP แบบเต็มผนัง (Front View)	61
4.20	การ Crack ของผนังเสริม GFRP แบบเต็มผนัง (Side View)	61



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

W_d	น้ำหนักของอิฐตัวอย่างที่แห้ง
W_s	น้ำหนักของอิฐตัวอย่างหลังแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
W_b	น้ำหนักของอิฐตัวอย่างที่อิ่มตัวจากการต้ม
X	น้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึมบนพื้นที่ 193.55 ตารางเซนติเมตรของอิฐตัวอย่าง
W	น้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึมจริงของตัวอย่างทดสอบ (g)
L	ความยาวของอิฐตัวอย่าง (cm)
B	ความกว้างของอิฐตัวอย่าง (cm)
b	ความกว้างโดยเฉลี่ยของอิฐตัวอย่าง (mm)
d	ความกว้างโดยเฉลี่ยของอิฐตัวอย่าง (mm)
S	โมดูลัสแตกร้าวของอิฐตัวอย่าง
f_{br}	กำลังอัดประลัยของอิฐตัวอย่าง
F	แรงกระทำสูงสุด
A	พื้นที่เฉลี่ยของอิฐตัวอย่างที่รองรับแรงกดอัด



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โบราณสถานในประเทศไทยเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีอารยธรรมมาช้านาน และเป็นสิ่งสำคัญในการบ่งบอกถึงประเพณี วัฒนธรรม ตลอดจนความรู้ ความชำนาญ ในการใช้เทคโนโลยีในงานก่อสร้างในแต่ละยุคได้เป็นอย่างดี

โบราณสถานในสมัยก่อนส่วนใหญ่จะใช้อิฐเป็นวัสดุก่อสร้างหลัก ซึ่งอิฐทำมาจาก ดินเหนียว และวัสดุอื่นๆ เช่น ทราย นำมาขึ้นรูปและผ่านกระบวนการเผา ทำให้อิฐมีความแข็งแรง ทนทานพอที่จะใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างโบราณสถานได้ ด้วยลักษณะของ โครงสร้างโบราณสถานเป็น โครงสร้างผนังอิฐก่อ และมีอายุหลายร้อยปี จึงเกิดการเสื่อมสภาพ ชำรุดเสียหายและอาจนำไปสู่การ วิกฤติได้ ดังนั้นการบูรณะซ่อมแซมจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อคงสภาพของโบราณสถานเอาไว้

การบูรณะซ่อมแซมจำเป็นต้องอาศัยความรู้ทางวิศวกรรม ซึ่งในปัจจุบันสามารถทำได้หลายวิธี หนึ่งในนั้นคือการใช้วัสดุเสริมแรง Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) ซึ่งมีคุณสมบัติ เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ทนทาน มีความยืดหยุ่น ทนทานต่อ สภาพอากาศ การผุกร่อนต่อฤทธิ์ สารเคมี กรด ด่างได้ดี ไม่เป็นสนิม อายุการใช้งานยาวนาน และโดยเฉพาะคุณสมบัติเด่นที่มีความแข็งแรงสามารถทนแรงดึงได้สูง วัสดุ GFRP มีลักษณะเป็นแผ่นสามารถใช้ได้ในลักษณะ งานดังนี้

1.1.1 ซ่อมแซมเพื่อลดขนาดรอยแตกร้าว (crack size) ซึ่งอาจจะก่อผลเสียหายให้กับ โครงสร้าง หรือทำให้โครงสร้างกลับคืนสู่สภาพเดิม

1.1.2 ประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างใหม่เพื่อเสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง

ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุ GFRP ข้างต้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโบราณสถานได้จึงต้องมีการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของผนังอิฐก่อโบราณ โดยการเสริม Glass Fiber-Reinforced Polymer (FRP) ให้มีความสามารถในการรับแรง ซึ่งจะเป็นข้อมูลในการพัฒนาเทคโนโลยีด้านงานก่อสร้างที่สำคัญและเป็นทางเลือกหนึ่งในการบูรณะซ่อมแซม โบราณสถานให้มีความมั่นคงแข็งแรง หรือในงานที่จะต้องมีการก่อสร้างขึ้นมาใหม่เพื่อเพิ่มเติมจากของเก่าที่มีอยู่ให้สมบูรณ์

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อทดสอบหาคุณสมบัติของอิฐโบราณ ที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณ

1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณแบบ Full scale test ภายใต้แรงกระทำทางด้านบน

1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณ แบบ Full scale test เสริมด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านบน

1.2.4 เปรียบเทียบพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณแบบ Full scale test ใน 2 กรณี ได้แก่

1) เปรียบเทียบพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณแบบ Full scale test ภายใต้แรงกระทำทางด้านบน ในลักษณะผนังเปล่านั้นกับผนังที่เสริม Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP)

2) เปรียบเทียบพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณ แบบ Full scale test เสริมด้วย Glass Fiber-Reinforce Polymer (GFRP) ในลักษณะการเสริม GFRP แบบเต็มผนังกับแบบ 3-stripe

1.3 ขอบเขต

1.3.1 ทดสอบหาคุณสมบัติของอิฐโบราณตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C67

1) ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่าง จากแหล่งทำอิฐปัจจุบัน บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา [1], [2] โดยวิธีการดังต่อไปนี้

- ทดสอบการวัดขนาด (Measurement of size)
- ทดสอบการบิดเบี้ยว (Twistedding test)
- ทดสอบหาน้ำหนัก (Test seek weight division)
- ทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)
- ทดสอบการดูดซึมน้ำเริ่มต้น (Initial rate of absorption test)

2) ทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่างจากแหล่งทำอิฐปัจจุบัน บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา [1], [2] โดยวิธีการดังต่อไปนี้

- ทดสอบโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture test or flexural test)
- ทดสอบกำลังต้านแรงอัด (Compressive strength test)

1.3.2 ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ขนาด กว้าง 1.54 เมตร สูง 1.20 เมตร โดยมีแรงกระทำทางด้านบน

1.3.3 วิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงของผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านบน โดยมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

1) ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) เต็มผนัง

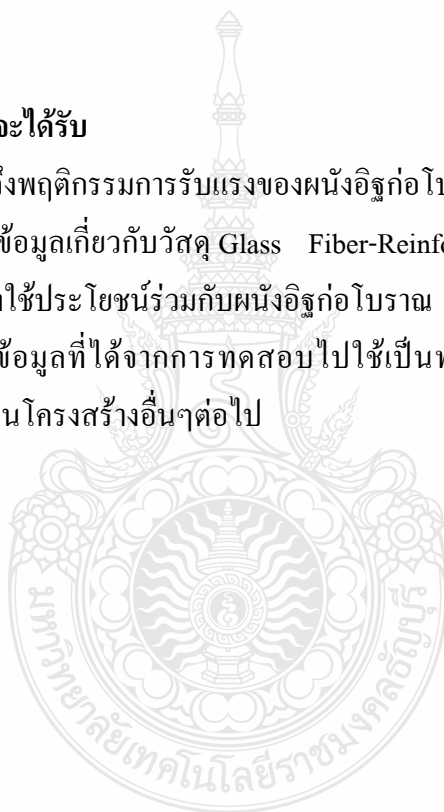
2) ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) บางส่วน (3-stripe)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการรับแรงของผนังอิฐก่อโบราณ

1.4.2 ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุ Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) และความสามารถในการนำมาใช้ประโยชน์ร่วมกับผนังอิฐก่อโบราณ

1.4.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปใช้เป็นทางเลือกในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานหรือใช้ในงานโครงสร้างอื่นๆต่อไป



บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทำวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของผนังอิฐก่อโบราณแบบ Full-scale ใน 2 กรณี อันได้แก่ พฤติกรรมการรับแรงของผนังอิฐก่อโบราณแบบผนังเปล้า และแบบเสริมวัสดุ Glass Fiber Reinforce Polymer (GFRP) โดยให้แรงกระทำทางด้านบน แล้วเปรียบเทียบพฤติกรรมของผนังทั้ง 2 กรณีเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการบูรณะโบราณสถานต่อไปในอนาคต

การวิจัยนี้อิฐโบราณที่นำมาทดสอบ เป็นอิฐใหม่สำหรับการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน ที่มีการผลิตในปัจจุบันที่ ตำบลลุมพินี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแนวความคิด ทฤษฎี วรรณกรรมหรือผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อาานนท์ (2550) การเสริมโครงสร้างภายนอกด้วยการติดหรือรัดด้วยวัสดุเสริมกำลัง เช่น แผ่นไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลัง วิธีนี้ไม่ทำให้น้ำหนักเดิมเพิ่มขึ้นและไม่ต้องยุ่งยากซับซ้อน ไม่ทำให้รูปร่างของโครงสร้างเปลี่ยนไปจากเดิมและเพิ่มความยืดหยุ่นของโครงสร้างได้ด้วย วัสดุไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลังประกอบด้วย ไฟเบอร์ซึ่งแทรกอยู่ในโพลีเมอร์เมทริกซ์จะแสดงคุณสมบัติหลายอย่าง ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเสริมกำลังให้กับวัสดุโครงสร้างได้เป็นอย่างดี วัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังจะสามารถรับแรงดึงได้สูงในทิศทางการเรียงตัวของไฟเบอร์ อย่างไรก็ตาม วัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังจะไม่แสดงจุดคราก แต่จะแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นจนกระทั่งฉีกขาด การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังต่อแรงดึงในแนวแกนจะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นกับความเครียดในแนวแกน ส่วนการตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังต่อแรงอัดในแนวแกนจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของปริมาตรของไฟเบอร์ การวิบัติของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังภายใต้แรงอัดจะเกิดขึ้นเมื่อไฟเบอร์ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปทางด้านข้างซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า การโก่งของไฟเบอร์ การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังต่อแรงที่ตั้งฉากกับแรงดึงนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไฟเบอร์และเมทริกซ์ แรงกระทำระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์และกำลังของพันธะระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์ โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการต้านทานแรงที่ตั้งฉากกับแรงดึงนั้นจะมีค่าน้อย ส่วนความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังนั้นไม่สามารถวัดได้โดยตรง โดยส่วนมาก

แล้วการวิบัติด้วยแรงเฉือนของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเมทริกซ์เกิดการเคลื่อนที่ขนานกับไฟเบอร์

สุพจน์ และคณะ(2550) การแก้ปัญหาการชำรุดของโครงสร้างกระทำได้โดยการนำแผ่นเส้นใยคาร์บอน ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถต้านทานแรงดึงได้สูง มาช่วยเสริมในลักษณะแผ่นหรือแถบและฉาบทับด้วยอีพอกซี เพื่อช่วยรับแรงดึงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ชำรุด การเสริมแถบเส้นใยคาร์บอน (CFEC) บนโครงสร้างมักจะใช้เป็นแถบผืนใหญ่ปูได้ท้องพื้นหรือห่อหุ้มท้องคาน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเสริมเหล็กในโครงสร้างคอนกรีต เหล็กหน้าตัดเล็กให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวและการกระจายแรงได้ดีกว่าการใช้เหล็กหน้าตัดใหญ่ที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน การเสริมเส้นใยคาร์บอนแบบแผ่นจะสูญเสียเส้นใยคาร์บอนส่วนหนึ่ง จากการซ้อนทับกันตรงบริเวณจุดไขว้กันของแถบเส้นใย ดังนั้นถ้าหากนำเส้นใยคาร์บอนมาฉกทอในลักษณะของตาข่าย (CMEC) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้เส้นใยคาร์บอนได้มากกว่า การเสริมแผ่นคาร์บอนแบบแถบ โดยเฉพาะการเสริมตาข่ายเส้นใยคาร์บอนในแผ่นพื้นจะมีประสิทธิภาพในการรับแรง มากกว่าการเสริมตาข่ายเส้นใยคาร์บอนแบบปะได้ท้องพื้นและยังมีราคาถูกลงกว่า โดยระยะความกว้างช่องตาข่ายไม่มีผลสำหรับการเสริมตาข่ายแบบปะได้ท้องพื้น แต่ระยะช่องตาข่ายที่ดีจะช่วยให้การรับแรงของการเสริมตาข่ายเส้นใยแบบเสริมในพื้นที่กว้างช่องตาข่ายที่ห่าง

ประวีณ (2550) พฤติกรรมรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาภายใต้แรงดัดสลับทิศ (Reversed Cyclic Loading) จะพบว่ากำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตลดลง เมื่อมีการโก่งตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าวและหลุดกะเทาะออก การนำเส้นใยเส้นขนาดเล็กมาใช้ผสมในคอนกรีต เรียกว่า FRC (Fiber Reinforced Concrete) เพื่อช่วยปรับปรุงพฤติกรรมภายใต้แรงดึงของคอนกรีต และลดปริมาณการใช้เหล็กเสริมสำหรับควบคุมการหดตัวและการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีต โดยทั่วไปเส้นใยที่ใช้อาจทำด้วยเหล็กกล้าหรือโพลีเมอร์ และจะใช้ในปริมาณระหว่าง 0.05-0.5 % โดยปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งการใช้งานในลักษณะนี้ ไม่ช่วยให้กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่จะช่วยควบคุมไม่ให้รอยร้าวขยายตัวกว้างขึ้น วัสดุพิเศษของ FRC ที่เรียกว่า HPRCC (High Performance Fiber Reinforced Cement Composites) โดยหลังจากที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุมีค่าถึงกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ มอร์ตาร์ก็จะเกิดการแตกร้าว แรงดึงที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังเส้นใยที่เสริมอยู่ เมื่อแรงดึงเพิ่มขึ้นรอยร้าวที่เกิดขึ้นตอนแรกจะยังไม่ขยายตัวออก แต่จะเกิดรอยร้าวใหม่เพิ่มขึ้นมากมาย (Multiple Cracking) พร้อมกับกำลังรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพฤติกรรมช่วงนี้คล้ายกับพฤติกรรมการแข็งตัวเพิ่ม (Strain Hardening) ของเหล็ก จึงเรียกช่วงนี้ว่า PseudoStrain-Hardening กำลังรับแรงดึงจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดๆหนึ่งเกิดการยึด เนื่องจากแรงดึงจะไปรวมตัวอยู่ที่รอยร้าวหนึ่ง (Localization) และ

จะนำไปสู่การวิบัติของตัวอย่าง พฤติกรรมของวัสดุ HSPFRCC สามารถรับแรงดึงได้เกินกว่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ และสามารถคงกำลังรับแรงดึงไว้ที่ความเครียดสูงกว่าความเครียดที่จุดแตกร้าวมาก นั่นคือ HSPFRCC มีความเหนียว(Ductility) สูงกว่าคอนกรีต มอร์ตาร์ หรือ FRC มาก จากพฤติกรรมการรับแรงดึงของ HSPFRCC ทำให้สามารถนำHSPFRCC มาใช้ในการรับแรงดึงในชิ้นส่วนโครงสร้างได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่ต้องรับแรงสลับทิศ เช่น แรงที่เกิดจากแผ่นดินไหว เนื่องจากโครงสร้างชนิดนี้ต้องสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้มากโดยไม่เกิดการวิบัติ

นิพนธ์ (2550) โพลีเมอร์เสริมใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer: CFRP) เป็นวัสดุที่มีกำลังดึงสูงมาก ไม่เกิดสนิม น้ำหนักเบา ทำให้มีการนำมาใช้เสริมกำลังโครงสร้างแพร่หลายมากขึ้น เช่น สะพาน อาคาร พื้นที่จอดรถ อย่างไรก็ตาม วัสดุนี้มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนวิบัติ ทำให้มีความเหนียวน้อย และมีราคาสูงกว่าเหล็กมากเมื่อเทียบตามน้ำหนักวัสดุ แต่ถ้าเทียบราคาต่อกำลังแล้วจะต่างกันน้อยลง นอกจากนั้น มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนไม่เท่ากับคอนกรีต และเมื่อมีอุณหภูมิสูง อาจเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติหรืออาจวิบัติได้ โพลีเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber-reinforced polymers, FRP) ได้กลายมาเป็นตัวเลือกในการใช้แทนเหล็กเส้นที่เสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา เนื่องจากวัสดุ FRP ซึ่งอาจเสริมด้วยเส้นใยชนิดต่าง ๆ เช่น คาร์บอน อารามิด (aramid) และแก้ว ไม่นำกระแสแม่เหล็กและไม่ผุกร่อนเป็นสนิม จึงขจัดปัญหาเรื่องการเหนี่ยวนำกระแสแม่เหล็กไฟฟ้า และการเป็นสนิม และกำลังดึงที่สูงของมันทำให้เหมาะสำหรับรับแรงดึง อย่างไรก็ดี พฤติกรรมทางกลของการเสริมแรงด้วย FRP ต่างจากพฤติกรรมการเสริมเหล็กธรรมดา วัสดุ FRP มีพฤติกรรมแบบ anisotropic คือกำลังของมันขึ้นอยู่กับทิศทางกำลังดึงที่สูงของมันอยู่ในทิศทางของเส้นใยเท่านั้น จึงมีผลต่อกำลังเฉือนและแรงแบบเดือย (dowel action) ของแท่ง FRP และต่อการยึดเหนี่ยว (bond) ของแท่ง FRP ต่อคอนกรีต นอกจากนั้น การออกแบบต้องคำนึงถึงการที่แท่ง FRP ไม่คราก (yield) แต่ยืดหยุ่นจนขาดอย่างฉับพลันโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้าด้วย

หัตถชัย และคณะ (2547) พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ จะทำให้โครงสร้างเหนียวขึ้นและความสามารถในการรับแรงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ และทิศทางของคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ ในกรณีของเสาที่รับแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียว การหุ้มไฟเบอร์เป็นช่วงในแนวตั้งจะไม่มีผลต่อกำลังมากเท่าการหุ้มในแนวราบ เนื่องจากการหุ้มรอบในแนวราบจะโอบรัดคอนกรีต และทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจากการถูกโอบรัด (Confinement) เสาจะมีค่ากำลังรับแรงอัดตามแนวแกนเพิ่มขึ้นประมาณ 14% ของกำลังเดิม ในขณะที่การหุ้มเสาทั้งต้นจะให้กำลังที่เพิ่มขึ้นประมาณ 22-60% ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดเสา หน้าตัดเสาที่มีขนาดใหญ่จะได้รับผลของการโอบ

รัดน้อยกว่าหน้าตัดขนาดเล็ก เนื่องจากเสาขนาดเล็กเมื่อมีการลบมุมเพื่อติดตั้งคาร์บอนไฟเบอร์แล้ว จะมีลักษณะเข้าใกล้เสากลมมากกว่าเสาที่มีขนาดใหญ่จึงทำให้ประสิทธิภาพในการ โอบรัดคอนกรีต มีมากกว่า

สิทธิชัย (2544) พลาสติกเสริมเส้นใย โดยเฉพาะพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ถูกนำมาใช้ในการเสริมกำลังและซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความสะดวกและรวดเร็วในการดำเนินการ ไม่ทำให้รูปร่างของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปมากนัก และมีความคงทนสูง การจัดวางและติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยเข้ากับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับการจัดวางเหล็กเสริมให้กับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากนั้นแล้ว การเสริมกำลังและซ่อมแซมดังกล่าวจะสามารถเพิ่มกำลังให้กับโครงสร้างเป็นอย่างมาก แต่การวิบัติขององค์อาคารที่ถูกเสริมกำลังและซ่อมแซมดังกล่าว จะต้องถูกกำหนดให้มีรูปแบบที่ค่อยเป็นค่อยไปและไม่รุนแรง (gradual and non-catastrophic failure) และจะต้องไม่เกินกำลังที่ยอมให้ อย่างปลอดภัยของ โครงสร้างเดิม เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับชีวิตและทรัพย์สิน

Mirmiran และคณะ (1997) เสนอว่า แผ่นไฟเบอร์คาร์บอนเสริมกำลังสามารถเพิ่มกำลังอัด และความแข็งแรงให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีคุณสมบัติการ ยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อเสาถูกรัดด้วยแผ่นไฟเบอร์

2.2 ความหมายของวัสดุก่อ

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2553) ได้นิยามความหมายของคำไว้ในมาตรฐานสำหรับ อาคารวัสดุก่อไว้ดังนี้

ก้อนวัสดุก่อตัน หมายถึง ก้อนวัสดุก่อซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดในทุกระนาบ ซึ่งขนานกับผิวหน้า ที่รับน้ำหนักตั้งแต่วัดระยะ 75 ของเนื้อที่หน้าตัดรวม ซึ่งวัดในระนาบเดียวกันขึ้นไป

มอร์ตาร์ หมายถึง ส่วนผสมเหลว ๆ ของวัสดุที่เป็นตัวประสานมวลรวมและน้ำ

เกร้าท์ หมายถึง ส่วนผสมของวัสดุที่เป็นเชื้อประสานและมวลรวมซึ่งจัดส่วนปฏิภาคให้มี ความชื้นเหลวพอดีที่จะเทหรือสูบลได้ โดยวัสดุที่เป็นส่วนผสมไม่เกิดการแยกแยะ

งานวัสดุ หมายถึง งานก่อสร้างที่ประกอบด้วยก้อนวัสดุก่อ ซึ่งวางเรียงกันในมอร์ตาร์หรือ เกร้าท์

2.3 ขนาดและคุณลักษณะของอิฐก่อ

2.2.1 ขนาดของอิฐก่อ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2517) ได้กำหนดประเภท ขนาดของอิฐก่อสร้างสามัญ โดยแบ่งประเภทของอิฐก่อสร้างสามัญไว้ 2 ประเภท ดังนี้

ประเภทที่ 1 อิฐขนาดเล็ก (อิฐมอญ) หมายถึง อิฐที่มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมตัน ผิวไม่สู้เรียบ ทำด้วยมือหรือเครื่องจักร เหมาะสำหรับใช้ก่อผนังหรือกำแพงที่ฉาบปูน

ประเภทที่ 2 อิฐขนาดใหญ่ หมายถึง อิฐที่มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมตัน ใหญ่กว่าอิฐมอญ ผิวหน้าเรียบ มีร่องสำหรับยึดปูนก่อทำด้วยเครื่องจักร เหมาะสำหรับก่อผนังหรือกำแพง

ขนาดและความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้สำหรับอิฐประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้และขีดจำกัดในการทดสอบ

หน่วยเป็นมิลลิเมตร [4]

ประเภทที่	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

2.2.2 คุณลักษณะที่ต้องการ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2517) ได้กำหนดคุณลักษณะที่ต้องการของอิฐไว้ ดังนี้

1) ผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จรูปต้องมีขนาดตามตารางที่ 2.1 โดยมีลักษณะและคุณสมบัติอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

- เผาสุกและมีสีสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น
- มีความแข็งแรงทนทานตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2
- มุมทุกมุมควรเป็นมุมฉาก
- รูปร่างและขนาดสม่ำเสมอ
- เนื้อแน่นและไม่มีรอยแตกร้าว

2) คุณสมบัติทางกายภาพ

- แรงอัด (Compressive Strength) ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.2
- การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [4]

ประเภทที่	ยาว × กว้าง × หนา cm	แรงอัดต่ำสุด kg/cm ²	การดูดซึมน้ำสูงสุด ร้อยละของน้ำหนัก อิฐ
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

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้กำหนดคุณภาพของวัสดุไว้ดังนี้

1) หากมิได้ระบุเป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ในงานวัสดุก่อคอนกรีตจะต้องมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม หรือมาตรฐานสากล

2) มอร์ตาร์ และ เกร้าท์

- หากมิได้มีการระบุเป็นอย่างอื่น มอร์ตาร์ และ เกร้าท์ จะต้องมีความแข็งแรงตรงตามมาตรฐานสากลที่เหมาะสม

- ห้ามใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือสารผสมเพิ่มซึ่งมีแคลเซียมคลอไรด์กับมอร์ตาร์ หรือ เกร้าท์ ซึ่งมีเหล็กเสริม เหล็กปลอก หรือเหล็กยึดอื่น ๆ ฝังอยู่

ในกรณีที่มีได้มีการหาค่ากำลังอัดของวัสดุคอนกรีตโดยวิธีทดสอบล่วงหน้า และ ก่อนวัสดุก่อ มอร์ตาร์ตลอดจนฝีมือการทำงานตรงตามเกณฑ์กำหนดในมาตรฐานแล้ว อาจคิดค่า หน่วยแรงอัดที่ยอมให้โดยเฉลี่ยค่ากำลังอัดของวัสดุก่อทั้งหมดจากค่าตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กำลังอัดของวัสดุก่อคิดเนื้อที่รวมสำหรับวัสดุก่อชนิดก้อนตัน [4]

กำลังอัดของก้อน (kg/cm ²)	กำลังอัดของวัสดุก่อทั้งหมด f'_m (kg/cm 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

หน่วยแรงที่ยอมให้ในงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก

ค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็กจะต้องไม่เกินค่า

ต่อไปนี้

$$\text{หน่วยแรงตามแกน} \quad 0.20 f'_m \quad (2.1)$$

$$\text{หน่วยแรงคัด} \quad 0.30 f'_m \quad (2.2)$$

หากไม่มีผลทดสอบมาแสดงจนเป็นที่พอใจแล้วค่าหน่วยแรงเฉือนและแรงดึงอันเกิดจากการดัดสำหรับงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็กจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดให้ตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 หน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงที่เกิดจากการตัดสำหรับงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก [4]

หน่วยแรงที่ยอมให้	งานก่อสร้างด้วยวัสดุก่อ			
	ชนิดก้อนกลวง		ชนิดก้อนตัน หรือ เกร้าท์	
	มอร์ตาร์ กำลังสูง ^(ก)	มอร์ตาร์ ธรรมดา ^(ข)	มอร์ตาร์ กำลังสูง ^(ก)	มอร์ตาร์ ธรรมดา ^(ข)
หน่วยแรงเฉือน, kg/cm ²	2.4 ^(ง)	1.6 ^(ง)	2.4 ^(ง)	1.6
หน่วยแรงดึงในการตัด ^(ค)				
ตั้งฉากกับรอยต่อทางราบ ^(ข)	1.6 ^(ง)	1.1 ^(ง)	2.7	1.9
ขนานกับรอยต่อทางราบ ^(ค)	3.2 ^(ง)	2.2 ^(ง)	5.5	3.8

(ก) ในกรณีที่ไม่มี การควบคุมงานทางวิศวกรรมหรือสถาปัตยกรรมให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดให้ลดค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ต่าง ๆ ลงครึ่งหนึ่ง

(ข) ทิศทางของหน่วยแรงตั้งฉากกับชั้นรอยต่อราบ ตั้งตั้งในงานวัสดุก่อธรรมดา

(ค) ทิศทางของหน่วยแรงขนานกับรอยต่อทางราบซึ่งจะอยู่ในแนวราบในงานวัสดุก่อสร้างธรรมดาในกรณีที่ก่อวัสดุก่อแบบเรียงตามขวางจะยอมให้เกิดหน่วยแรงดึงในแนวราบในวัสดุก่อไม่ได้

(ง) เนื้อที่สุทธิของชั้นมอร์ตาร์

(ฉ) ในการคำนวณความต้านทานแรงดึง จะต้องถือว่าโมดูลัสหน้าตัดของผนังกลวงมีค่าเท่ากับผลรวมของโมดูลัสหน้าตัดของผนังแต่ละแผง

- (ง) กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ต้องไม่ต่ำกว่า 140 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
- (ข) กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ต้องไม่ต่ำกว่า 50 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

2.4 ส่วนผสมและวิธีทำอิฐก่อ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2517) ได้อธิบายส่วนผสมของอิฐและวิธีทำอิฐ ตามประเภทของอิฐไว้ดังนี้

ประเภทที่ 1 อิฐขนาดเล็ก (อิฐมอญ) วัสดุที่ใช้ในการทำได้แก่ ดินเหนียว หรือดินโคลน และวัสดุอื่น ๆ เช่น แกลบ ทราซ จีเลื้อย อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลาย ๆ อย่างรวมกันแล้วแต่ความเหมาะสม ถ้าเป็นการทำด้วยมือจะใช้ดินเหนียวผสมกับทรายหรือแกลบหรือใช้ดินโคลนผสมกับแกลบย่ำผสมน้ำอัดลงในแบบพิมพ์ไม้ ซึ่งวางอยู่บนลานดินที่เรียบ โดยโรยเอาแกลบบนลานดิน และภายในแบบพิมพ์ เพื่อกันไม่ให้ดินผสมติดแบบพิมพ์ ปาดให้เรียบ ยกแบบพิมพ์ไม้ออกทิ้งไว้กลางลานดินให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา หากเป็นการทำด้วยเครื่องจักรจะใช้ดินเหนียวผสมกับทรายหรือแกลบนำเข้าเครื่อง พ่นน้ำ นวด อัด ริด ออกมาเป็นแท่งยาว ตัดด้วยลวดเป็นแผ่นอิฐ ทิ้งให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา

ประเภทที่ 2 อิฐขนาดใหญ่ วัสดุที่ใช้ในการทำได้แก่ ดินเหนียว และวัสดุอื่น ๆ เช่น ทราย โดยใช้ดินเหนียวผสมกับทราย ย่ำผสมน้ำ อัดลงในแบบไม้ ปาดให้เรียบแล้วยกแบบไม้ออก หรือนำเข้าเครื่อง นวด อัด ริด ออกมาเป็นแท่งยาว ตัดด้วยลวดเป็นก้อนขนาดใหญ่กว่าแผ่นอิฐเล็กน้อย ทิ้งก้อนดินที่เตรียมไว้ให้มีความชื้นพอสมควร นำเข้าเครื่องอัดให้แน่นเป็นก้อนอิฐตามขนาดที่ต้องการ ทิ้งให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2542) ได้อธิบายถึงกรรมวิธีการผลิตอิฐที่ทำด้วยมือไว้ดังนี้

2.4.1 การเลือกดิน

เป็นดินที่ไม่มีเม็ดทรายเจือปนมากเกินไปและไม่เป็นดินเหนียวมากเกินไปถ้าดินมีทรายมากจะทำให้อิฐนั้นร้อนและร่วน และถ้าดินเป็นดินเหนียวมากเกินไป เมื่อนำไปตากแดดจะเกิดการแตกร้าวค่อนข้างสูง

2.4.2 การขุดและการย่ำดิน

ขุดดินและแยกเอาเศษไม้หรือสารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ออกให้หมด จากนั้นทำการผสม

แกลบประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของดินและย่ำดินให้ละเอียดและให้เข้ากันดี ถ้าดินมีลักษณะแห้งจนเกินไปก็ให้เติมน้ำได้ตามสมควร พอที่จะทำการย่ำดินและเทลงในแบบได้สะดวก

การผสมแกลบจะช่วยให้เนื้อดินมีความโปร่งมากขึ้น หลังจากที่แกลบถูกความร้อนเผาไหม้ไปจากเนื้ออิฐแล้ว จะทำให้อิฐมีน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีขึ้น นอกจากนั้นแล้วยังป้องกันไม่ให้อิฐแตกในเวลาตากแดด และป้องกันไม่ให้ดินแม่พิมพ์อีกด้วย

2.4.3 การพิมพ์แบบ

แบบที่ใช้หล่อดินให้เป็นแผ่นอิฐจะเป็นแบบที่ทำด้วยไม้ 4 ด้าน โดยจะมีเฉพาะด้านข้าง (ไม่มีส่วนบนและส่วนล่าง) ไม้ที่ทำแบบเป็นไม้ที่ทนทานต่อน้ำและความชื้น ผิวด้านในใสเรียบขนาดของแบบจะใหญ่กว่าขนาดของอิฐที่ต้องการประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากดินที่ตากแห้งแล้วจะมีขนาดที่เล็กลง ในขั้นตอนนี้ เริ่มต้นทำการจุ่มแบบลงในน้ำ แล้ววางแบบลงบนพื้นราบ จากนั้นนำดินเหนียวที่ผสมได้ที่แล้วเทลงในแบบและทำการอัดดินโดยใช้ไม้ตบดินให้แน่นโดยทั่ว สุดท้ายย่ำปาดดินส่วนเกินออกให้เรียบเสมอไม้แบบและยกแบบออกจากก้อนดิน

2.4.4 การตากแดด

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

2.4.5 การตากแต่งก้อนดิน

เมื่อก้อนดินแห้งสนิท ด้านข้างก้อนดินจะไม่เรียบ ต้องใช้มีดตากแต่งก้อนดินเพื่อให้ได้ก้อนอิฐที่เรียบสม่ำเสมอ ก่อนจะนำเข้าเตาเผาอิฐ

2.4.6 การเผาอิฐ

เมื่อตากแต่งก้อนดินแล้ว นำก้อนดินมาวางเป็นแถว แถวหนึ่งกว้างเท่ากับก้อนดินที่จะทำการเผา โดยเว้นระยะระหว่างแถวให้เท่าๆ กัน เพื่อที่จะใส่แกลบลงในช่องว่างระหว่างแถวได้ง่าย โดยทั่วไปแล้ว ก้อนดินจะมีความกว้างประมาณ 4 เมตร ยาวประมาณ 6 ถึง 7 เมตร และสูงประมาณ 1.6 เมตร เมื่อกองเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำก้อนอิฐที่เผาสุกแล้วมาล้อมกองดินทั้ง 4 ด้าน เพื่อกันความร้อนไม่ให้กระจายออกไปจากกองดินในขณะเผา จากนั้นเทแกลบลงไปให้เต็มทุกช่องว่างระหว่างแถว จากนั้นจุดไฟให้แกลบไหม้ เมื่อแกลบไหม้และยุบลงให้คอยเติมแกลบให้ได้ระดับอยู่

เสมอ เผาอิฐเป็นเวลาประมาณ 15 วัน แล้วรอนอิฐเย็นตัวลง แล้วทำการลำเลียงอิฐไปเข้าโกดังเก็บไว้เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป

2.5 คุณสมบัติของมอร์ตาร์

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2553) ได้กำหนดคุณสมบัติของมอร์ตาร์สำหรับอาคารวัสดุก่อไว้ดังนี้

2.5.1 การวัดปริมาณวัสดุต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง เพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมตามที่กำหนดอยู่ตลอดเวลา ซึ่งอัตราส่วนผสมให้เป็นไปตามมาตรฐานสากลที่กำหนด

2.5.2 มอร์ตาร์ผสมจะต้องคลุกวัสดุผสมต่าง ๆ เข้าด้วยกันในเครื่องผสมที่ใช้เครื่องจักรกลเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 3 นาที ความชื้นเหลวของส่วนผสมจะต้องขึ้นที่สุกเท่าที่จะใช้งานได้

2.5.3 ห้ามนำมอร์ตาร์ซึ่งทิ้งไว้จากการผสมครั้งแรกเริ่มก่อตัว หรือไม่ได้ใช้ภายใน 2.5 ชั่วโมง มาใช้เป็นอันขาด สำหรับมอร์ตาร์ซึ่งกระด้างเนื่องจากน้ำระเหยออกไป ให้ทำการผสมต่อเพื่อรักษาให้อยู่ในสภาพใช้ได้ แต่ทั้งนี้ต้องอยู่ภายในระยะเวลา 2.5 ชั่วโมงดังกล่าว

สำหรับชั้นและรอยต่อมอร์ตาร์ที่ใช้ในก้อนวัสดุต้นให้เรียบโดยยาด้วยมอร์ตาร์เต็มหน้าทั้งรอยต่อทางหัวและทางราบ รอยต่อทางราบและทางตั้งต้องหนาไม่น้อยกว่า 9 มิลลิเมตรนอกจากจะระบุเป็นอย่างอื่น รอยต่อทางตั้งจะต้องอัดให้แน่น สำหรับรอยต่อที่ผิวด้านนอกให้ปาดให้เรียบหลังจากอัดมอร์ตาร์ให้แน่นด้วยเครื่องมือรูปรีหรือกลม รอยต่อที่ผิวด้านในจะปาดมอร์ตาร์ให้เรียบหรือกำหนดให้เป็นอย่างอื่นก็ได้ รอยต่อของวัสดุก่อที่ไม่ฉาบปูนได้ระดับดินจะต้องใช้เกรียงอัดมอร์ตาร์ให้แน่น

Hendry และคณะ (1986) ได้แนะนำมอร์ตาร์สำหรับวัสดุก่อว่าควรประกอบด้วยส่วนผสมของ ซีเมนต์ : ปูนขาว : ทราย ผสมเข้าด้วยกันตามมาตรฐาน BS 5628 สำหรับอิฐที่มีกำลังรับแรงค่อนข้างต่ำ ควรใช้มอร์ตาร์ที่อ่อน โดยมีส่วนผสม 1 : 2 : 9 โดยปริมาตรการกำหนดปริมาณน้ำที่ใช้ผสม ควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสม โดยให้ความแข็งแรงของมอร์ตาร์เพียงพอตามต้องการและเหมาะสมกับการดูดซึมน้ำของอิฐจะทำให้มีประสิทธิภาพของการยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับอิฐต่ำลง นอกจากนี้ปริมาณน้ำยังมีผลกระทบต่อกำลังของมอร์ตาร์ ซึ่งจะส่งผลไปยังความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุก่อด้วย

2.6 รอยต่อของผนังอิฐก่อ

โดยทั่วไปแล้ว รอยต่อที่ใช้ในผนังอิฐก่อสามารถแบ่งได้เป็น 6 แบบ คือ

2.6.1 รอยต่อแบบ Flush joint

เป็นการขานแนวให้เสมอหน้าอิฐ โดยใช้เกรียงปาดเศษปูนที่เกินออกจากผิวหน้ากำแพง

2.6.2 รอยต่อแบบ Weather joint

เป็นการเซาะร่องปูนที่เกิดจากเกรียงกดลงไปตรงส่วนบนสุดของรอยต่อซึ่งจะช่วยระบายน้ำได้อย่างรวดเร็ว

2.6.3 รอยต่อแบบ Concave tooled joint

เป็นการเซาะร่องปูนก่อแบบเว้าโค้งจากการใช้อุปกรณ์ที่มีขอบโค้งมน

2.6.4 รอยต่อแบบ Struck joint

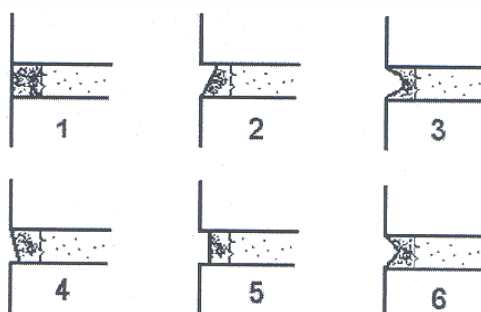
เป็นการเซาะร่องปูนก่อที่เกิดจากเกรียงกดลงไปตรงส่วนล่างสุดของรอยต่อซึ่งทำให้เกิดผิวลาดชันที่มีทิศทางตรงกันข้าม

2.6.5 รอยต่อแบบ Raked joint

เป็นการเซาะร่องปูนที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์ที่มีความเรียบเสมอกันโดยการเซาะลงไปในขณะที่ปูนยังไม่แข็งตัว

2.6.6 รอยต่อแบบ “V” tooled joint

เป็นการเซาะร่องปูนก่อแบบให้มีมุมลึกลงไปเป็นรูปตัววีจากการใช้อุปกรณ์ที่มีขอบสันเป็นรูปตัววี



รูปที่ 2.1 รอยต่อของผนังอิฐก่อ [9]

2.7 รูปแบบการเรียงอิฐ

2.7.1 รูปแบบการเรียงสามารถเรียงได้ 4 แบบ คือ

1) Running bond

เป็นรูปแบบการก่ออิฐที่นิยมมากที่สุดมีลักษณะการก่อแบบสลับหว่างกันในแต่ละชั้นของการก่อ การก่อในลักษณะนี้ความสามารถในการรับแรงจะดีมาก

2) Stack bond

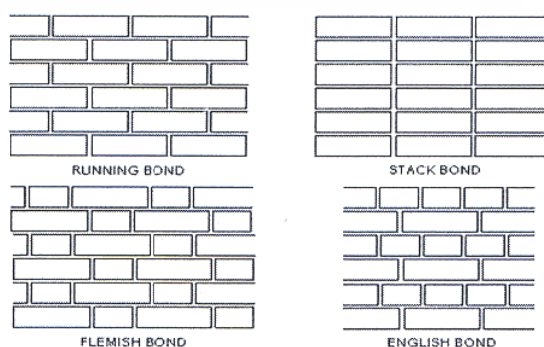
เป็นการก่ออิฐในลักษณะแนวเดียวกันหมดทั้งผนัง การก่อลักษณะนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากรอยต่อของปูนก่ออยู่ในแนวเดียวกันทำให้ความสามารถในการรับแรงน้อย การวิบัติจะเกิดบริเวณแนวรอยต่อ

3) Flemish bond

วิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ เป็นการก่อในลักษณะการวางอิฐในแต่ละชั้นจะวางสลับกันระหว่างด้านยาวกับด้านกว้างของก้อนอิฐแต่ละก่อแบบสลับหว่างกันในชั้นต่อไปเหมือนกับวิธีที่หนึ่ง

4) English bond

ลักษณะของชั้นแรกจะก่อในแนวเดียวกันหมดคือก่อตามแนวความยาวแต่ในชั้นที่สองจะเป็นการก่อตามความกว้าง



รูปที่ 2.2 รูปแบบการเรียงอิฐ [9]

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของวัสดุก่อ

Curtin และคณะ (1995) กล่าวว่า กำลังรับแรงอัดโดยรวมของวัสดุก่อขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ ประกอบด้วย

2.8.1 ความแข็งแรงของวัสดุได้แก่ ก้อนวัสดุก่อและมอร์ตาร์ และรวมถึงการควบคุมคุณภาพในการผลิต การก่อสร้าง

2.8.2 พื้นที่หน้าตัดของวัสดุก่อ

2.8.3 ความสูงและความหนาหรืออัตราส่วนความชะลูดของวัสดุก่อที่กำลังรับแรงอัดของก้อนวัสดุที่เท่ากันกำลังแรงอัดโดยรวมของวัสดุก่อจะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ โดยหลังรับแรงอัดของวัสดุก่อจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังของมอร์ตาร์

ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่มีผลกระทบต่อกำลังของวัสดุก่อก็คือ ความหนาของรอยต่อ โดยที่ความหนาของรอยต่อที่ประสานด้วยมอร์ตาร์ที่หนาขึ้น จะทำให้กำลังของวัสดุก่อมีค่าลดลง

2.9 อิฐที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน

ชาติชาย (2539) ได้ศึกษาตัวอย่างอิฐจากโบราณสถานต่างๆ ในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา พบว่าอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา มีลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี และชนิดทางจุลทรรศน์ที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำอิฐและชนิดดิน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้มีความคล้ายคลึงกัน และมีความต่อเนื่องถ่ายทอดกันมาตลอดสมัยอยุธยา อย่างไรก็ตามมีตัวอย่างอิฐบางตัวอย่างเมื่อพิจารณาทางด้านโบราณคดีและสถาปัตยกรรมของโบราณสถานแล้ว น่าสงสัยว่าอาจจะเป็นอิฐคนละสมัยหรือเป็นอิฐที่นำมาเสริมเติมภายหลัง แต่ก็สามารถตรวจสอบได้อย่างชัดเจนโดยวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ อีกประการหนึ่งคือ ผลการศึกษาองค์ประกอบของอิฐในปัจจุบันที่ยังมีการผลิตอยู่ที่บ้านลุมพินี บริเวณริมคลองสระบัว ซึ่งอยู่ด้านเหนือของเกาะเมืองอยุธยามีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา แสดงให้เห็นถึงเทคโนโลยีการผลิตอิฐที่สืบทอด นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์อิฐโดยวิธี Thin Section พบว่าอิฐส่วนใหญ่ประกอบด้วยแร่ไมกา ซึ่งพบว่าเป็นแร่ที่ปะปนในดินซุกทำม่วง และราชบุรีซึ่งเป็นดินเหนียวที่พระกระยาอยู่บริเวณสองฝั่งลำน้ำตอนบน

ของเกาะเมืองอยุธยาเท่านั้น แสดงให้เห็นชัดเจนว่าแหล่งผลิตอิฐแหล่งใหญ่ที่สุดในสมัยอยุธยา น่าจะเป็นบริเวณริมคลองสระบัว

ศุคชาย (2543) ได้ดำเนินการทดสอบหาความสามารถในการรับแรงของอิฐสมัยต่างๆ ที่ใช้ก่อสร้างโบราณสถานภายในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา เพื่อหาแนวโน้มความเปลี่ยนแปลงกำลังแรงอัดของอิฐโบราณที่มีการผลิตในปัจจุบัน บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เปรียบเทียบกับตัวอย่างอิฐโบราณที่หลุ่คร่วงจากโบราณสถานที่สามารถประมาณอายุการก่อสร้างได้ ตามตารางที่ 2.5 และ 2.6

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างอิฐโบราณ [2]

แหล่งตัวอย่าง	อายุโดยประมาณ (ปี)	ขนาด (ซม.)			น้ำหนัก (กรัม)	หมายเหตุ
		กว้าง	ยาว	หนา		
1.อิฐบ้านลุมพินี	1	5.45	5.57	3.89	153	ผลิตในปัจจุบัน
		5.42	5.47	4.13	180	
		5.47	5.29	3.65	142	
2.อิฐภูเขาทอง	50	5.34	5.15	5.65	224	บูรณะในสมัยจอมพล ป. พิบูลสงคราม
		5.17	5.68	5.31	215	
		5.23	5.62	5.79	226	

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างอิฐโบราณ [2] (ต่อ)

แหล่งตัวอย่าง	อายุโดย ประมาณ (ปี)	ขนาด (ซม.)			น้ำหนัก (กรัม)	หมายเหตุ
		กว้าง	ยาว	หนา		
3.อิฐวัดขุนแสน	130	5.11	5.15	3.86	139	บูรณะในสมัย พระบาทสมเด็จพระ พระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว
		5.39	5.65	4.43	215	
		5.29	5.50	4.58	185	
4.อิฐวัดหน้าพระเมรุ	145	5.09	5.18	3.86	139	สร้างในสมัย พระบาทสมเด็จพระ พระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว
		5.33	5.33	5.24	207	
		5.11	5.18	5.24	197	
5.อิฐวัดพระราม	240	4.79	4.51	4.88	121	บูรณะในสมัย พระบาทสมเด็จพระ พระเจ้าอยู่หัวบรมโกศ
		7.89	4.95	5.18	189	
		4.29	4.34	4.76	143	
6.อิฐวัดกุฎีดาว	285	5.57	5.41	4.17	176	เจดีย์ประธานสร้างในสมัย สมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ท้ายสระ
		5.23	5.39	4.13	176	
		5.45	5.52	4.04	177	
7.อิฐวัดสมณโกฏิ	310	5.31	4.84	4.62	177	สร้างในสมัย สมเด็จพระ พระนารายณ์มหาราช
		5.18	5.43	4.24	172	
		4.82	4.90	4.44	160	
8.อิฐวัดวรเชษฐาราม	385	4.38	5.95	4.28	166	สร้างในสมัย สมเด็จพระเอกาทศรถ
		5.45	5.49	5.57	237	
		4.50	5.72	5.31	161	
9.อิฐป้อมเพชร	430	5.12	5.08	4.46	162	สร้างในสมัย สมเด็จพระ พระมหาจักรพรรดิ
		5.24	5.31	4.48	164	
		5.15	5.39	4.10	143	

ตารางที่ 2.6 สรุปค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของอิฐโบราณจากการทดสอบ [2]

แหล่งตัวอย่าง	หน่วย น้ำหนัก (ก./ซม. ³)	กำลังอัด ประลัย (กก./ซม. ²)	โมดูลัสความ ยืดหยุ่น (กก./ซม. ²)	หมายเหตุ
1. อิฐบ้านลุมพินี	1.373	40.12	31,033	
2. อิฐภูเขาทอง	1.383	41.61	41,200	
3. อิฐวัดขุนแสน	1.403	57.19	26,633	
4. อิฐวัดหน้าพระเมรุ	1.359	39.54	42,400	
5. อิฐวัดพระราม	1.463	37.58	32,400	
6. อิฐวัดกุฎีดาว	1.457	44.01	32,450	
7. อิฐวัดสมณโกฏิ	1.475	50.12	37,033	
8. อิฐวัดวรเชษฐาราม	1.387	49.97	32,650	
9. อิฐป้อมเพชร	1.322	39.60	29,876	
10. อิฐพระปฐมเจดีย์	1.690	59.50	75,104	วรศักดิ์ และคณะ (2539)
11. อิฐภูเขาทอง (ยุคแรก)	1.584	67.50	25,482	สถาบันเทคโนโลยี แห่งเอเชีย, 2540

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของอิฐโบราณแยกตามกลุ่มอายุ [2]

กลุ่ม	ช่วงอายุ (ปี)	กำลังอัดประลัย (กก./ซม. ²)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (กก./ซม. ²)
1	1	40.12	31,033
2	50 – 200	46.11	36,744
3	200 – 350	43.90	33,961
4	350 - 410	44.79	31,263

2.10 มอร์ต้าร์ที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน

สมชาติ (2540) ปูนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดสำหรับโบราณสถานก็คือ ปูนแบบโบราณ ซึ่งหมักจากปูนขาวนั่นเอง เพราะมีความแข็งแรงพอประมาณ มีความพรุน และความยืดหยุ่นค่อนข้างสูงพอเหมาะสำหรับกำแพงอิฐโบราณสถาน ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน แตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีความแข็งและทึบตันสูง มีการหดตัวมากและขาดความยืดหยุ่น การเตรียมปูนหมักแบบโบราณ มีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.10.1 การเตรียมปูนขาวเพื่อใช้ทำปูนหมัก เริ่มจากการเผาหินปูนด้วยความร้อนสูง เพื่อให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์ หินปูนจะแตกออกเป็นก้อนสีขาวใหญ่บ้างเล็กบ้างเรียกว่า ปูนดิบ ซึ่งจะนำไปดำเนินการเป็นมอร์ต้าร์ต่อไป

2.10.2 การหมักปูนดิบ ที่ทำให้ปูนดิบคูดน้ำ แล้วกลายสภาพเป็นปูนเหนียว ถ้าปูนดิบที่ได้มาจากโรงงานมีขนาดก้อนใหญ่เกินไป ให้เคาะออกเป็นก้อนเล็กๆ ก่อนหมัก เพื่อลดความรุนแรงจากปฏิกิริยาของก้อนปูนขาวในน้ำ นำปูนดิบไปแช่ในบ่อหมักปูน ใส่น้ำในบ่อหมักให้สูงกว่าปูนประมาณ 2.5 เซนติเมตรเป็นอย่างน้อย เมื่อใส่ปูนดิบลงในน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาปูนแตกตัวอย่างรุนแรง น้ำและปูนร้อนจัดจนอุณหภูมิขึ้นสูงถึงจุดเดือด ให้กวนปูนอยู่เรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาหยุดและน้ำในบ่อหมักแห้งจะได้ปูนขาวเหนียว นำปูนขาวเหนียวขึ้นจากบ่อหมัก ล้างน้ำร้อนผ่านตะแกรงขนาดตา 5 มิลลิเมตร เพื่อกรองเอาสิ่งปนเปื้อนหรือก้อนปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือก้อนปูนขนาดใหญ่ออกไป เก็บปูนขาวเหนียวนี้ไว้ได้น้ำ ให้น้ำอยู่สูงจากผิวปูนไม่น้อยกว่า 2.5 เซนติเมตรเป็นอย่างน้อย และหมักทิ้งไว้ประมาณ 14 วัน แต่ถ้าจะให้มีความเหนียวมากขึ้นต้องหมักไว้ 60 วัน

ขึ้นไป ปูนหมักนี้สามารถหมักเก็บไว้เป็นปี ปูนหมักที่มีอายุการหมักนานๆ จะแข็งตัว แต่ก็สามารถนำมาใช้งานได้เมื่อผสมน้ำแล้วทำให้ได้ที่

2.10.3 การผสมปูนกับทราย เมื่อหมักปูนจนได้ระยะเวลาตามกำหนดแล้วให้นำปูนหมักมาผสมกับทรายและปูนซิเมนต์ขาวโดยปริมาตรดังนี้

ปูนซิเมนต์ขาว	1	ส่วน
ปูนหมักร่อนแล้ว	2	ส่วน
ทรายหยาบ	9	ส่วน

ผสมน้ำพอให้ปูนทรายเข้ากันดี จึงนำไปใช้ก่ออิฐ

2.11 การเสื่อมสภาพของมอร์ต้าร์

อนพัช (2547) ทำการศึกษาการเพิ่มคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ด้านการรับแรงดึงและด้านความเหนียวหรือลดการแตกร้าวโดยใช้เส้นใยเป็นตัวประสานระหว่างวัสดุผสมในมอร์ต้าร์เพื่อให้เกิดการยึดเหนี่ยวอย่างทั่วถึงในเนื้อมอร์ต้าร์ เป็นการพัฒนาการเสื่อมสภาพของมอร์ต้าร์ที่ใช้เป็นวัสดุก่อซึ่งมอร์ต้าร์จะเริ่มเสื่อมสภาพในช่วงปีแรกๆของการก่อสร้าง ปัจจัยการเสื่อมสภาพของมอร์ต้าร์เกิดขึ้นจากสาเหตุหลายประการเช่น การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ เป็นต้น

Bernard (1995) สรุปถึงการเสื่อมสภาพของวัสดุก่อสร้างว่าเกิดขึ้นจากสาเหตุหลายประการ ภูมิอากาศเป็นหนึ่งในสาเหตุพื้นฐานของการเสื่อมสภาพ การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ ความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุอาคารเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ขนาดของความเปลี่ยนแปลงทางมิติ
- 2) ความยืดหยุ่นของวัสดุ (elasticity of material)
- 3) ความสามารถของวัสดุที่จะแผ่ (creep) หรือไหลภายใต้น้ำหนัก
- 4) ค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของวัสดุโดยการเชื่อมต่อกับองค์ประกอบอื่น ๆ ของ

โครงสร้าง

Ashursi (1989) ได้สรุปวงจรของการเสื่อมสภาพของมอร์ตาร์ว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ประสานวัสดุ ก่อที่ไม่มีการฉาบผิวปิดรอยต่อจะเริ่มเสื่อมสภาพในช่วงปีแรก ๆ ของการก่อสร้าง เนื่องจากการ เปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ และจะเสื่อมสภาพมากขึ้นจากการกัดเซาะของน้ำฝนและการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หากมีการซ่อมวัสดุประสานอย่างไม่ถูกวิธีจะทำให้เกิดการแตกร้าวบริเวณ รอยต่อเนื่องจากการหดตัวที่แตกต่างของมอร์ตาร์ที่ประสานเข้าไปใหม่

2.12 วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Polymer Composite หรือ FRP Composite)

วัสดุคอมโพสิต (composite material) เป็นวัสดุที่ประกอบกันมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปสามารถ มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (macroscopic) วัสดุที่ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่ แตกต่างกันอย่างชัดเจน และคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะต้องมีคุณสมบัติที่แตกต่างจาก วัสดุที่ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะเป็น คุณสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุที่ถูกนำมาประกอบ ถ้าเปรียบเทียบวัสดุคอมโพสิตประเภทพลาสติก เสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic หรือ FRP) กับคอนกรีตเสริมเหล็ก จะพบว่าเส้นใยทำหน้าที่ เปรียบเสมือนเหล็กเสริมและพลาสติกทำหน้าที่เปรียบเสมือนคอนกรีต

ในปัจจุบันพลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic หรือ FRP) โดยเฉพาะแบบอีพ็อกซี (epoxy) เสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) หรือเส้นใยเคฟลาร์ (kevlar fiber) หรือเส้นใยแก้ว (glass fiber) ได้ถูกนำมาใช้งานวิศวกรรมโยธาในหลายด้าน เช่น ใช้แทนเหล็กเสริมและเคเบิลใช้ในการ เสริมกำลัง (strengthening) และซ่อมแซม (repair) โครงสร้างหรือองค์อาคารคอนกรีตเสริม เหล็ก และใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างองค์อาคารและโครงสร้างต่างๆ โดยตรงโดยเฉพาะในงานที่ ต้องการวัสดุที่มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักสูง มีน้ำหนักเบา และมีความต้านทานต่อการกัด กร่อนจากสถานะแวดล้อมและสารเคมีได้ดี

2.13 ชนิดของเส้นใย (Fiber Reinforcement Type)

วัสดุเส้นใย fiber reinforcement ที่นิยมใช้งานเสริมกำลังโดยทั่วไปคือมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด คือ carbon fiber, aramid fiber และ glass fiber ซึ่งมีคุณสมบัติทางกล และทางเคมีที่ต่างกัน ดังนี้

2.13.1 เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber)

เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีในอุณหภูมิสูง โดยทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุลคาร์บอนเป็นเส้นยาว และมีความแข็งแรงสูง มีความสามารถรับแรงดึงได้สูงถึง 10-15 เท่าของเหล็กกล้าที่มีขนาดเท่ากัน แต่จะมีความเปราะแตกหักได้ง่ายและไม่สามารถดัดงอที่มุม 90 องศาได้ เนื่องจากจะหักและไม่สามารถถ่ายแรงได้ เหมาะสมกับการเสริมกำลังโครงสร้างที่มีการบรรทุกน้ำหนักต่อเนื่องยาวนาน, โครงสร้างที่รับ cyclic load เช่น สะพาน, งานที่ต้องควบคุม deflection หรืองานที่ต้องการคุณภาพสูง เป็นต้น ซึ่งเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ที่ใช้กันจะมี 2 แบบคือ

- 1) ชนิด High Tensile Strength จะใช้เสริมในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 2) ชนิด High Modulus จะใช้เสริมในงานโครงสร้างเหล็ก

2.13.2 Aramid fiber หรือเส้นใยเคฟลาร์ (kevlar fiber)

มักใช้งานที่ต้องการทั้งกำลังและความยืดหยุ่น ซึ่ง Aramid fiber จะสามารถทนแรงกระแทกได้ดี และสามารถงอ 90 องศาได้โดยไม่แตกหัก

2.13.3 เส้นใยแก้ว (Glass fiber)

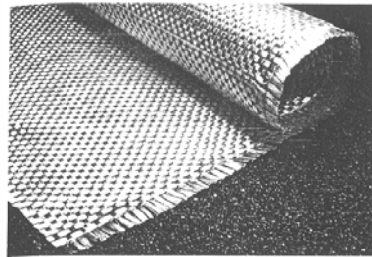
เส้นใยแก้ว (Glass fiber) จะเหมาะสมกับการใช้งานแบบระยะสั้น-กลาง หรือไม่มีการใส่น้ำหนักต่อเนื่องยาวนาน (sustained load) เนื่องจากจะเกิดปัญหาจาก creep หากจะใช้ glass fiber ในงานระยะยาวควรควบคุมให้เกิด stress ไม่เกิน 20% ของ Ultimate tensile strength แต่เส้นใยแก้ว (Glass fiber) จะมีความเปราะแตกหักได้ง่ายและไม่สามารถดัดงอที่มุม 90 องศาได้ เนื่องจากจะหักและไม่สามารถถ่ายแรงได้



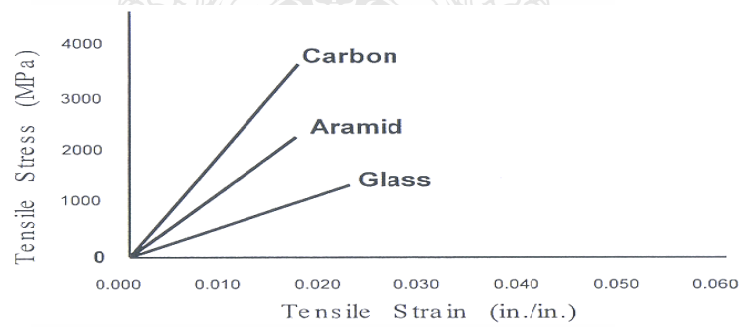
รูปที่ 2.3 ลักษณะเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) [6]



รูปที่ 2.4 เส้นใยเคฟลาร์ (kevlar fiber) [6]



รูปที่ 2.5 เส้นใยแก้ว (glass fiber) [6]

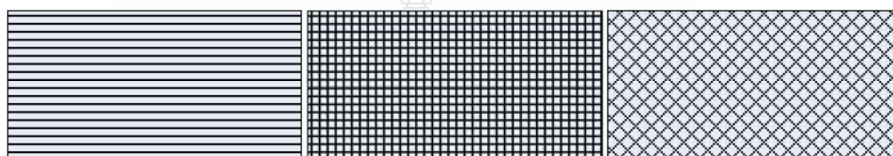


รูปที่ 2.6 Stress-Strain เส้นใย Fiber Reinforcement [10]

2.14 ลักษณะหรือรูปแบบทั่วไปของเส้นใย (Fiber Reinforcement Form)

รูปแบบของ FRP ที่นิยมใช้งานอยู่ 3 ประเภท คือ แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) แบบแผ่นแข็ง (Laminate, Plate) และแบบเส้น (Rod ,Bar)

Fiber Sheet จะมีรูปแบบการทอที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปงานเสริมกำลังคอนกรีตจะใช้รูปแบบจัดเรียงทิศทางเดียว (Unidirectional) เพื่อความสะดวกและประสิทธิภาพในการกำหนดทิศทางการรับแรง แต่ในบางกรณีอาจใช้รูปแบบการจัดเรียงแบบ 2 ทิศทาง (Bidirectional) เพื่อการกระจายแรง หรือเพื่อการรับแรงเฉือน ตามความเหมาะสม



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยแบบ Unidirectional (0°), Bidirectional ($0^\circ+90^\circ$), Bidirectional (45°) [6]

2.15 เรซิน (Resin)

2.15.1 หน้าที่หลักของเรซิน

เรซิน (Resin) มีหน้าที่หลัก 3 ประการคือ ทำหน้าที่ยึดประสานเส้นใย (fiber) เข้าด้วยกัน, ถ่ายแรงระหว่างเส้นใย และป้องกันความเสียหายของเส้นใยจากสภาวะแวดล้อม โดยที่เรซินนั้นมีด้วยกัน 2 ประเภท คือ Thermoplastics เป็นเรซินที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ส่วนใหญ่ จะใช้ในงานอุตสาหกรรม และเรซินประเภท Thermosets เป็นเรซินที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ อีก เรซินประเภทนี้จะใช้ในงานเสริมกำลัง

2.15.2 ชนิดของเรซิน (Resin Types)

1) Unsaturated Polyesters

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

- 2) Epoxies
- 3) Polyurethanes
- 4) 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

2.16 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP)

ผิวของเส้นใย fiber จะมีกระบวนการ surface treatment ได้หลายวิธี ประสิทธิภาพในการยึดเกาะ และการเสริมกำลังจะขึ้นอยู่กับวิธีการยึดเหนี่ยว และการถ่ายหน่วยแรงระหว่างผิวชิ้นงาน และแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย ซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับวิธีการประกอบแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย เข้ากับผิวชิ้นงาน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

2.16.1 adhesive bonding แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยที่ถูกผลิตและบ่มมาจากโรงงานถูกยึดเข้ากับผิวชิ้นงานโดยใช้กาวภายใต้ความดัน

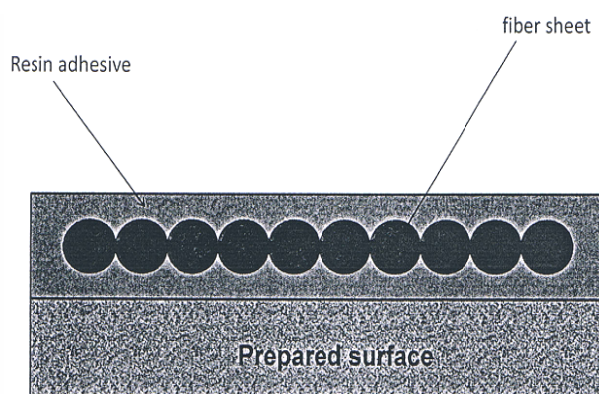
2.16.2 wet lay-up ทาเรซินบนผิวชิ้นงานจากนั้นวางพลาสติกเสริมเส้นใยที่อยู่ในรูปของ fabric และใช้ลูกกลิ้งกลิ้งไปบน fabric เพื่อรีดให้กาวส่วนเกินไหลออกมาเพื่อก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่สมบูรณ์

2.16.3 resin infusion จัดวาง fabric ลงบนพื้นที่ที่ต้องการเสริมกำลังจากนั้นทำการห่อพื้นที่ดังกล่าวด้วย vacuum bag และอัดเรซินให้ซึมเข้าไปใน fabric และให้ความดันแก่ vacuum bag เพื่อกดอัด fabric ให้สัมผัสกับผิวคอนกรีตอย่างแนบแน่นซึ่งวิธีการนี้จะทำให้เรซินซึมแทรกเข้าไปในรอยแตกของชิ้นงานด้วย

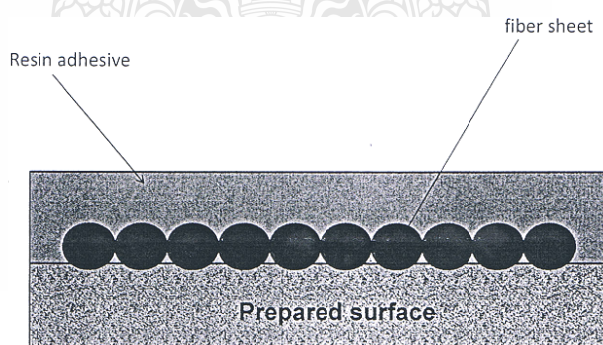
ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังในลักษณะนี้ จะขึ้นอยู่กับการใช้ชนิดของกาวที่เหมาะสม ซึ่งควรมีค่าความแกร่งและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานและพลาสติกเสริมเส้นใยให้มากที่สุด

ในสามวิธีการติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยเข้ากับผิวชิ้นงานข้างต้น วิธีที่ใช้มากที่สุด เหมาะสมกับการก่อสร้างงานที่สุุด และถูกที่สุดคือ วิธี wet lay-up อย่างไรก็ตามเรซินที่ใช้ควร

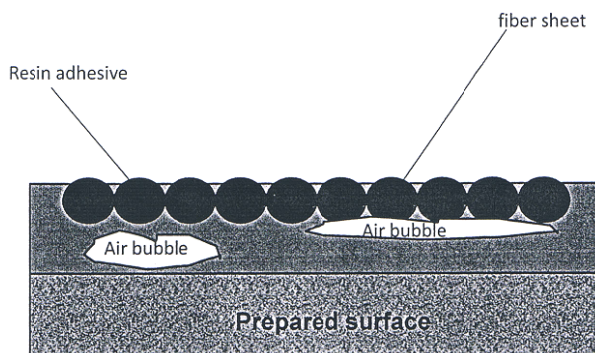
มีปริมาณที่เหมาะสมเพราะถ้ามากเกินไปจะทำให้ fabric ย่นได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังลดลงอย่างมาก นอกจากนั้นแล้ววิธีการนี้ อาจจะมีฟองอากาศเกิดขึ้นในเนื้อแก้วได้เป็นจำนวนมากหากไม่มีการรีดแก้วด้วยลูกกลิ้งที่ดี ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้แก้วเสื่อมสภาพได้ในเวลาอันสั้น วิธี resin infusion ในสนามเป็นวิธีการที่ค่อนข้างใหม่ที่ทำให้แก้วยึดติดกับผิวคอนกรีตและ fabric ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.8 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP) อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.9 การติดตั้งโดยเส้นใย (Fiber Reinforcement) อยู่ด้านล่าง เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังลดลง [13]



รูปที่ 2.10 ฟองอากาศในเรซิน เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังลดลง [13:11]

2.17 การออกแบบและข้อกำหนดรายละเอียด FRP

2.17.1 การกำหนดทิศทางของแรง

แรงใน fiber จะเป็นแรงดึง แนวแรงควรจะเป็นเส้นตรงในระนาบให้มากที่สุดในการออกแบบควรมีการกระจายแรงไปตาม fiber filament ที่ขนานกันอย่างสม่ำเสมอ การเปลี่ยนทิศทางของแรงอย่างกะทันหันอาจทำให้เกิดความบกพร่องและเสียหายได้

2.17.2 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

2.18 ข้อควรระวังในการออกแบบติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP)

- 1) จำนวนชั้น Layer ควรมีจำนวนชั้นที่น้อยที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงจากการเกิด Debonding โดยปกติไม่ควรเกิน 3 - 4 ชั้นเมื่อเสริมกำลังด้วย fiber sheet และ 1 ชั้นสำหรับแบบแผ่น laminate
- 2) ควรมีการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง โดยที่ stress ที่เกิดขึ้นจากการรับแรงในแนวขนานกับผิวสัมผัสควรอยู่ในระดับที่ต่ำเท่าที่จะเป็นไปได้

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

2.18.6 Bidirectional Fiber Sheet จะควบคุมแนวทิศทางแรงและคุณภาพการทำงานได้ยากกว่าการใช้ Unidirectional 2 ชั้นในทิศทางตั้งฉากกัน

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

8) ไม่ควรติดตั้ง FRP ผ่านมุมออด้านใน (Inner Corner) เนื่องจากจะเป็นจุดเริ่มของการ Debonding

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

10) การใช้ Adhesive ที่มากเกินไป อาจทำให้แนวเส้นใย Fiber เกิดการเคลื่อนตัวและหย่อนในขณะที่ถ้าใช้ Adhesive ไม่เพียงพอ ก็จะทำให้เกิด Unsaturated Area ซึ่งจะทำให้การถ่ายเทแรงไม่สมบูรณ์ หรือเป็นจุดเริ่ม Debonding

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

12) การลมนุ่มที่ไม่เรียบร้อย หรือมีรัศมีความโค้งที่ไม่เพียงพอ จะทำให้บริเวณนุ่มมี stress สูง และ fiber อาจหักในขณะติดตั้ง หรือนึกขาดในขณะรับแรง



บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน

ในการศึกษาวิจัยนี้จะดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลของอิฐโบราณ ตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Materials) : ASTM C67 ได้แก่ การวัดขนาด การวัดความบิดเบี้ยว การห้าน้ำหนักโมดูลัส แตรกร้าว กำลังต้านแรงอัด การดูดซึมน้ำ และอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น และทำการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณในกรณีดังต่อไปนี้

- 1) ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ ภายใต้แรงกระทำทางด้านบน
- 2) ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ เสริมด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านบน

โดยกำหนดวิธีการทดสอบเป็นลำดับขั้นตอนดังนี้

3.1 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่าง

ทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C67 โดยอิฐโบราณที่นำมาทดสอบในครั้งนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา [1], [2] จากแหล่งทำอิฐปัจจุบัน บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยวิธีการดังต่อไปนี้

3.1.1 การวัดขนาด

- 1) เครื่องมือ

บรรทัดเหล็กมีความยาว 30 เซนติเมตร และมีความละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร

- 2) จำนวนและลักษณะก้อนตัวอย่าง

ใช้อิฐเต็มก้อนขณะแห้ง จำนวน 10 ก้อน มีขนาดและสีแตกต่างกันมากที่สุดเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า

- 3) วิธีทดสอบ

ใช้เครื่องมือวัดในข้อ 1) วัดความยาวของอิฐทางหน้ายาวทั้ง 4 หน้า บันทึกผลการวัดทั้ง 4 หน้าให้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร และบันทึกค่าเฉลี่ยความยาวให้ละเอียดถึง 0.5 มิลลิเมตร วัดความกว้างและความหนาของก้อนในลักษณะเช่นเดียวกับการวัดความยาว และบันทึกผลการวัดในทำนองเดียวกัน

3.1.2 การวัดความบิดเบี้ยว

1) เครื่องมือ

- บรรทัดเหล็ก สามารถแบ่งละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร
- ลิ่มสำหรับวัด ทำด้วยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร กว้าง 12.5 มิลลิเมตร ปลายด้านหนึ่งหนา 12.5 มิลลิเมตร และเรียวยาวไปจนความหนาเท่ากับศูนย์ที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ลิ่มแบ่งละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร และมีตัวเลขบอกความหนาของลิ่มตามรูปที่ 3.1
- กระดาษที่มีขนาดไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตร \times 300 มิลลิเมตร ผิวเรียบอยู่ภายใน 0.025 มิลลิเมตร

2) วิธีทดสอบ

ใช้อิฐเต็มก้อนจำนวน 10 ก้อน ที่เลือกไว้สำหรับการวัดขนาด เมื่อการบิดเบี้ยวเข้า ให้วางบรรทัดเหล็กลงบนผิวที่จะวัดตามยาวหรือตามเส้นทแยงมุม โดยเลือกตำแหน่งที่จะให้ค่าความลึกมากที่สุด ใช้บรรทัดเหล็กหรือลิ่มวัดก็ได้ โดยเลือกจุดที่ให้ค่าความบิดเบี้ยวสูงสุด คือจุดที่มีความลึกระหว่างผิวอิฐถึงเส้นของบรรทัดเหล็กมากที่สุด วัดละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร แล้วบันทึกความบิดเบี้ยวในลักษณะว่า

3.1.3 การหาน้ำหนัก

1) เครื่องมือ

- เครื่องชั่ง มีความละเอียดภายในร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่เล็กที่สุดที่ถูกทดสอบ
- ตู้อบแห้ง มีอุณหภูมิระหว่าง 110 ถึง 115 องศาเซลเซียส
- พัดลม

2) วิธีทดสอบ

- ทำให้อิฐตัวอย่างแห้งในตู้อบแห้ง ที่อุณหภูมิ 110 ถึง 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก และนำเข้าอบใหม่นาน 2 ชั่วโมง นำออกมาชั่งน้ำหนักใหม่ หากปรากฏว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปไม่เกินร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักอิฐตัวอย่างในการชั่งครั้งก่อนถือว่าน้ำหนักนั้นแห้งใช้ทดสอบต่อไปได้ หากน้ำหนักที่สูญเสียไปเกินเกณฑ์ดังกล่าว ให้อบแห้งซ้ำอีกจนกว่าจะได้ผลว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างการอบแห้งนานครั้งละ 2 ชั่วโมง ไม่เกินร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักอิฐตัวอย่างที่ชั่งครั้งก่อน

- ทำให้อิฐตัวอย่างเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง โดยการเก็บอิฐตัวอย่างวางแยกๆ กัน ในห้องที่อากาศถ่ายเทได้สะดวกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยเปิดพัดลมให้กระแสลมพัดผ่านอิฐตัวอย่างเป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง เมื่อสัมผัสไม่รู้สึกร้อนจึงนำไปชั่งน้ำหนักต่อไปได้
- นำอิฐตัวอย่างที่ได้จากการอบแห้ง และทำให้เย็นตัวลงแล้ว ไปชั่งน้ำหนัก เรียกว่าน้ำหนักแห้ง

3) วิธีการคำนวณและรายงานผล

- คำนวณหาน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ของอิฐตัวอย่าง ที่ได้จากข้อ ค. โดยน้ำหนัก เป็นกิโลกรัมหารด้วยพื้นที่เฉลี่ยระหว่างหน้าทั้งสองของอิฐตัวอย่างเป็นตารางเมตร ตามลักษณะที่ก่อในกำแพง
- การรายงานผลจะรายงานผลการคำนวณแต่ละก้อนและผลเฉลี่ยจาก 5 ก้อน

3.1.4 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

1) เครื่องมือ

เครื่องชั่งที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ ใช้เครื่องชั่งที่สามารถชั่งน้ำหนักได้ 2000 กรัม และมีความละเอียดถึง 0.5 กรัม

2) จำนวนและลักษณะก้อนตัวอย่าง

ใช้อิฐตัวอย่างเดิมก้อนจำนวน 5 ก้อน ที่เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดในข้อ 3.1.3 และอยู่ในสภาพสมบูรณ์ ไม่มีแตกหัก หรือบิ่น

3) วิธีการทดสอบ

- การทดสอบการแช่น้ำ

นำอิฐตัวอย่างแช่น้ำประมาณ 1 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำอิฐตัวอย่างขึ้นจากน้ำและเช็ดอิฐตัวอย่างด้วยผ้าที่ขึ้น เพื่อเอาน้ำส่วนเกินที่ผิวของอิฐตัวอย่างออก แล้วชั่งน้ำหนักของอิฐตัวอย่าง ขั้นตอนที่น่าอิฐตัวอย่างขึ้นจากน้ำและชั่งน้ำหนักจะต้องทำให้เสร็จภายใน 5 นาที ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐตัวอย่างจะหาได้จากสมการ

$$\text{Absorption, (\%)} = \frac{100(w_s - w_d)}{w_d} \quad (3.1)$$

โดยที่

W_d = น้ำหนักของอิฐตัวอย่างที่แห้ง

W_s = น้ำหนักของอิฐตัวอย่างหลังแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

● การทดสอบการต้มเคือด แบบ 2 ชั่วโมง

ในการทดสอบครั้งนี้ อิฐตัวอย่างจะใช้อิฐตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการแช่น้ำ ซึ่งดูดซึมน้ำจนอิ่มตัวแล้ว หลังจากนั้นต้มน้ำที่มีอิฐตัวอย่างแช่อยู่จนเดือดภายใน 1 ชั่วโมง แล้วทำการต้มต่อไปเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง จากนั้นดับไฟรอจน อุณหภูมิของน้ำลดลงอยู่ในช่วง 15.5 ถึง 30 องศาเซลเซียส แล้วนำอิฐตัวอย่างขึ้นจากน้ำและเช็ดอิฐตัวอย่างด้วยผ้าที่ขึ้น เพื่อเอาน้ำส่วนเกินที่ผิวของอิฐตัวอย่างออก แล้วชั่งน้ำหนักของอิฐตัวอย่าง ขึ้นตอนที่นำอิฐตัวอย่างขึ้นจากน้ำและชั่งน้ำหนักจะต้องทำให้เสร็จภายใน 5 นาที ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐตัวอย่างจะหาได้จากสมการ

$$\text{Absorption, (\%)} = \frac{100(W_b - W_d)}{W_d} \quad (3.2)$$

โดยที่

W_d = น้ำหนักของอิฐตัวอย่างที่แห้ง

W_b = น้ำหนักของอิฐตัวอย่างที่อิ่มตัวหลังจากการต้ม

4) การรายงาน

การรายงานผลจะรายงานผลการคำนวณแต่ละก้อนและผลเฉลี่ยจาก 5 ก้อน

3.1.5 การทดสอบหาอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น

1) เครื่องมือ

● ถาดหรือภาชนะ

ถาดหรือภาชนะที่มีความลึกด้านใน 12.7 มิลลิเมตร และพื้นที่ไม่ต่ำกว่า 193.55 ตารางเซนติเมตร ก้นภาชนะจะต้องมีลักษณะแบนราบและมีความยาวไม่ต่ำกว่า 203.2 มิลลิเมตร และมีความกว้างไม่ต่ำกว่า 152.4 มิลลิเมตร

● เครื่องมือที่รองรับตัวอย่างทดสอบอิฐ

เครื่องมือที่ใช้รองรับตัวอย่างทดสอบอิฐเป็นแท่งเหลี่ยมยาวระหว่าง 127 มิลลิเมตร ถึง 152.5 มิลลิเมตร มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมและมีความหนาประมาณ 6.35 มิลลิเมตร และมีความกว้างไม่เกิน 1.94 มิลลิเมตร

- เครื่องชั่ง

เครื่องชั่งที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ ใช้เครื่องชั่งที่สามารถชั่งน้ำหนักได้ 2000 กรัม และมีความละเอียดถึง 0.5 กรัม

- นาฬิกาจับเวลา

เป็นนาฬิกาจับเวลาที่บอกเวลาเป็นวินาที

2) จำนวนและลักษณะก้อนตัวอย่าง

ใช้อิฐตัวอย่างเต็มก่อนจำนวน 5 ก้อน ที่เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดในข้อ 3.1.3 และอยู่ในสภาพสมบูรณ์ ไม่มีแตกหัก หรือบิ่น

3) วิธีการทดสอบ

- ทำการวัดความยาวและความกว้างของอิฐตัวอย่างด้านแบนให้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร และทำการชั่งน้ำหนักของอิฐตัวอย่างให้ละเอียดถึง 0.5 กรัม
- ปรับตำแหน่งลาดให้ได้ระดับ และวางตัวอย่างทดสอบอ้างอิงที่อ้อมตัวด้วยน้ำบนที่รองรับ จากนั้นเติมน้ำให้ได้ระดับ 3.18 ± 0.25 มิลลิเมตร เหนือระดับของที่รองรับอิฐตัวอย่าง
- นำอิฐตัวอย่างอ้างอิงออก จากนั้นวางตัวอย่างทดสอบโดยเอาด้านแบนวางลง เริ่มจับเวลาเมื่ออิฐตัวอย่างทดสอบสัมผัสกับผิวน้ำ เป็นเวลา 1 นาที ± 1 วินาที ในช่วงเวลานี้พยายามรักษาระดับน้ำให้คงที่ไว้ที่ระดับ 3.18 ± 0.25 มิลลิเมตร โดยการเติมน้ำลงในลาด เมื่อครบ 1 นาที ± 1 วินาที ให้ยกอิฐตัวอย่างขึ้นจากผิวน้ำ แล้วเช็ดเอาน้ำส่วนเกินที่ติดผิวออกโดยใช้ผ้าที่ขึ้นเช็ด ทำการชั่งน้ำหนักอิฐให้ละเอียดถึง 0.5 กรัม การเช็ดน้ำดังกล่าวจะต้องทำให้เสร็จภายในเวลา 10 วินาที และขั้นตอนที่ย้ายอิฐออกและการชั่งน้ำหนักต้องทำให้เสร็จภายใน 2 นาที

4) การคำนวณ

หาค่าความแตกต่างของน้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักสุดท้ายในหน่วยกรัม ค่าที่ได้คือน้ำหนักของน้ำที่ดูดซึมโดยอิฐตัวอย่างในช่วงเวลา 1 นาที ที่สัมผัสน้ำ ถ้าพื้นที่ผิวด้านแบนมีความแตกต่างจากค่า 193.33 ตารางเซนติเมตร ± 4.84 ตารางเซนติเมตร ($\pm 2.5\%$) แล้ว ค่าน้ำหนัก

ของอิฐตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นหรือน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึมบนพื้นที่ 193.55 ตารางเซนติเมตร ของอิฐตัวอย่างได้จากสมการ

$$X = \frac{193.55W}{LB} \quad (3.3)$$

โดยที่

X = น้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึมบนพื้นที่ 193.55 เซนติเมตร² ของอิฐตัวอย่าง

W = น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจริงหรือน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึมจริงของตัวอย่างทดสอบ
มีหน่วยเป็น กรัม

L = ความยาวของอิฐตัวอย่าง มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

B = ความกว้างของอิฐตัวอย่าง มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

3.2 ทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่าง

ทดสอบหาคุณสมบัติทางกล (Mechanical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C67 โดยอิฐโบราณที่นำมาทดสอบในครั้งนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา จากแหล่งทำอิฐปัจจุบัน บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยวิธีการดังต่อไปนี้

3.2.1 การทดสอบโมคูลัสแตกร้าว

1) เครื่องมือ

เครื่องกด เป็นไปตามมาตรฐานของสมาคมเพื่อการทดสอบและวัสดุของอเมริกัน

ASTM E4-1973

2) จำนวนและลักษณะก้อนตัวอย่าง

ใช้อิฐตัวอย่างเต็มก้อนจำนวน 5 ก้อน ที่ได้จากข้อ 3.1.3

3) วิธีทดสอบ

- วางอิฐตัวอย่างทางด้านแบนบนจุดรองรับสองจุด (เพื่อให้ น้ำหนักกดตามทิศทางของความหนาของตัวอย่าง) โดยระยะช่วงจุดรองรับน้อยกว่าความยาวระนาบของก้อนตัวอย่าง 25 มิลลิเมตร กดน้ำหนักที่จุดกึ่งกลางช่วง ถ้าอิฐตัวอย่างนั้นมีส่วนเว้าเข้าไป จะจัดวางส่วนเว้าขึ้นอยู่บนด้านที่รับแรงอัด ให้น้ำหนักกดลงที่พื้นผิวด้านบนของอิฐตัวอย่างจนอิฐตัวอย่างเกิดการวิบัติ โดยผ่านแผ่น

เหล็กซึ่งมีความหนา 6 มิลลิเมตร กว้าง 38 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับ ความกว้างของอิฐตัวอย่าง

- จุดรองรับอิฐตัวอย่างทั้งสองจุด เป็นแท่งเหล็กกลมหมุนได้อย่างอิสระในทิศทางตามยาว และตามขวางของอิฐตัวอย่าง
- ความเร็วในการทดสอบ อัตราการเพิ่มน้ำหนักไม่เกิน 10 kN/นาที หรือความเร็วของหัวกดของเครื่องทดสอบที่กำลังเคลื่อนที่ ก่อนที่น้ำหนักจะกดบนก้อนตัวอย่างไม่เกิน 1.27 มิลลิเมตร/นาที

4) การคำนวณและการรายงาน

- ค่าโมดูลัสแตกร้าว ของอิฐตัวอย่างจะหาได้จากสมการ

$$S = 3WL / 2bd^2 \quad (3.4)$$

โดยที่

S = โมดูลัสแตกร้าวในอิฐตัวอย่าง มีหน่วยเป็น MPa (1 MPa = 10 kg/cm²)

W = แรงกดสูงสุด มีหน่วยเป็น N

L = ระยะห่างระหว่างจุดรองรับของอิฐตัวอย่าง มีหน่วยเป็น mm

b = ความกว้างโดยเฉลี่ยของอิฐตัวอย่าง มีหน่วยเป็น mm

d = ความลึกโดยเฉลี่ยของอิฐตัวอย่าง มีหน่วยเป็น mm

- การรายงานผลจะรายงานผลการคำนวณแต่ละก้อนและผลเฉลี่ยจาก 5 ก้อน

3.2.2 การทดสอบกำลังต้านแรงอัด

1) เครื่องมือ

เครื่องกด เป็นไปตามมาตรฐานของสมาคมเพื่อการทดสอบและวัสดุของอเมริกัน

ASTM E4-1973

2) จำนวนและลักษณะก้อนตัวอย่าง

ใช้อิฐตัวอย่างเต็มก้อนจำนวน 5 ก้อน ที่ได้จากข้อ 3.1.3 และอยู่ในสภาพสมบูรณ์ ไม่มีแตกหัก หรือบิ่น

3) การปรับผิวอิฐตัวอย่าง

การปรับผิวอิฐอย่างนี้เป็นการปรับผิวด้วยปูนปลาสเตอร์ (Gypsum capping) หรือกำมะถัน ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ทำการปรับผิว ได้แก่ปูนปลาสเตอร์และน้ำ ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก การปรับผิวจะมีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร และผิวดังกล่าวจะต้องมีความลาดเอียงไม่

เกิน 0.076 มิลลิเมตร ต่อ 406.4 มิลลิเมตร จากนั้น ทำการบ่มปูนปลาสเตอร์อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนทดสอบ

4) วิธีการทดสอบ

- วางอิฐตัวอย่าง โดยให้จุดกึ่งกลางของอิฐตัวอย่างทางด้านบน อยู่ตรงจุดกึ่งกลางของหัวกด โดยยอมให้เอียงกันไม่เกิน 1.6 มิลลิเมตร

- อัตราความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ

เมื่อแรงกระทำมีค่าน้อยกว่าแรงกดอัดประลัยของอิฐตัวอย่าง มาตรฐาน ASTM กำหนดให้ความเร็วในการทดสอบมีค่าเท่าใดก็ได้ ตามความเหมาะสมของเครื่องทดสอบ และเมื่อแรงกระทำมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของแรงกดอัดประลัย มาตรฐาน ASTM กำหนดให้ความเร็วในการทดสอบจะต้องอยู่ในช่วงที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติในเวลาไม่เร็วกว่า 1 นาที แต่ไม่เกิน 2 นาที

5) การคำนวณและการรายงาน

- คำนวณหาค่ากำลังต้านแรงอัด ของอิฐตัวอย่างได้จากสมการ

$$f'_{br} = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

โดยที่

f'_{br} = กำลังอัดประลัยของอิฐตัวอย่าง มีหน่วยเป็น MPa ($1 \text{ MPa} = 10 \text{ kg/cm}^2$)

F = แรงกระทำสูงสุด มีหน่วยเป็น N

A = พื้นที่เฉลี่ยของผิวด้านบนและด้านล่างของอิฐตัวอย่างที่รองรับแรงกดอัด มีหน่วยเป็น m^2

- การรายงานผลจะรายงานผลการคำนวณแต่ละก้อนและผลเฉลี่ยจาก 5 ก้อน

3.3 การทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ

ในการวิจัยนี้จะทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง โดยมีน้ำหนักกดทับคงที่ (Constant Axial Load) ด้านบนของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง และแรงกระทำทางด้านบนเพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ อีกทั้งเป็นการทดสอบถึงวิธีการประมาณการรับแรงอัดตามแนวแกนของผนังก่ออิฐทดแทนอิฐโบราณ โดยวัสดุ GFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1 ผนังที่ทดสอบมีขนาด ความหนาที่ 0.63 เมตร

ความกว้าง 1.54 เมตร ความสูง 1.20 เมตร ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ผนังอิฐก่อทดสอบก่อด้วยอิฐโบราณซึ่งเป็นอิฐโบราณสำหรับการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน ที่มีการผลิตในปัจจุบันที่ตำบลชุมพลี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ผนังอิฐก่อโบราณทดสอบก่ออยู่บนฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด ความกว้าง 0.90 เมตร ยาว 2.00 เมตร หนา 0.30 เมตร ด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบมีน้ำหนักกดทับด้วย Steel plate ขนาด 600×600×1.6 มิลลิเมตร

การทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ ใช้ขนาดของผนังอิฐก่อทดสอบในอัตราส่วนความสูงต่อความยาว (Height to length) 1:1 ซึ่งการทดสอบในอัตราส่วนดังกล่าวจะช่วยให้ลักษณะแรงเฉือนใน โดย การทดสอบผนังอิฐก่อตัวอย่าง 2 ผนังแรก เป็นการทดสอบพฤติกรรมและหาค่าแรงอัดตามแนวแกนและการทดสอบผนังอิฐก่อตัวอย่างอีก 2 ผนังที่เหลือ จะทำการติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ (FRP) ชนิดเส้นใยแก้ว Glass Fiber (GFRP) แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) ในแนวตั้งฉากกับแรงที่กระทำ โดยให้แรงอัดตามแนวแกน กับผนังอิฐก่อโบราณ การปล่อยแรงกระทำ (Loading) จะใช้วิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ (Displacement Controller) ของไฮดรอลิกแจ๊ค (Hydraulic Jack) ในแนวตั้ง โคนเริ่มจากระยะ 0.1 มิลลิเมตร จนวิบัติ ทำการตรวจความเสียหายของผนังอิฐก่อทดสอบ และในกรณีของการเสริมเส้นใยไฟเบอร์ (FRP) ก็ให้ตรวจความเสียหาย (Debonding) ของแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) ด้วย

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุ GFRP ที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุ	compressive strength MPa	tensile strength MPa	modulus of elasticity GPa
GFRP	-	1700	72
เรซิน	160	-	3.2

3.3.1 การทดสอบการหาค่ากำลังแรงกดอัด (Compressive strength test) ของผนังอิฐก่อโบราณแบบผนังเปล้า ใช้ผนังอิฐก่อโบราณจำนวน 2 ตัวอย่าง โดยมีวิธีทดสอบดังนี้

1) ทำการปรับผิวอิฐก่อด้านล่างสุด 1 ด้าน ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ปรับผิว คือ ปูนปลาสเตอร์ และ น้ำ อัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนักการปรับผิวนี้จะมีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร จากนั้นทำการบ่มปูนปลาสเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปก่อกำแพง

2) นำอิฐตัวอย่างที่จะถูกก่อเป็นกำแพง แช่น้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อลดการดูดซึมน้ำของอิฐจากปูนก่อ

- 3) ทำการก่อผนังอิฐโบราณ ให้ได้ที่อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (h/t) อยู่ระหว่าง 1 ถึง 1 และ มีรอยต่อแบบ Flush joint โดยที่ความหนาของรอยต่อมีความหนา 1 เซนติเมตร
- 4) การบ่มหลังจากการก่อจะเป็นการตั้งทิ้งไว้ในอาคารจะเป็นการใช้ถุงพลาสติกคลุมให้มีชื้น บ่มทิ้งไว้จนถึงวันที่ทดสอบกำลังรับแรงกดอัด
- 5) การปรับผิวอิฐก่อนบนสุดของผนังก่อที่ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
- 6) ทำการติดตั้ง Linear Variable Displacement Transducers (LVDT) และ Strain Gage ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้
- 7) ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดที่ 28 วัน โดยบันทึกค่าของแรงกดอัดโดยใช้เครื่องแม่แรงไฮดรอลิกแจ็ก (Hydraulic Jack) ขนาด 100 ตัน พร้อมแท่นยึดกดให้แรงกระทำตามมาตรฐาน ASTM กำหนดให้ความเร็วในการทดสอบจะต้องอยู่ในช่วงที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติภายใน 1 ถึง 2 นาที
- 8) นำผลการทดสอบที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกดอัด และความเครียดของแต่ละผนัง

3.3.2 การทดสอบการหาค่ากำลังแรงกดอัด (Compressive strength test) ของผนังอิฐก่อโบราณ เสริมด้วย Fiber reinforce polymers (FRP)

ใช้ผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Glass Fiber reinforce polymers (GFRP) 2 ตัวอย่างโดยมีวิธีทดสอบดังนี้

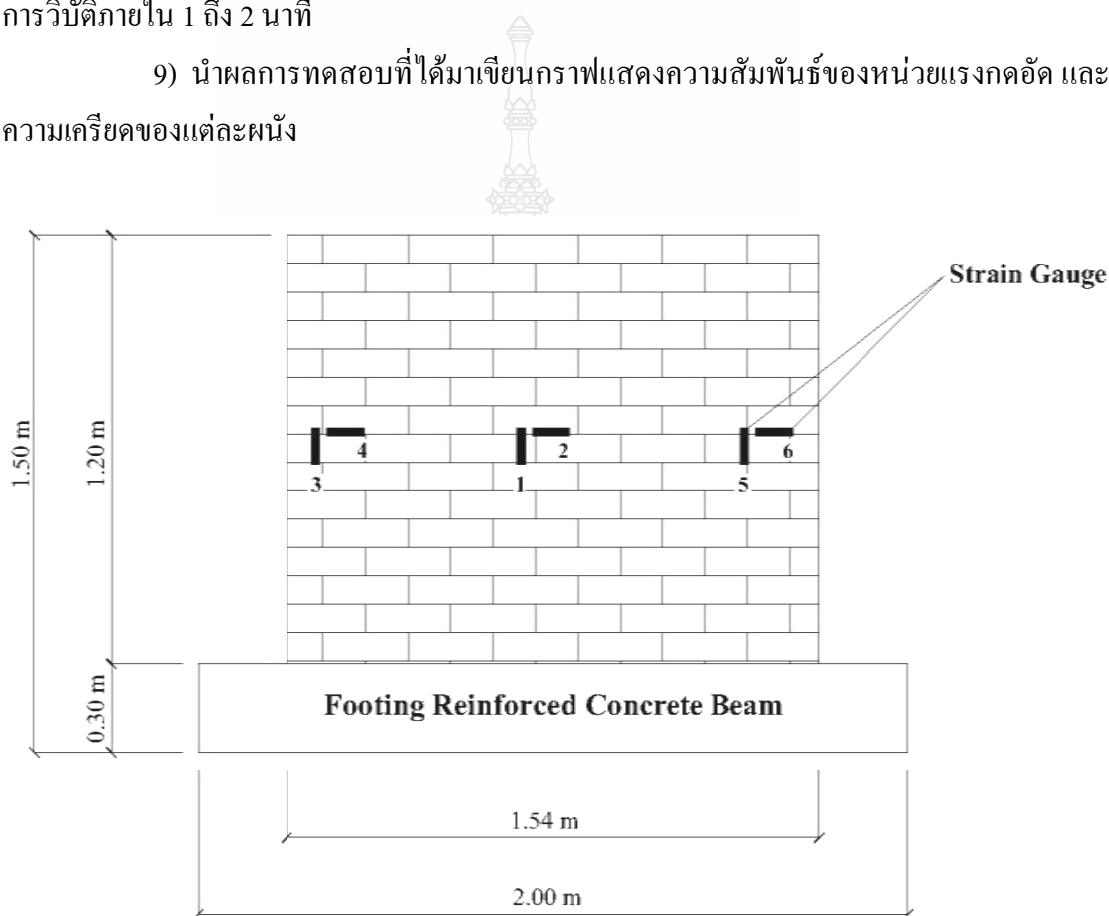
- 1) ทำการปรับผิวอิฐก่อนล่างสุด 1 ด้าน ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการปรับผิว คือ ปูนพลาสติกเตอร์ และ น้ำ อัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนักรการปรับผิวนี้ จะมีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร จากนั้นทำการบ่มปูนพลาสติกเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปก่อกำแพง
- 2) นำอิฐตัวอย่างที่จะถูกก่อเป็นกำแพง แช่น้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อลดการดูดซึมน้ำของอิฐจากปูนก่อ
- 3) ทำการก่อผนังอิฐโบราณ ให้ได้ที่อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (h/t) อยู่ระหว่าง 1 ถึง 1 และ มีรอยต่อแบบ Flush joint โดยที่ความหนาของรอยต่อมีความหนา 1 เซนติเมตร
- 4) ทำการปรับแต่งผิวด้านข้างของผนังอิฐทดสอบให้เรียบ แล้วนำแผ่น Glass Fiber reinforce polymers (GFRP) ที่เตรียมไว้ติดยึดกับผนัง
- 5) การบ่มหลังจากการก่อจะเป็นการตั้งทิ้งไว้ในอาคารจะเป็นการใช้ถุงพลาสติกคลุมให้มีชื้น บ่มทิ้งไว้จนถึงวันที่ทดสอบกำลังรับแรงกดอัด

6) การปรับผิวอิฐก่อนบนสุดของผนังก่อที่ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง

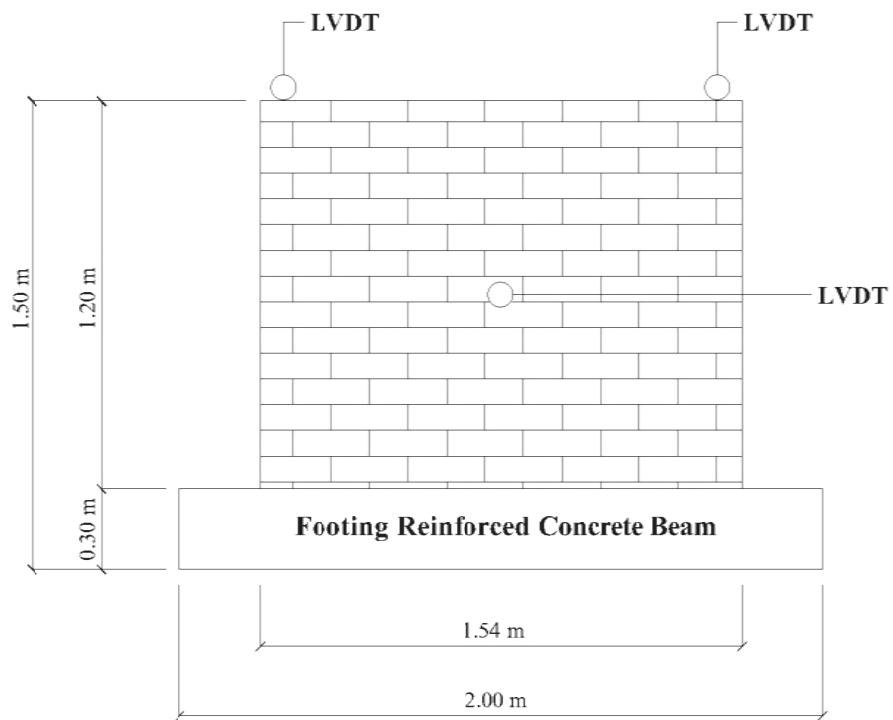
7) ทำการติดตั้ง Linear Variable Displacement Transducers (LVDT) และ Strain Gauge ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้

8) ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดที่ 28 วัน โดยบันทึกค่าของแรงกดอัดโดยใช้เครื่องแม่แรงไฮดรอลิกแจ็ก (Hydraulic Jack) ขนาด 100 ตัน พร้อมแท่นยึดกดให้แรงกระทำตามมาตรฐาน ASTM กำหนดให้ความเร็วในการทดสอบจะต้องอยู่ในช่วงที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติภายใน 1 ถึง 2 นาที

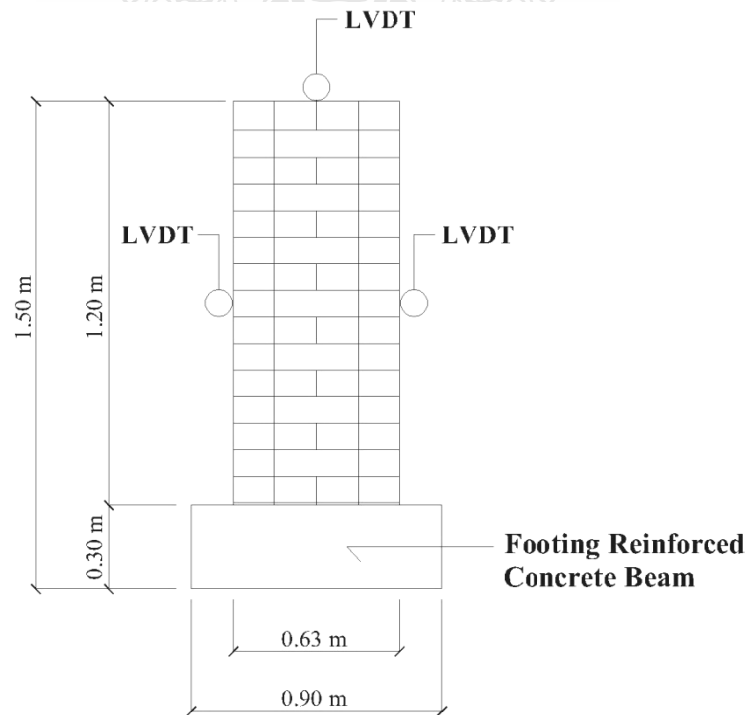
9) นำผลการทดสอบที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกดอัด และความเครียดของแต่ละผนัง



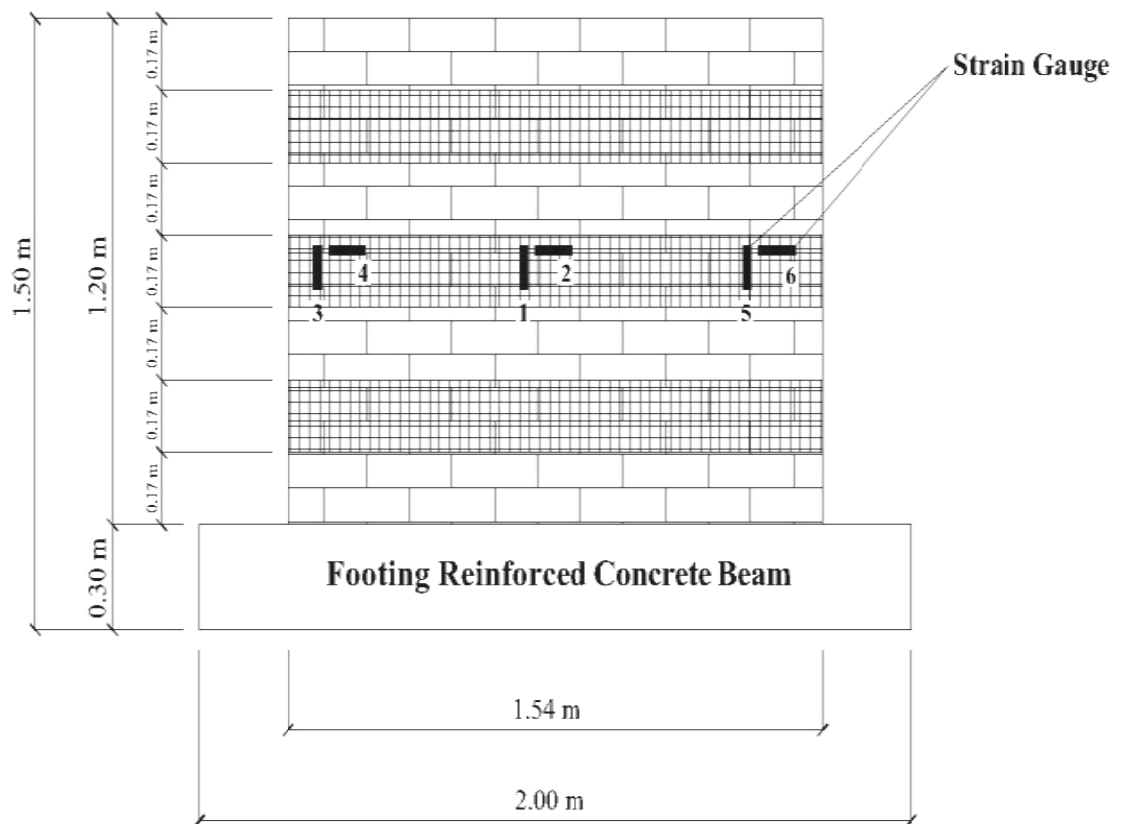
รูปที่ 3.1 ผนังอิฐก่อโบราณและตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งการติดตั้ง LVDT (Front View)

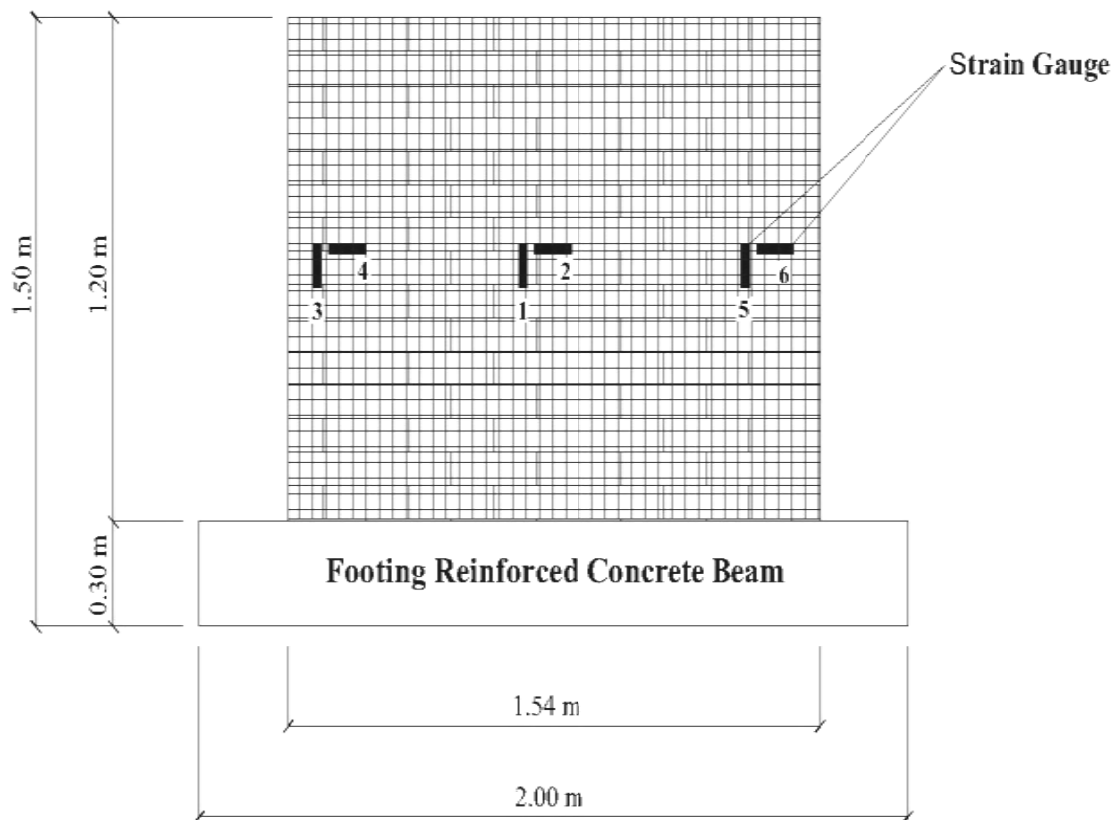


รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการติดตั้ง LVDT (Side View)



รูปที่ 3.4 ลักษณะการติดตั้ง Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) แบบ 3-stripe





รูปที่ 3.5 ลักษณะการติดตั้ง Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) แบบเต็มผนัง



บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลของอิฐโบราณ ตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบและวัสดุอเมริกัน(American Society for Testing and Materials) : ASTM C67 โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบได้ถูกจัดเก็บไว้ในส่วนของภาคผนวก

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.1 การวัดขนาด

จากการทดสอบหาขนาดของอิฐตัวอย่าง พบว่า อิฐโบราณซึ่งมาจากโรงงานแห่งเดียวกันทั้งหมด ซึ่งแต่ละก้อนมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมาก จากตัวอย่างอิฐจำนวน 10 ตัวอย่างมีขนาดเฉลี่ยความยาว 29.16 เซนติเมตร ความกว้าง 14.74 เซนติเมตร ความหนา 4.62 เซนติเมตรเป็นผลมาจากการเผาอิฐในอุณหภูมิเท่ากันจะทำให้อิฐหดตัวใกล้เคียงกัน

4.1.2 การทดสอบหาน้ำหนักของอิฐตัวอย่าง

จากการทดสอบอิฐจำนวน 10 ตัวอย่าง ได้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 0.0067 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ของอิฐแต่ละก้อนมีขนาดใกล้เคียงกัน แล้วทำการอบที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นเวลา 24 ชั่วโมงทำให้ได้ค่าน้ำหนักแห้งของอิฐตัวอย่างใกล้เคียงกัน

4.1.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำเป็นปัจจัยบ่งชี้ถึงความทนทาน (Durability) ปัจจัยหนึ่งของอิฐดินเผา เนื่องจากเป็นปัจจัยที่แสดงถึงความพรุนหรือช่องว่างของอิฐ ถ้าอิฐดินเผามีการดูดซึมน้ำมากแล้วอิฐนั้นก็มีความพรุนสูง และจะผุกร่อนจากการกระทำของสภาวะแวดล้อมและการเสียดสีได้ง่าย อิฐดินเผาที่มีการดูดซึมน้ำสูงจะเป็นอิฐที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่ำ เป็นเวลาที่ไม่นานพอที่อิฐจะสุก การทดสอบนี้มีพื้นฐานมาจากแนวความคิดที่ว่า ก้อนอิฐจะดูดซึมน้ำส่วนหนึ่งจากการที่จุ่มก้อนอิฐในน้ำเย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และก้อนอิฐจะอิมตัวด้วยน้ำเมื่อถูกต้มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากการผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก3 จะเห็นว่าอิฐมีค่าการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกัน แสดงว่าอิฐตัวอย่างถูกผลิตขึ้นมาด้วยการเผาสุกที่อุณหภูมิเท่ากัน

4.1.4 การทดสอบหาอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น

การทดสอบหาอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้นเป็นตัวชี้ถึงการดูดซึมน้ำจากปูนก่อหรือปูนฉาบของก้อนอิฐดินเผา ถ้ามีค่ามากแสดงว่าอิฐชนิดนั้นจะดูดซึมน้ำจากปูนก่อและปูนฉาบมาก ซึ่งจะมีผลทำให้การยึดติดกัน (Bond) ของอิฐแต่ละก้อนไม่ดีและก่อให้เกิดการแตกร้าวของปูนฉาบ จากการทดสอบของสถาบันอิฐแห่งสหรัฐอเมริกา (Brick Institute of America) พบว่า อิฐดินเผาจะมีการยึดติดกันโดยปูนก่อที่ดีเมื่ออัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้นของอิฐมีค่าน้อยกว่า 30 กรัม /193.55 ตารางเซนติเมตร

จากผลการทดสอบที่ได้ค่าอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้นของอิฐตัวอย่างทั้ง 5 ก้อนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 40.2 กรัม /193.55 ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่า 30 กรัม /193.55 ตารางเซนติเมตร อยู่ 14.53% ดังนั้นถ้าอิฐมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้นมากกว่าค่าดังกล่าว เราควรที่จะทำให้อิฐมีความชื้นก่อนที่จะทำการก่ออิฐ

4.1.5 การทดสอบการวัดความบิดเบี้ยว

จากผลการทดสอบได้ค่าเฉลี่ยความบิดเบี้ยวของอิฐตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่างเท่ากับ 0.41 เซนติเมตร ซึ่งจะเป็นด้านบนของก้อนอิฐที่เกิดความเว้าเป็นผลมาจากการอัดดินลงแม่แบบด้วยมือ

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล

4.2.1 ผลการทดสอบโมดูลัสแตกร้าว

จากผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก7 จะเห็นได้ว่า อิฐตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงดึงเนื่องจากการคัดหรือโมดูลัสของการแตกร้าวระหว่าง 25 – 36 MPa โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 29.98 MPa

4.2.2 ผลการทดสอบกำลังต้านแรงอัด

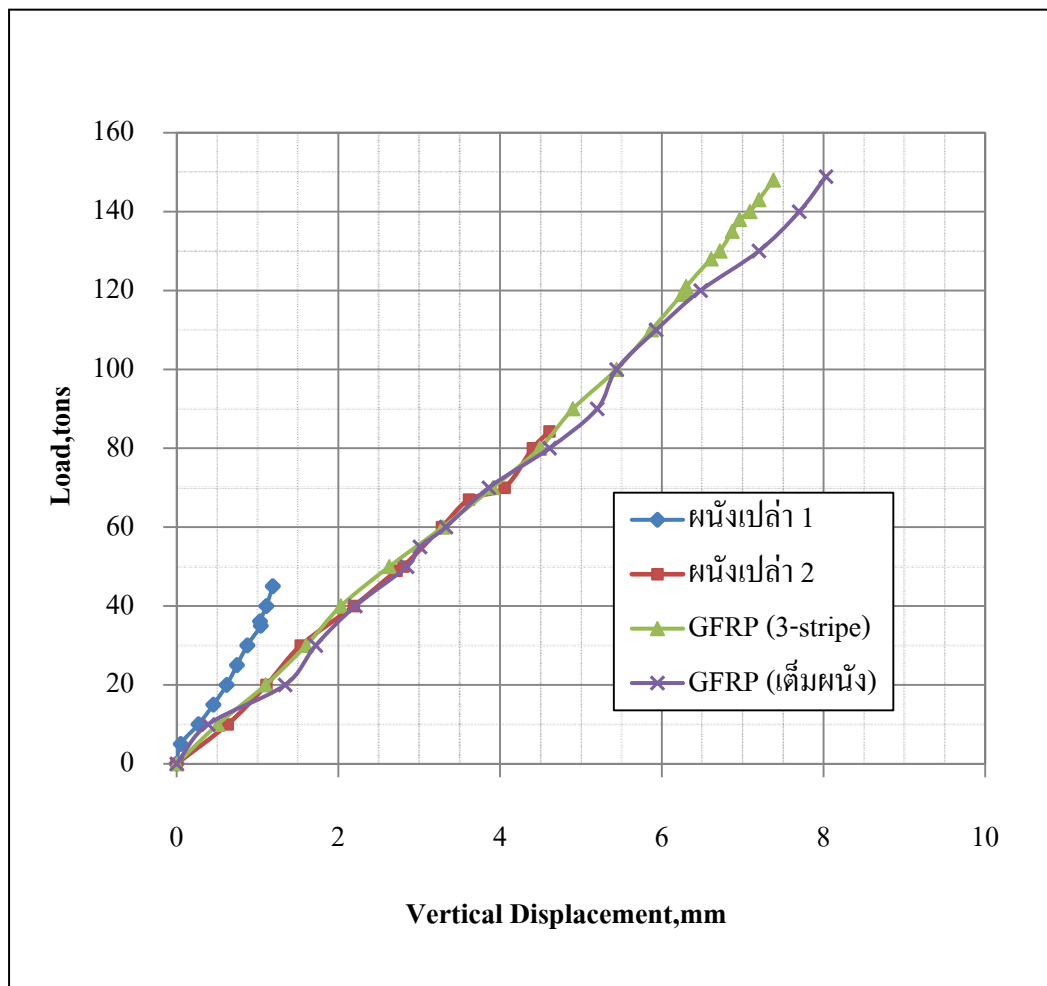
จากผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก8 จะเห็นได้ว่าอิฐตัวอย่างมีกำลังอัดเฉลี่ยเฉลี่ยอยู่ที่ 16.651 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร อิฐที่มีลักษณะตันและมีเนื้ออิฐที่แน่น จะเป็นอิฐที่มีกำลังอัดเฉลี่ยสูง ส่วนอิฐที่มีรูโพรงนั้น จะช่วยในการลดน้ำหนักของก้อนอิฐ และลดระยะเวลาในการเผาอิฐให้น้อยลง แต่ข้อเสียคือ อิฐดังกล่าวจะมีกำลังอัดเฉลี่ยที่ต่ำ

4.2.3 ผลการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของวัสดุก่อ (มอร์ต้าร์)

กำลังต้านแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 7 วันเท่ากับ 26.80 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
กำลังต้านแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 14 วันเท่ากับ 28.27 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
กำลังต้านแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 28.67 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

4.3 ผลการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ

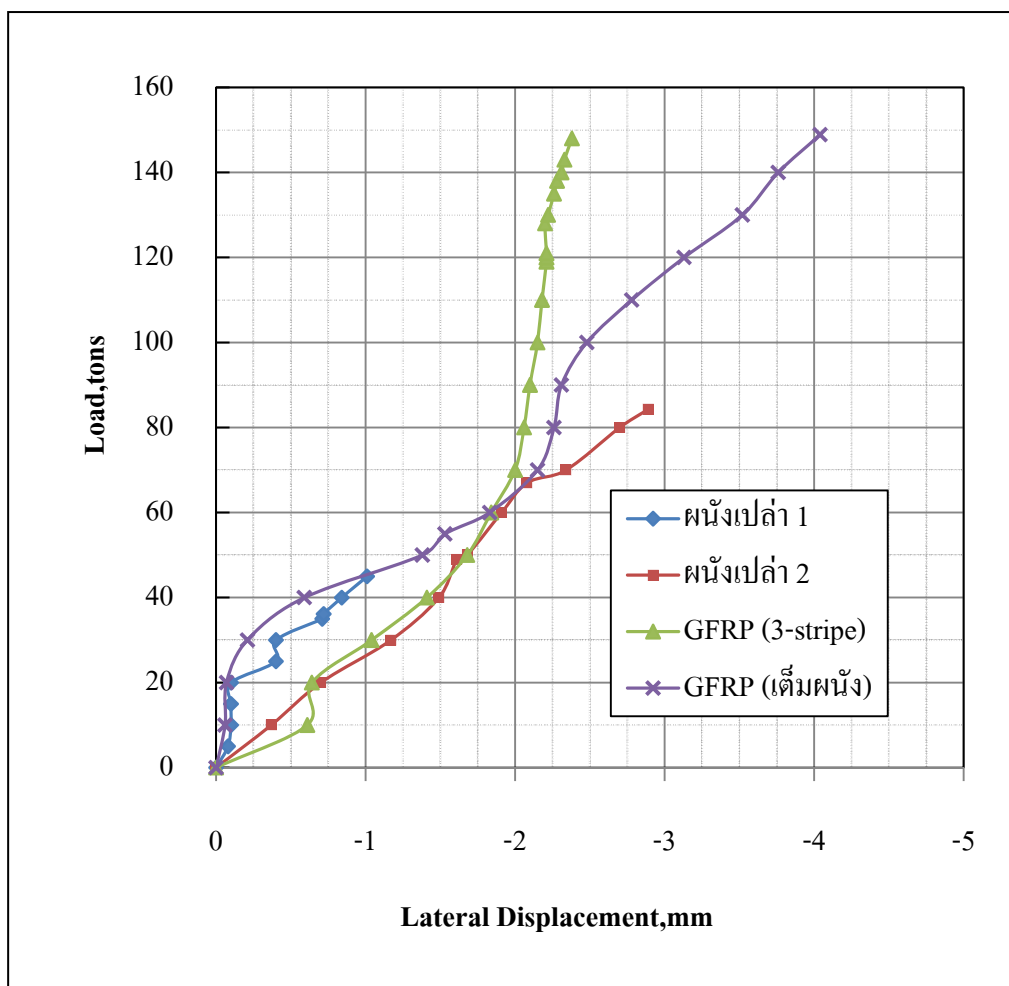
4.3.1 ติดตั้ง LVDT ด้านบนของผนัง



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Vertical Displacement

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ชัดว่าผนังที่เสริม GFRP ทั้งสองผนังสามารถรับแรงได้มากกว่าผนังเปล่าทั้งสองผนัง โดยที่ผนังเสริม GFRP แบบเต็มผนังรับแรงสูงสุดได้เท่ากับ 148.89 tons จึงเกิดการวิบัติ ส่วนค่าการยุบตัวเมื่อมีแรงมากระทำทางด้านบนมากขึ้นการยุบตัวของผนังก็มากขึ้นตามไปด้วย ผนังเสริม GFRP แบบเต็มผนังมีค่ายุบตัวสูงสุดเท่ากับ 8.03 มิลลิเมตร

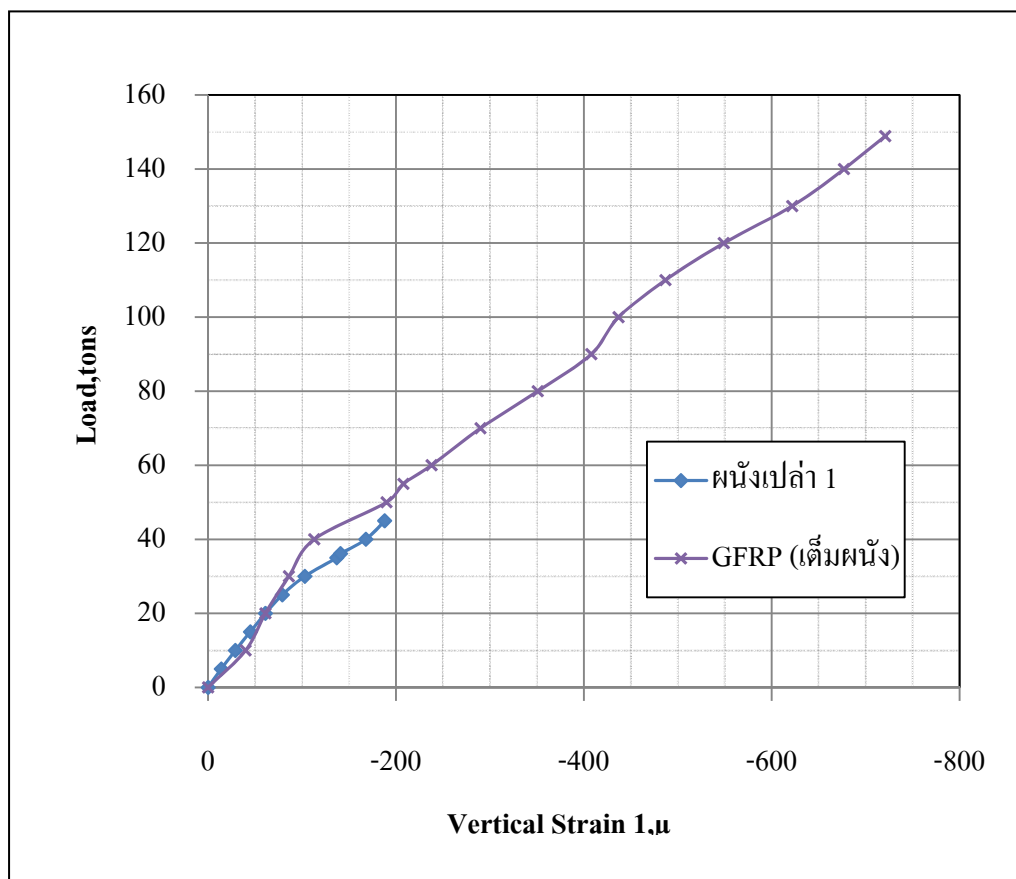
4.3.2 ติดตั้ง LVDT ด้านข้างของผนัง



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Lateral Displacement

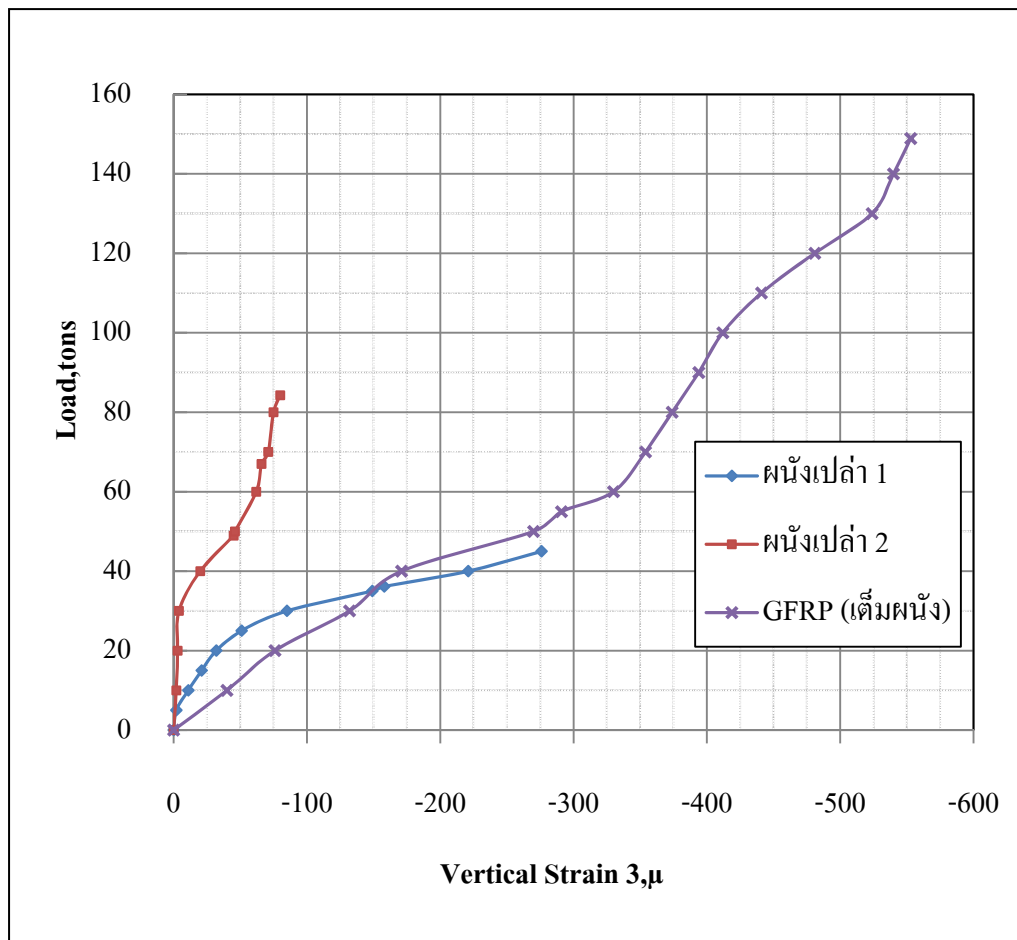
จากรูปที่ 4.2 ค่า Horizontal Displacement ติดลบแสดงว่าผนังเมื่อได้รับแรงจะเกิดการขยายตัวทางด้านข้าง ผนังที่ติด GFRP แบบเต็มผนังที่มีการรับแรงสูงสุด 148.89 tons มีการขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 4.04 มิลลิเมตร ส่วนผนังที่ติด GFRP แบบ 3-stripe รับแรงได้ 148 tons แต่การขยายตัวเท่ากับ 2.38 มิลลิเมตร แสดงว่าผนังเกิดการเสียรูปน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการติด GFRP แบบเต็มผนัง

4.3.3 ติดตั้ง strain Gauge ในแนวตั้ง



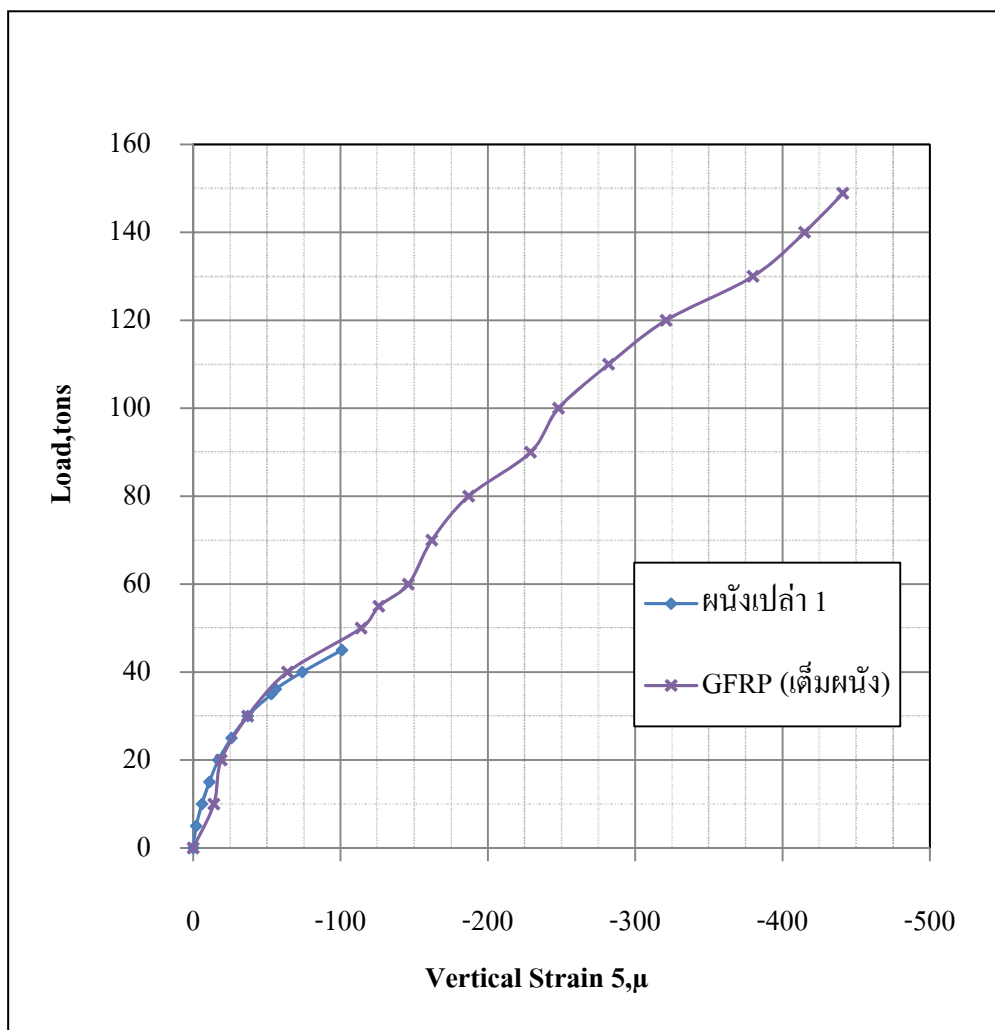
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Vertical Strain 1

จากรูปที่ 4.3 Strain Gauge เป็นตัวชี้วัดการเสีรูปของโครงสร้าง จะเห็นว่าเมื่อมีแรงมากระทำกับโครงสร้าง การติดตั้ง Strain Gauge ในแนวตั้งค่าที่ได้จะเป็นลบเนื่องจาก Strain Gauge เกิดการหดตัว Vertical Strain 1 เป็นการติดตั้งบริเวณตรงกลางของผนังจากข้อมูลที่ได้แสดงว่าผนังบริเวณนั้นมีการขยายตัว ซึ่งผนังที่เสริม GFRP แบบเต็มผนัง Vertical Strain มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 721μ เนื่องจากว่าเมื่อมีแรงมากระทำกับผนังมากขึ้นการขยายตัวของผนังก็จะมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Vertical Strain 3

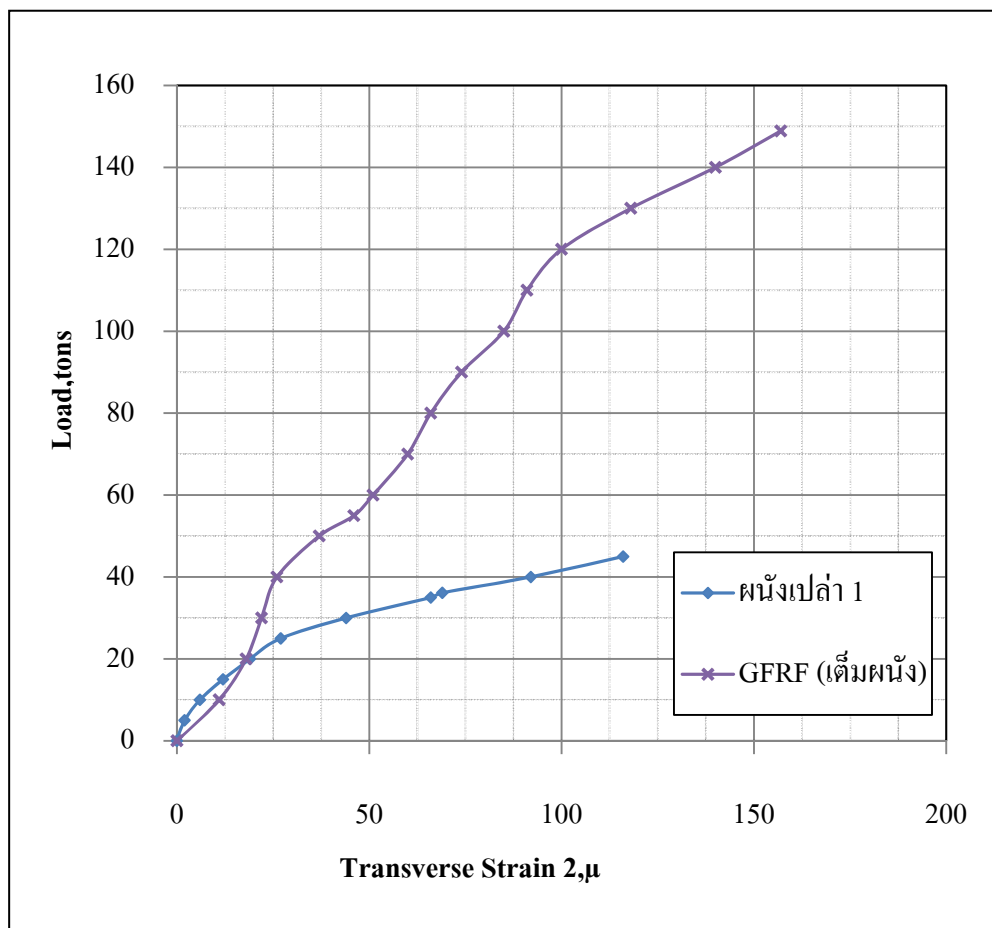
จากรูปที่ 4.4 ข้อมูลที่ได้เป็นการติดตั้ง Strain Gauge บริเวณด้านซ้ายของผนัง เมื่อมีแรงกระทำทำให้ผนังเกิดการขยายตัว ผนังที่เสริม GFRP แบบเต็มผนังมีการขยายตัวมากที่สุด ค่า Vertical Strain มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 553 μ เนื่องจากแผ่น GFRP ทำให้ผนังมีความแข็งแรงขึ้นเมื่อแรงที่กระทำมากขึ้นการขยายตัวก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Vertical Strain 5

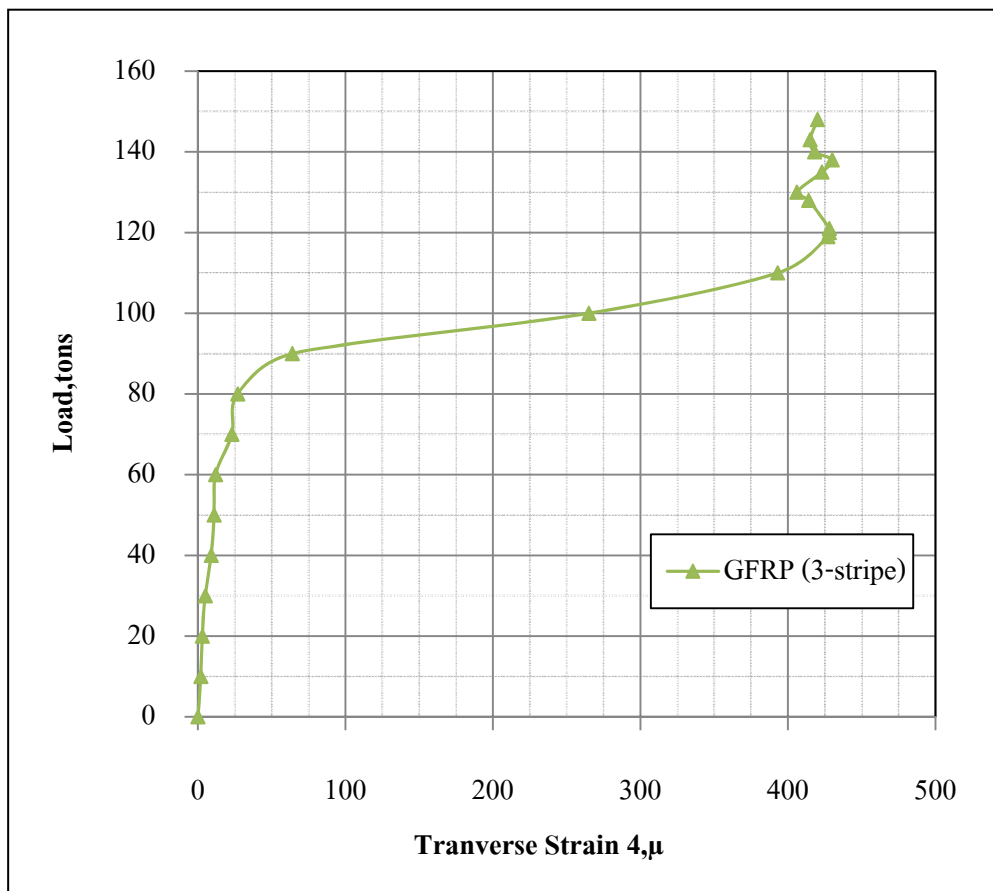
จากรูปที่ 4.5 เป็นการติด Strain Gauge บริเวณด้านขวาของผนัง จะเห็นว่าผนังอิฐก่อเมื่อรับแรงมากขึ้นการขยายตัวของผนังก็มีมากตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบผนังเปล่า 1 ผนังที่เสริม GFRP แบบเต็มผนังมีการขยายตัวมากกว่าอย่างชัดเจน เนื่องจากผนังติด GFRP ทำให้สามารถรับแรงได้มากขึ้น

4.3.4 ติดตั้ง strain Gauge ในแนวนอน



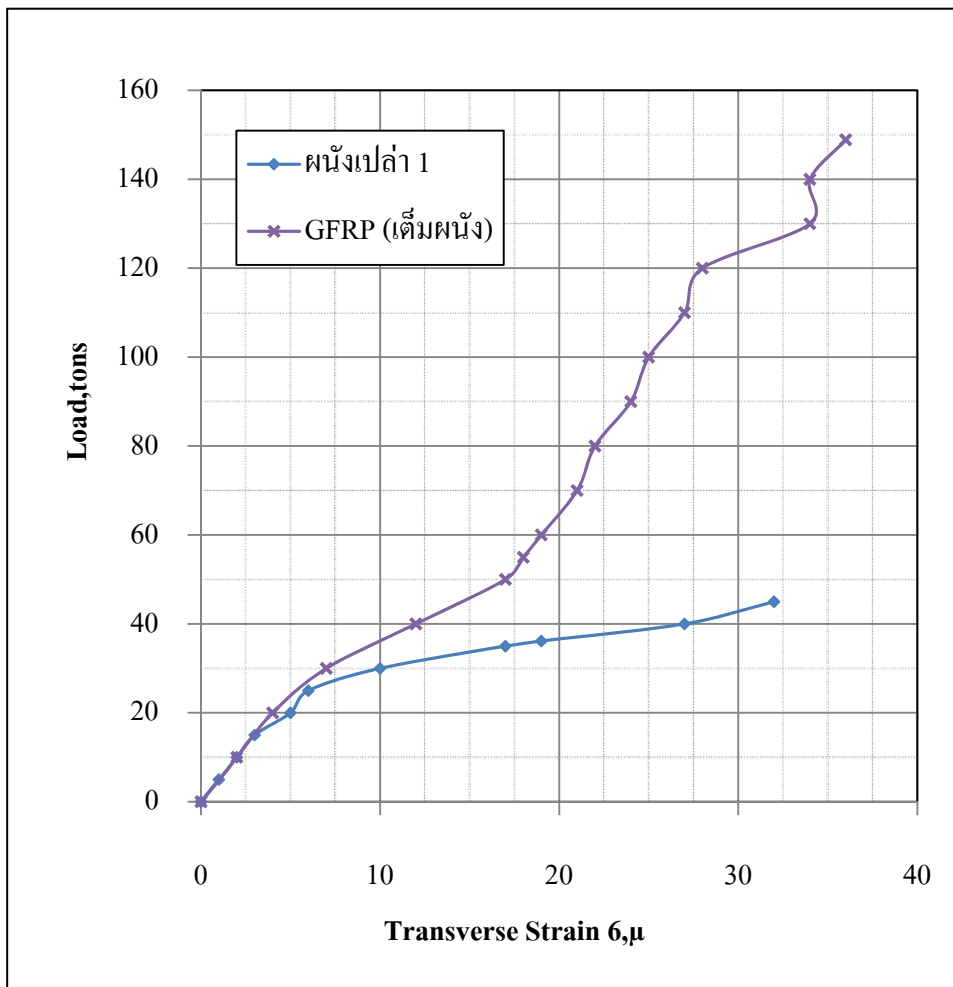
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Transverse Strain 2

จากรูปที่ 4.6 แสดงการติดตั้ง Strain Gauge ในแนวนอนบริเวณตรงกลางของผนังอิฐก่อโบราณ เมื่อรับแรงมากขึ้นจะสังเกตเห็นว่าผนังที่ติด GFRP แบบเต็มผนังจะสามารถรับแรงได้มากกว่าเมื่อเทียบกับผนังเปล่า 1 สังเกตที่ผนังทั้งสองรับแรงเท่ากันที่ 40 tons ผนังเสริม GFRP แบบเต็มผนังที่มีความแข็งแรงกว่าจะมีการขยายตัวน้อยกว่าผนังเปล่ามาก



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Transverse Strain 4

จากรูปที่ 4.7 แสดงการติดตั้ง Strain Gauge ในแนวนอนจากรูปจะเห็นว่าข้อมูลเพียงชุดเดียวคือ ผนังที่เสริม GFRP แบบ 3-stripe เนื่องจาก Strain Gauge ของผนังอื่นมีข้อมูลไม่สมบูรณ์ จากกราฟจะพบว่าผนังเสริม GFRP แบบ 3-stripe จะขยายตัวเล็กน้อยในช่วง 80 tons แรกและจะขยายตัวมากขึ้นในช่วง 80-120 tons และหลังจากนั้นจะขยายตัวเล็กน้อยเหมือนในช่วงแรก ซึ่งเกิดจากลักษณะการติดตั้ง GFRP แบบ 3-stripe จึงทำให้การขยายตัวในแต่ละช่วงไม่สัมพันธ์กัน



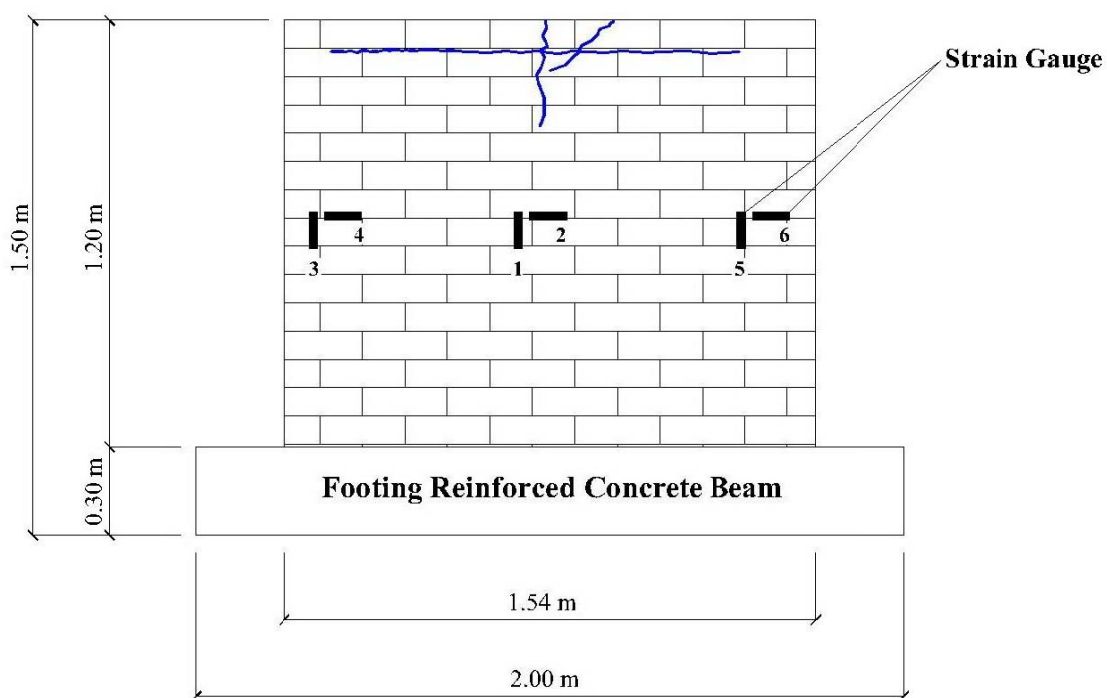
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Transverse Strain ϵ

จากรูปที่ 4.8 ผนังที่เสริม GFRP แบบเต็มผนังเมื่อได้รับแรงสูงสุดการขยายตัวมีค่าเท่ากับ 36μ ส่วนผนังเปล่า 1 ขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 32μ สังเกตได้ว่าการขยายตัวของผนังทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าบริเวณที่ติด Strain Gauge นั้นมีความแข็งแรงมาก

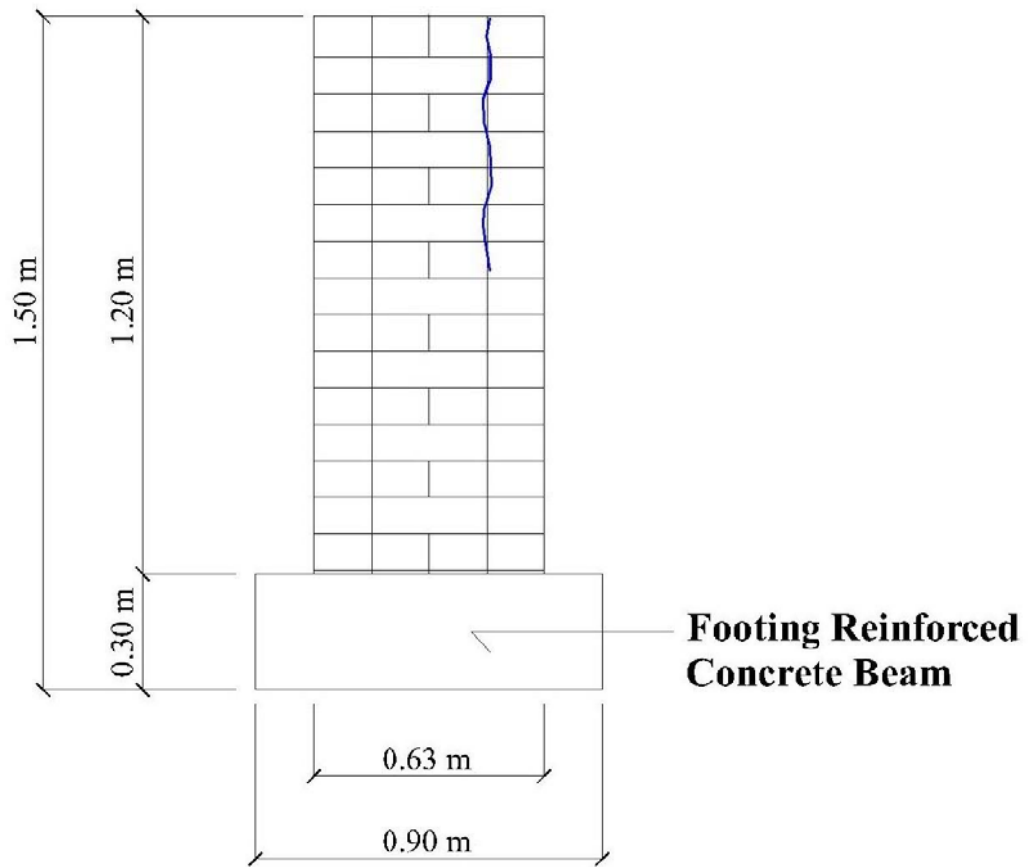
4.3.5 การ Crack ของผนัง



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการ Crack ของผนังเปล่า 1



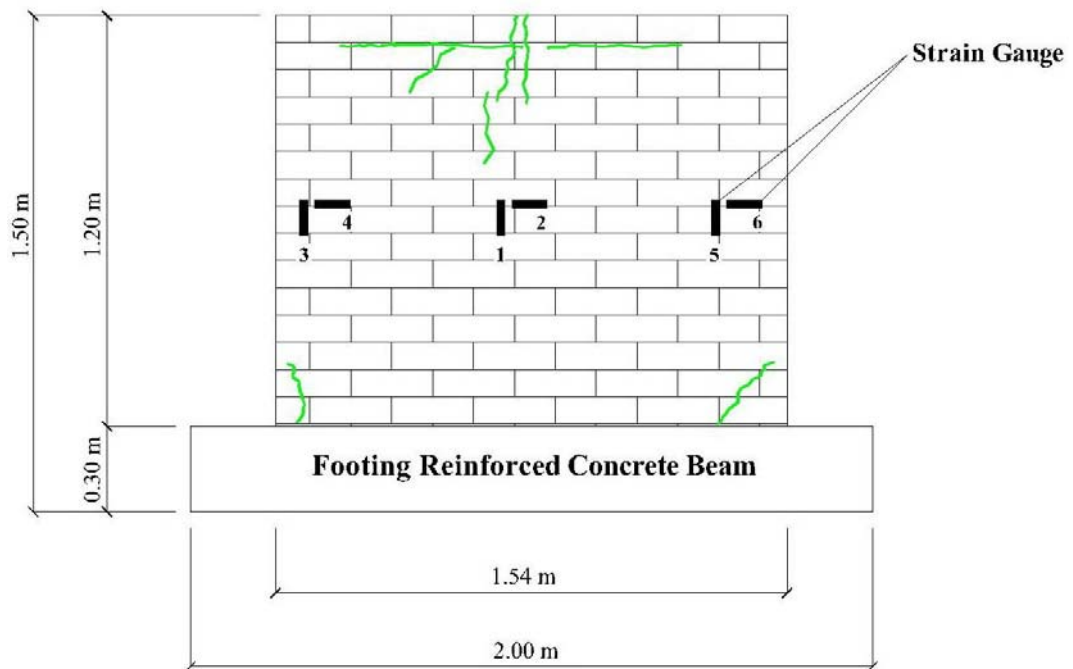
รูปที่ 4.10 การ Crack ของผนังเปล่า 1 (Front View)



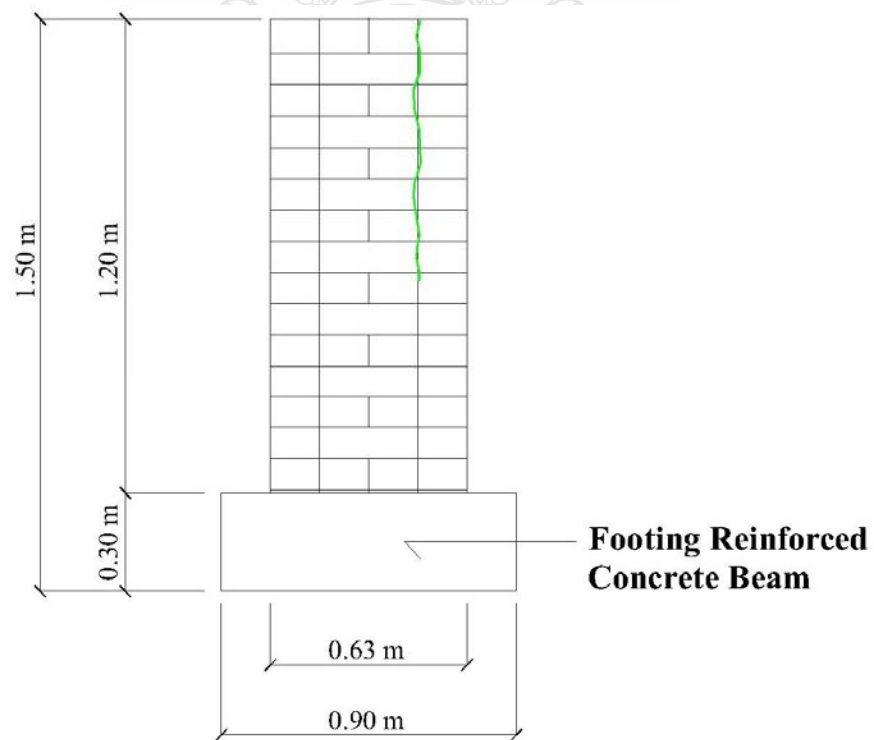
รูปที่ 4.11 การ Crack ของผนังเปล่า 1 (Side View)



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการ crack ของผนังเปล่า 2



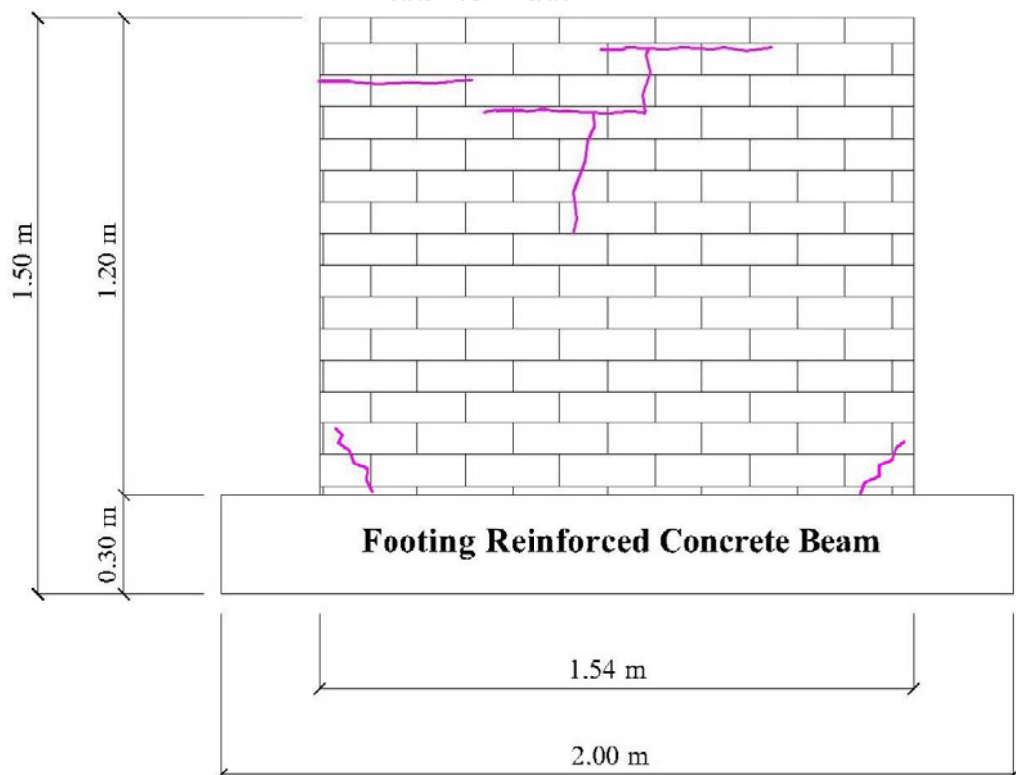
รูปที่ 4.13 การ Crack ของผนังเปล่า 2 (Front View)



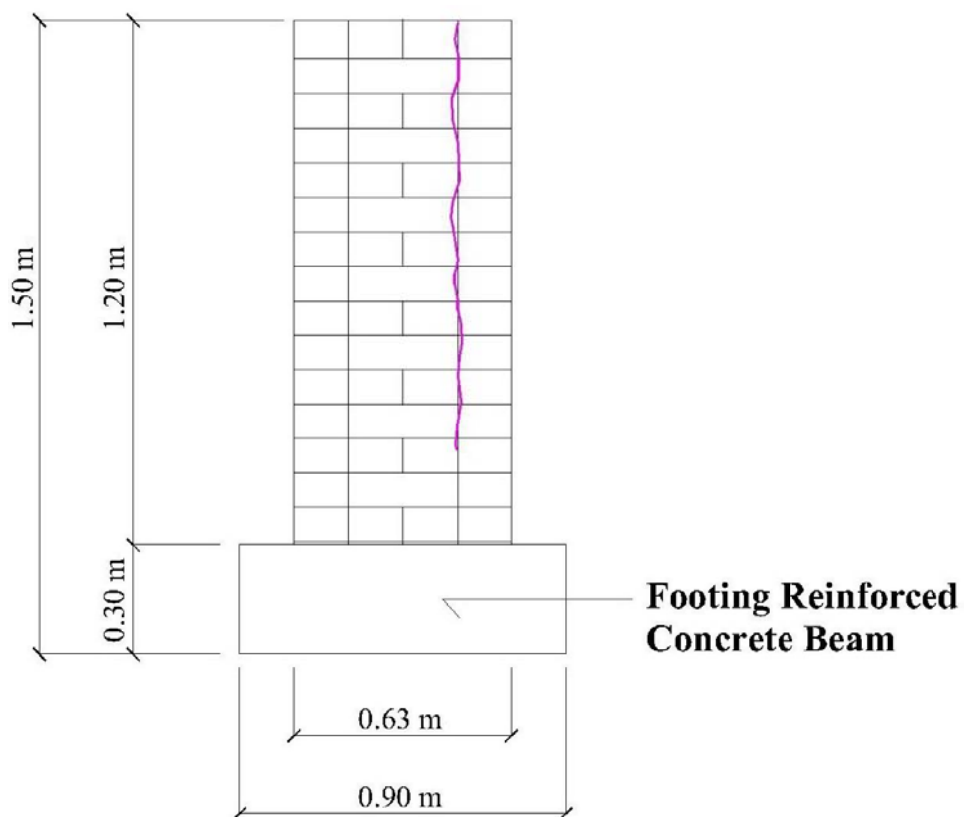
รูปที่ 4.14 การ Crack ของผนังเปล่า 2 (Side View)



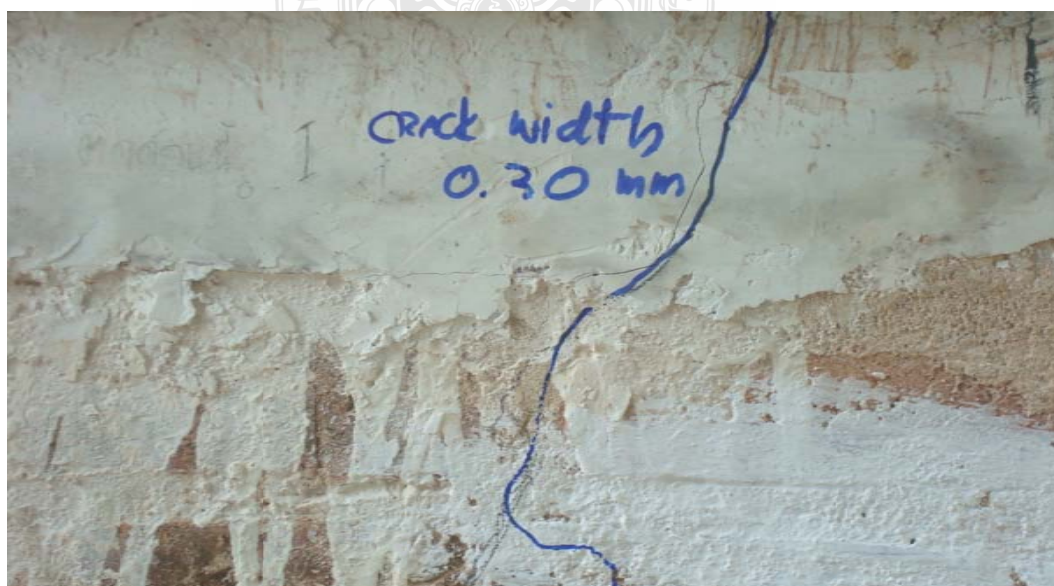
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างการ crack ของผนังเสริม GFRP (3-stripe)



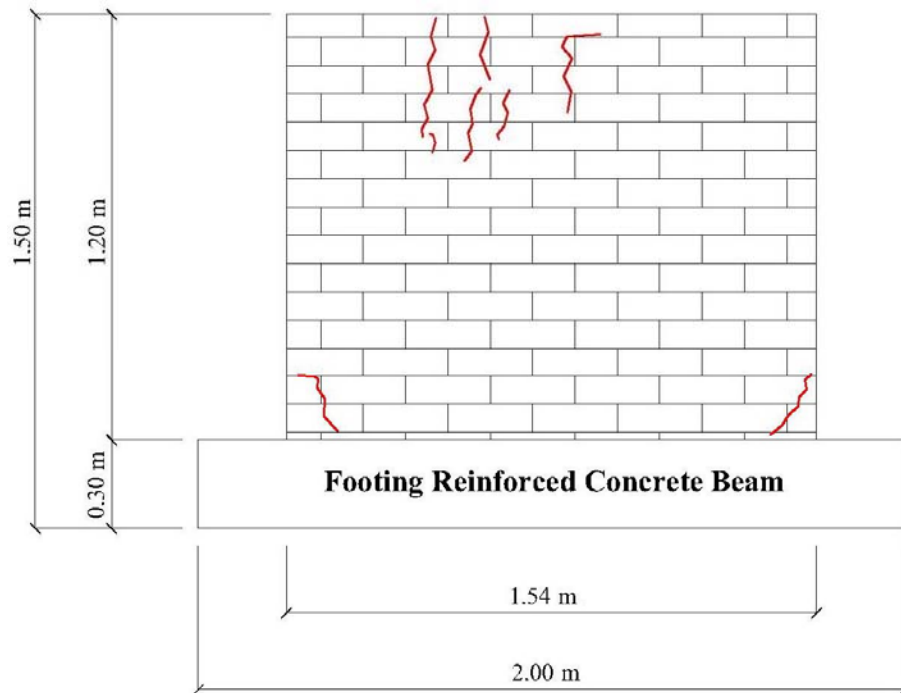
รูปที่ 4.16 การ Crack ของผนังเสริม GFRP แบบ 3-stripe (Front View)



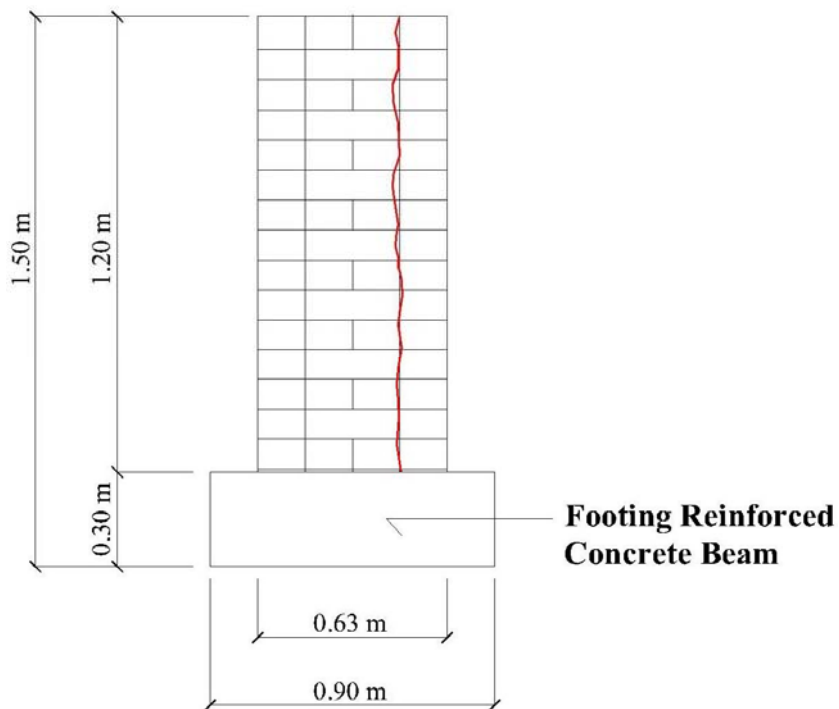
รูปที่ 4.17 การ Crack ของผนังเสริม GFRP แบบ 3-stripe (Side View)



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการ Crack ของผนังเสริม GFRP แบบเต็มผนัง



รูปที่ 4.19 การ Crack ของผนังเสริม GFRP แบบเต็มผนัง (Front View)



รูปที่ 4.20 การ Crack ของผนังเสริม GFRP แบบเต็มผนัง (Side View)

การ crack ของผนังเปล่าทั้งสองส่วนใหญ่จะเกิดรอย crack บริเวณรอยต่อของอิฐและจะเกิดบริเวณด้านบนลงมาเนื่องจากการได้รับแรงกระทำทางด้านบน ขนาดของรอย crack จะกว้างเมื่อสังเกตจากทางด้านข้างของผนัง รอย crack มีความยาวไม่มากนักเนื่องจากผนังรับแรงที่กระทำได้แค่ 45 tons จึงเกิดการวิบัติ

สำหรับการ crack ของผนังที่เสริม GFRP รอย crack จะมีขนาดความกว้างน้อยกว่าผนังที่เปล่ามาก และจะเป็นลักษณะการ crack ที่ไม่ต่อเนื่องคือจะมีการกระจายตำแหน่งการ crack ไปตามจำนวนแรงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่วนลักษณะการ crack ที่สังเกตได้จากทางด้านข้างของผนังจะมีความยาวมากเนื่องจากผนังที่มีการเสริม GFRP มีความสามารถในการรับแรงได้สูงมากจึงทำให้รอย crack มีความยาวเพิ่มขึ้นตามแรงที่กระทำจนผนังรับแรงได้สูงสุดหรือเกิดการวิบัตินั่นเอง

4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ผนังเปล่าที่ไม่ได้เสริม GFRP รับแรงได้น้อยมาก อาจเป็นเพราะปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง เช่น อิฐแต่ละก้อนมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน การเว้นช่องระหว่างอิฐกับมอร์ตาร์ไม่เท่ากัน เป็นต้น ทำให้ความสามารถในการรับแรงไม่ดีพอและการเสียดสีของผนังหรือการ crack ของผนังเปล่าที่มีขนาดกว้างทำให้การยึดเกาะระหว่างอิฐเสียไปทำให้ผนังเกิดการวิบัติง่ายยิ่งขึ้น

สำหรับผนังที่เสริม GFRP ซึ่งแผ่น GFRP มีความสามารถในการรับแรงดึงสูง เมื่อมีแรงมากระทำด้านบนทำให้ผนังเกิดการขยายตัวในบริเวณด้านข้างได้มาก ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Vertical Strain และ Load กับ Transverse Strain เมื่อเปรียบเทียบผนังอิฐก่อเสมือนโบราณสถาน หากต้องมีการซ่อมแซมโบราณสถาน การใช้วัสดุ GFRP เป็นอีกวิธีหนึ่งในหลายๆวิธีที่ใช้ในการซ่อมแซม โดยการทดสอบในครั้งนี้ ได้ทำการเสริม GFRP ทั้ง 2 แบบ ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการนำวัสดุ GFRP มาใช้ในโครงสร้างซึ่งมีข้อดี-ข้อเสียต่างกันดังนี้ ข้อดีของการเสริม GFRP แบบ 3-stripe

- 1) ความสามารถในการรับแรงสูง
- 2) มีความประหยัดเนื่องจากใช้แผ่น GFRP ในปริมาณน้อย
- 3) สะดวกต่อการนำมาใช้กับโครงสร้าง เนื่องจากไม่ต้องปรับแต่งพื้นผิวของโครงสร้าง

ทั้งหมด

ส่วนการเสริม GFRP แบบเต็มผนังสามารถทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงขึ้นและมีการขยายตัวบริเวณที่เสริม GFRP ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่มีข้อเสียคือ

- 1) ใช้แผ่น GFRP ในปริมาณมากทำให้สิ้นเปลืองมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการติดแบบ 3-stripe ซึ่งมีความสามารถในการรับแรงที่ใกล้เคียงกัน
- 2) ต้องปรับแต่งพื้นผิวของโครงสร้างทั้งหมดทำให้เสียเวลาในการซ่อมแซม



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การเปรียบเทียบพฤติกรรมของผนังอิฐโบราณภายใต้แรงกระทำด้านบน ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของอิฐโบราณและศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐที่ได้จากการทดสอบในรูปแบบต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการนำอิฐโบราณมาใช้ในงานโครงสร้างหรือการซ่อมแซมโบราณสถาน

5.1 สรุป

อิฐโบราณสถาน

อิฐที่นำมาใช้ในการทดสอบเปรียบเสมือนอิฐโบราณที่ใช้ในการทำโบราณสถาน ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับอิฐโบราณ ซึ่งคุณสมบัติของอิฐที่คืนนั้นจะต้องเป็นอิฐที่มาจากแหล่งผลิตเดียวกัน มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน นอกจากนี้คุณสมบัติทางกลของอิฐก็มีส่วนสำคัญ อิฐที่มีกำลังอัดประลัยสูงแสดงว่าเป็นอิฐเนื้อแน่นและคืนเหมาะสำหรับนำมาใช้ในงานโครงสร้าง

พฤติกรรมของผนังอิฐโบราณภายใต้แรงกระทำด้านบน

ผนังอิฐก่อโบราณแบบผนังเปล้าทั้งสองผนัง พฤติกรรมที่เกิดขึ้นคือ เมื่อมีแรงมากระทำด้านบนก็จะทำให้ผนังเกิดการยุบตัวและจะเกิดการขยายตัวขึ้นบริเวณด้านข้างของผนังแต่ความสามารถในการรับแรงน้อยมากซึ่งรับได้สูงสุดเท่ากับ 84.27 tons

พฤติกรรมของผนังอิฐโบราณเสริม Fiber Reinforce Polymer (FRP) แบบ 3-stripe

เมื่อผนังได้รับแรงพฤติกรรมของผนังจะเหมือนกับผนังเปล้าคือเกิดการยุบตัวตามแนวแรงและเกิดการขยายตัวที่บริเวณด้านข้าง แต่ที่แตกต่างก็คือความสามารถในการรับแรงของผนังเมื่อเสริม GFRP แล้วสามารถรับแรงได้ถึง 148.00 tons การขยายตัวของผนังจะน้อยกว่าการติดแบบเต็มผนัง

พฤติกรรมของผนังอิฐโบราณเสริม Fiber Reinforce Polymer (FRP) แบบเต็มผนัง

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการติดตั้ง FRP ให้กับโครงสร้างจะทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงขึ้นผลที่ได้จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีแรงมากระทำกับผนังพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะเป็นการยุบตัวตามแนวแรงที่กระทำและเกิดการขยายตัวทางด้านข้าง สามารถรับแรงได้ถึง 148.89 tons ซึ่งมากกว่าผนังที่ใช้ทดสอบในรูปแบบอื่นๆ

เปรียบเทียบรูปแบบการนำวัสดุ GFRP มาใช้กับผนัง

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า การนำวัสดุ GFRP มาใช้ในงานโครงสร้างจะทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น จากการทดสอบในครั้งนี้สรุปได้ว่า รูปแบบการติดวัสดุ GFRP แบบ 3-stripe เป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับโครงสร้าง เนื่องจากมีความสามารถในการรับแรงได้สูง เมื่อเทียบกับการติดแบบเต็มผนัง อีกทั้งยังไม่สิ้นเปลืองวัสดุ GFRP และสะดวกต่อการติดตั้งกับโครงสร้าง

5.2 ข้อเสนอแนะ

อิฐที่นำมาใช้ในการทดสอบควรจะต้องมาจากแหล่งผลิตที่เดียวกันทั้งหมด ซึ่งคุณสมบัติต่างๆของอิฐจะมีลักษณะคล้ายกัน อีกทั้งยังต้องมีการควบคุมมาตรฐานในการผลิตทุกขั้นตอนเพื่อจะได้ก้อนอิฐที่มีคุณสมบัติที่ได้มาตรฐาน

ศึกษาวิธีการก่ออิฐตามมาตรฐานกำหนด และควบคุมปัจจัยต่างๆที่จะส่งผลกระทบต่อผนังอิฐก่อ เช่น ขนาดของก้อนอิฐที่นำมาก่อควรทำการตัดแต่งให้มีขนาดเท่ากัน ตรวจสอบสภาพอากาศและอุปกรณ์ที่ใช้ก่อนปฏิบัติงานทุกครั้ง

ศึกษาลักษณะของวัสดุคอมโพสิตที่จะนำมาใช้กับการทดสอบจากผู้ผลิตให้เข้าใจ

การทำงานกับทุกส่วนประกอบของระบบ FRP ต้องกระทำด้วยความระมัดระวังโดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุยึดประสานและเรซิน เพื่อหลีกเลี่ยงอันตราย เช่น ผิวหนังระคายเคือง หรือสูดเอาไอระเหยหรือฝุ่นเข้าไป

strain gauge เป็นอุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อนมาก ซึ่งจะไวต่อข้อบกพร่องซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นในการติดตั้ง ดังนั้นการติดตั้ง strain gauge จึงต้องใช้ความละเอียดรอบครอบเป็นอย่างยิ่งในขั้นตอนของการติดตั้ง

บรรณานุกรม

- [1] ชาติชาย ร่มศักดิ์. 2539. การศึกษาวิวัฒนาการองค์ประกอบและการใช้ประโยชน์ของดินเพื่อการตั้งถิ่นฐานในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา. พระนครศรีอยุธยา : สำนักงาน โบราณคดีและพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติที่ 3.
- [2] สุดชาย พานสุวรรณ. 2543. “ การวิเคราะห์โบราณสถานก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] สมชาติ จึงศิริอารักษ์. การอนุรักษ์อาคารโครงสร้างและวัสดุของโบราณสถาน. เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 262-470 การอนุรักษ์อาคารทางประวัติศาสตร์และโบราณสถาน 2. มหาวิทยาลัยศิลปากร : 2540
- [4] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. 2535. มาตรฐานอาคารวัสดุก่อ. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2517. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐก่อสร้างสามัญ มอก.77 – 2517. ม.ป.ท.
- [6] ธรรมชาติ กุลประภา. 2551. “ข้อควรระวังในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Plastic Composite).” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, 2551. พฤษภาคม : 1-6.
- [7] ธรรมชาติ กุลประภา. 2552. “การใช้พลาสติกเสริมเส้นใยแบบต่อเนื่อง (FRP).” การอบรมของสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2552. กรกฎาคม : 12-26
- [8] สิทธิชัย แสงอาทิตย์. 2547. “การเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย.” วิศวกรรมสาร. ปีที่ 57. ฉบับที่ 673 (กุมภาพันธ์) : 42-45
- [9] สิทธิชัย แสงอาทิตย์. 2542. “ การทดสอบและพัฒนาโครงสร้างอิฐก่อ (Testing and Development of Brick Masonry Structure).” รายงานการวิจัย สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- [10] ชรรษชาติ กุลประภา. 2552. “การใช้พลาสติกเสริมเส้นใยแบบต่อเนื่อง (FRP) ในการซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้าง รุ่นที่ 2.” การอบรมของสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2552. กรกฎาคม : 43-62
- [11] Gero Marzahn1. 1996. **Improving the Shear Bond Behavior of Masonry.** [Online] Available: http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer01/l01_17.pdf (20 February 2010).
- [12] H. MAHMOOD, A. P. RUSSELL, and J. M. INGHAM. 2007. **LABORATORY TESTING OF UNREINFORCED MASONRY WALLS RETROFITTED WITH GLASS FRP SHEETS.** [Online] Department of Civil & Environmental Engineering The University of Auckland Auckland, New Zealand, Available : [http:// www. retrofitsolutions. org.nz/pdfs/Russell%20-%20PCEE%20\(2007\).pdf](http://www.retrofitsolutions.org.nz/pdfs/Russell%20-%20PCEE%20(2007).pdf) (20 February 2010)
- [13] M.A. Haroun, A.S. Mosallam, and K.H. Allam. n.d. **Cyclic in-Plane Shear of Concrete Masonry Walls Strengthened by FRP Laminates.** [Online] Available: [http://www. quakewrap. com/frp%20papers/CyclicInPlaneShearofConcreteMasonryWallsStrengthenedby FRPLaminates.pdf](http://www.quakewrap.com/frp%20papers/CyclicInPlaneShearofConcreteMasonryWallsStrengthenedbyFRPLaminates.pdf) (20 February 2010).



ภาคผนวก ก
ตารางผลการทดสอบอิฐโบราณ

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบการวัดขนาด

อิฐ	ความยาว(cm)					ความกว้าง(cm)					ความหนา(cm)				
	1	2	3	4	Avg.	1	2	3	4	Avg.	1	2	3	4	Avg.
1	29.00	29.20	29.20	29.30	29.18	14.30	14.50	14.80	15.00	14.65	4.80	4.50	4.50	4.50	4.58
2	29.20	29.00	28.70	28.70	28.90	15.00	14.80	14.50	14.50	14.70	4.80	4.50	4.70	4.70	4.68
3	29.00	29.00	28.80	28.80	28.90	14.70	14.80	14.80	14.60	14.73	4.60	4.60	4.50	4.60	4.58
4	29.40	29.30	29.00	29.20	29.23	14.80	15.00	14.50	14.80	14.78	4.90	4.80	5.00	4.50	4.80
5	29.30	29.40	29.10	29.00	29.20	14.90	14.80	14.90	14.80	14.85	4.70	4.60	4.80	4.80	4.73
6	29.00	29.00	29.10	29.20	29.08	14.80	14.80	14.70	14.70	14.75	4.60	4.70	4.60	4.40	4.58
7	29.30	29.00	28.80	29.10	29.05	14.80	14.70	14.80	14.90	14.80	4.30	4.30	4.10	4.10	4.20
8	29.40	29.40	29.50	29.50	29.45	14.80	14.60	14.70	14.80	14.73	4.60	4.60	4.70	4.70	4.65
9	29.40	29.30	29.00	28.90	29.15	14.50	14.60	14.70	14.50	14.58	4.70	4.50	4.60	4.90	4.68
10	29.50	29.50	29.40	29.50	29.48	14.80	14.80	14.90	14.90	14.85	4.70	4.60	4.80	4.90	4.75
Avg.	29.16					14.74					4.62				

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบการหาน้ำหนักของอิฐตัวอย่างโดยการอบแห้ง

อิฐตัวอย่าง	พื้นที่	อบ 24 ชม.	อบต่ออีก 2 ชม.	น้ำหนักแห้ง	น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่
	cm ²	kg	kg	kg	kg/cm ²
1	427.34	2.8899	2.8895	2.8895	0.0068
2	424.83	3.0005	2.9994	2.9994	0.0071
3	425.70	2.7968	2.7964	2.7964	0.0066
4	432.02	3.1341	3.1340	3.1340	0.0073
5	433.62	2.9602	2.9508	2.9508	0.0068
6	428.29	2.7834	2.7829	2.7829	0.0065
7	429.94	2.5423	2.5417	2.5417	0.0059
8	433.80	3.1058	3.1049	3.1049	0.0072
9	425.01	2.8493	2.8490	2.8490	0.0067
10	437.78	2.9416	2.9415	2.9415	0.0067
					Avg. 0.0067

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำโดยวิธีการแช่น้ำ

อิฐตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนแช่น้ำ kg	น้ำหนักหลังแช่น้ำ 24 ชม. kg	ค่าการดูดซึมน้ำ %
1	3.1378	3.5852	14.26
2	3.0592	3.6570	19.54
3	3.0371	3.4376	13.19
4	3.1439	3.7986	20.82
5	3.0958	3.6357	17.44
Average			17.05

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำโดยวิธีการต้มเดือดแบบ 2 ชั่วโมง

อิฐตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนต้ม kg	น้ำหนักหลังต้ม kg	ค่าการดูดซึมน้ำ %
1	3.1378	3.7148	18.39
2	3.0592	3.7696	23.22
3	3.0371	3.5490	16.85
4	3.1439	3.9231	24.78
5	3.0958	3.7608	21.48
Average			20.95

ตารางผนวกที่ ก5 ผลการทดสอบการวัดความบิดเบี้ยว

อิฐตัวอย่าง	ความเว้า (cm)
1	0.5
2	0.2
3	0.4
4	0.6
5	0.4
6	0.5
7	0.4
8	0.3
9	0.4
10	0.4
Avg.=0.41	

ตารางผนวกที่ ก6 ผลการทดสอบการอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น

อิฐตัวอย่าง	ความยาว cm	ความกว้าง cm	พื้นที่ cm ²	น้ำหนักอิฐ ก่อนแช่น้ำ kg	น้ำหนักอิฐหลัง แช่น้ำ kg	น้ำหนักของน้ำที่ถูก ดูดซึม * kg/193.55 cm ²
1	29.62	14.75	436.90	2.9222	2.9999	0.0344
2	29.45	14.58	429.38	3.1244	3.1899	0.0295
3	29.34	14.67	430.42	3.0895	3.1997	0.0496
4	29.05	14.84	431.10	3.1216	3.2415	0.0538
5	29.15	14.75	429.96	3.0400	3.1151	0.0338
Average						0.0402

* ค่าที่ได้เป็นค่าน้ำหนักที่ถูกดูดซึมบนพื้นที่ 193.55 cm²

ตารางผนวกที่ ก7 ผลการทดสอบโมดูลัสแตกร้าว

อิฐตัวอย่าง	ความกว้าง cm	ความหนา cm	แรงกดสูงสุด kg	โมดูลัสแตกร้าว MPa
1	14.65	4.58	1329.7	16.23
2	14.70	4.68	1107.6	12.90
3	14.73	4.58	1163.5	14.12
4	14.78	4.80	1274.8	14.04
5	14.85	4.73	1565.0	17.66
Average				14.99

ตารางผนวกที่ ก8 ผลการทดสอบกำลังต้านแรงอัด

อิฐตัวอย่าง	พื้นที่ * cm ²	แรงกระทำสูงสุด kg	กำลังอัดประลัย kg/cm ²
1	451.5	17380	38.494
2	451.5	18700	41.417
3	451.5	16430	36.390
4	451.5	17420	38.583
5	451.5	16280	36.058
Average			38.188

* พื้นที่ในตารางผนวกมาจากการปรับผิวด้วยก้ามะถันโดยใช้บล็อกขนาด 30×15.05 ซม. ทั้งสองด้าน

ตารางผนวกที่ ก9 ผลการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของมอร์ต้า

จำนวนวันในการบ่ม	แรงกระทำสูงสุด (kg)				พื้นที่ (cm ²)	กำลังอัด เฉลี่ย (kg/cm ²)
	1	2	3	เฉลี่ย		
7 วัน	630	670	710	670.00	25	26.80
14 วัน	690	720	710	706.67	25	28.27
28 วัน	700	720	730	716.67	25	28.67



ตารางผนวกที่ ก10 ผลการทดสอบผนังอิฐก่อผนังเปล่า 1

Load (tons)	Strain Guage No. (μ)						Dial Guage No. (mm)					(7+8)/2	(9-11)/2	Crack	Remark
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11					
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
5.00	-14.00	2.00	-2.00	-2.00	-2.00	1.00	0.10	0.00	-0.08	0.02	0.050	-0.050			
10.00	-29.00	6.00	-11.00	-3.00	-6.00	2.00	0.34	0.20	-0.10	0.04	0.270	-0.070			
15.00	-45.00	12.00	-21.00	-5.00	-11.00	3.00	0.57	0.34	-0.10	0.04	0.455	-0.070			
20.00	-61.00	19.00	-32.00	-4.00	-17.00	5.00	0.76	0.48	-0.10	0.04	0.620	-0.070			
25.00	-79.00	27.00	-51.00	-5.00	-26.00	6.00	0.87	0.62	-0.40	0.04	0.745	-0.220			
30.00	-103.00	44.00	-85.00	-4.00	-37.00	10.00	1.08	0.67	-0.40	0.04	0.875	-0.220			
35.00	-137.00	66.00	-149.00	-1.00	-53.00	17.00	1.34	0.74	-0.71	0.15	1.040	-0.430			
36.14	-141.00	69.00	-158.00	-3.00	-56.00	19.00	1.33	0.73	-0.72	0.17	1.030	-0.445	1 st Crack		
40.00	-168.00	92.00	-221.00	-5.00	-74.00	27.00	1.52	0.70	-0.84	0.28	1.110	-0.560			
45.00	-188.00	116.00	-276.00	-11.00	-101.00	32.00	1.69	0.69	-1.01	0.28	1.190	-0.645	2 nd Crack	Fail	

ตารางผนวกที่ ก11 ผลการทดสอบผนังอิฐก่อผนังเปล่า 2

Load (tons)	Strain Guage No. (μ)						Dial Guage No. (mm)					(7+8)/2	(9-11)/2	Crack	Remark
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
10.00	-11.00	-3.00	-2.00	2.00	-	-2.00	0.75	0.51	-0.37	0.12	0.630	-0.245			
20.00	-17.00	-4.00	-3.00	2.00	-	-3.00	1.26	0.96	-0.70	0.32	1.110	-0.510			
30.00	-26.00	-4.00	-4.00	5.00	-	-5.00	1.71	1.36	-1.17	0.45	1.535	-0.810			
40.00	-35.00	-5.00	-20.00	7.00	-	-8.00	2.35	2.03	-1.49	0.63	2.190	-1.060		S.Gauge	
48.96	-41.00	-5.00	-45.00	1.00	-	-10.00	2.87	2.57	-1.61	0.63	2.720	-1.120	1 st Crack	No.5	
50.00	-41.00	-5.00	-46.00	2.00	-	-11.00	2.96	2.65	-1.68	0.63	2.805	-1.155		Damage	
60.00	-41.00	-4.00	-62.00	3.00	-	-12.00	3.48	3.08	-1.91	0.63	3.280	-1.270			
67.00	-39.00	-2.00	-66.00	3.00	-	-14.00	3.88	3.35	-2.08	0.61	3.615	-1.345	2 nd Crack		
70.00	-25.00	-1.00	-71.00	4.00	-	-17.00	4.45	3.66	-2.34	0.36	4.055	-1.350			
80.00	-20.00	0.00	-75.00	5.00	-	-20.00	4.94	3.87	-2.70	0.14	4.405	-1.420			
84.27	-11.00	-8.00	-80.00	5.00	-	-22.00	5.21	4.01	-2.89	0.09	4.610	-1.490	3 rd Crack	Fail	

ตารางผนวกที่ ก12 ผลการทดสอบผนังอิฐก่อเสริม GFRP แบบ 3-stripe

Load (tons)	Strain Guage No. (μ)						Dial Guage No. (mm)				(7+8)/2	(9-11)/2	Crack	Remark
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
10.00	974.00	153.00	82.00	2.00	4.00	6.00	-1.490	0.510	0.670	-0.610	-0.490	0.640		
20.00	1028.00	216.00	143.00	3.00	-3.00	2.00	-1.830	1.100	0.720	-0.640	-0.365	0.680		
30.00	1005.00	200.00	212.00	5.00	2.00	10.00	-1.930	1.600	0.610	-1.040	-0.165	0.825		
40.00	937.00	204.00	249.00	9.00	28.00	19.00	-1.920	2.030	0.500	-1.410	0.055	0.955		
50.00	875.00	191.00	270.00	11.00	72.00	24.00	-1.930	2.630	0.430	-1.680	0.350	1.055		
60.00	712.00	134.00	213.00	12.00	101.00	13.00	-1.770	3.290	0.280	-1.840	0.760	1.060		
70.00	657.00	131.00	199.00	23.00	125.00	15.00	-1.520	3.910	0.080	-2.000	1.195	1.040		
80.00	601.00	125.00	186.00	27.00	164.00	6.00	-1.270	4.490	-0.060	-2.060	1.610	1.000		
90.00	594.00	136.00	185.00	64.00	228.00	3.00	-1.040	4.900	-0.270	-2.100	1.930	0.915		
100.00	675.00	164.00	174.00	265.00	318.00	5.00	-0.780	5.440	-0.570	-2.150	2.330	0.790		
110.00	768.00	169.00	141.00	393.00	589.00	29.00	-0.540	5.870	-0.730	-2.180	2.665	0.725		
119.00	817.00	193.00	141.00	427.00	484.00	44.00	-0.350	6.250	-1.010	-2.210	2.950	0.600	1 st Crack	
120.00	819.00	192.00	139.00	428.00	480.00	43.00	-0.350	6.290	-1.030	-2.210	2.970	0.590		
121.00	821.00	194.00	138.00	428.00	478.00	43.00	-0.350	6.300	-1.040	-2.210	2.975	0.585	2 nd Crack	
128.00	867.00	228.00	164.00	414.00	484.00	66.00	-0.260	6.610	-1.230	-2.200	3.175	0.485	3 rd Crack	
130.00	870.00	227.00	164.00	406.00	480.00	54.00	-0.230	6.720	-1.270	-2.220	3.245	0.475		
135.00	912.00	263.00	199.00	423.00	512.00	69.00	-0.130	6.870	-1.420	-2.260	3.370	0.420	4 th Crack	
138.00	933.00	282.00	219.00	430.00	525.00	74.00	-0.100	6.960	-1.490	-2.280	3.430	0.395	5 th Crack	
140.00	975.00	303.00	259.00	418.00	514.00	73.00	-0.010	7.090	-1.620	-2.310	3.540	0.345		
143.00	1012.00	326.00	303.00	415.00	516.00	85.00	0.040	7.200	-1.740	-2.330	3.620	0.295	6 th Crack	
148.00	1082.00	367.00	401.00	420.00	518.00	101.00	0.120	7.380	-1.880	-2.380	3.750	0.250	7 th Crack	Stop Load

ตารางผนวกที่ ก13 ผลการทดสอบผนังอิฐก่อเสริม GFRP แบบเต็มผนัง

Load (tons)	Strain Guage No. (μ)						Dial Guage No. (mm)				(7+8)/2	(9-11)/2	Crack	Remark
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
10.00	-40.00	11.00	-40.00	0.00	-14.00	2.00	0.39	0.06	-0.52	-0.06	0.225	-0.230		
20.00	-61.00	18.00	-76.00	0.00	-19.00	4.00	1.34	0.07	-0.59	-0.07	0.705	-0.260		
30.00	-86.00	22.00	-132.00	0.00	-37.00	7.00	1.72	0.06	-0.73	-0.21	0.890	-0.260		
40.00	-113.00	26.00	-171.00	0.00	-64.00	12.00	2.21	0.07	-0.72	-0.59	1.140	-0.065		
50.00	-190.00	59.00	-270.00	-3.00	-14.00	20.00	2.85	0.07	-0.60	-1.38	1.460	0.390		
54.97	-208.00	64.00	-291.00	-3.00	-126.00	22.00	3.01	0.07	-0.54	-1.53	1.540	0.495	1 st Crack	
60.00	-238.00	74.00	-330.00	-5.00	-146.00	24.00	3.33	0.06	-0.54	-1.83	1.695	0.645		
70.00	-290.00	46.00	-354.00	-10.00	-162.00	21.00	3.86	0.06	-0.55	-2.15	1.960	0.800		
80.00	-351.00	51.00	-374.00	-16.00	-187.00	18.00	4.61	0.05	-0.55	-2.26	2.330	0.855		
90.00	-408.00	63.00	-394.00	-20.00	-229.00	17.00	5.20	0.07	-0.55	-2.31	2.635	0.880		
100.00	-437.00	73.00	-412.00	-22.00	-248.00	19.00	5.44	0.07	-0.55	-2.48	2.755	0.965		
110.00	-487.00	91.00	-441.00	-23.00	-282.00	22.00	5.93	0.06	-0.54	-2.78	2.995	1.120		
120.00	-549.00	100.00	-481.00	-26.00	-321.00	28.00	6.48	0.07	-0.55	-3.13	3.275	1.290		
130.00	-622.00	118.00	-524.00	-30.00	-380.00	34.00	7.20	0.07	-0.54	-3.52	3.635	1.490		
140.00	-677.00	140.00	-540.00	-34.00	-415.00	34.00	7.70	0.07	-0.55	-3.76	3.885	1.605		
148.89	-721.00	157.00	-553.00	-36.00	-441.00	25.00	8.03	0.07	-0.55	-4.04	4.050	1.745	2 nd Crack	Stop Load

ภาคผนวก ข
รูปแสดงอุปกรณ์และการทดสอบ





รูปผนวกที่ ข1 การทดสอบการวัดขนาด



รูปผนวกที่ ข2 การทดสอบการวัดความบิดเบี้ยว



รูปผนวกที่ ข3 การทดสอบการห้ำหั่นโดยการอบแห้ง



รูปผนวกที่ ข4 การทดสอบการห้ำหั่นหลังจากการอบแห้ง



รูปผนวกที่ ข5 การทดสอบการดูดซึมน้ำโดยการแช่น้ำ



รูปผนวกที่ ข6 การทดสอบการดูดซึมน้ำโดยการต้มเดือดแบบ 2 ชั่วโมง



รูปผนวกที่ ข7 การทดสอบโมดูลัสแตกร้าว



รูปผนวกที่ ข8 การทดสอบกำลังต้านแรงอัด



รูปผนวกที่ ข9 ปูนซีเมนต์ขาว



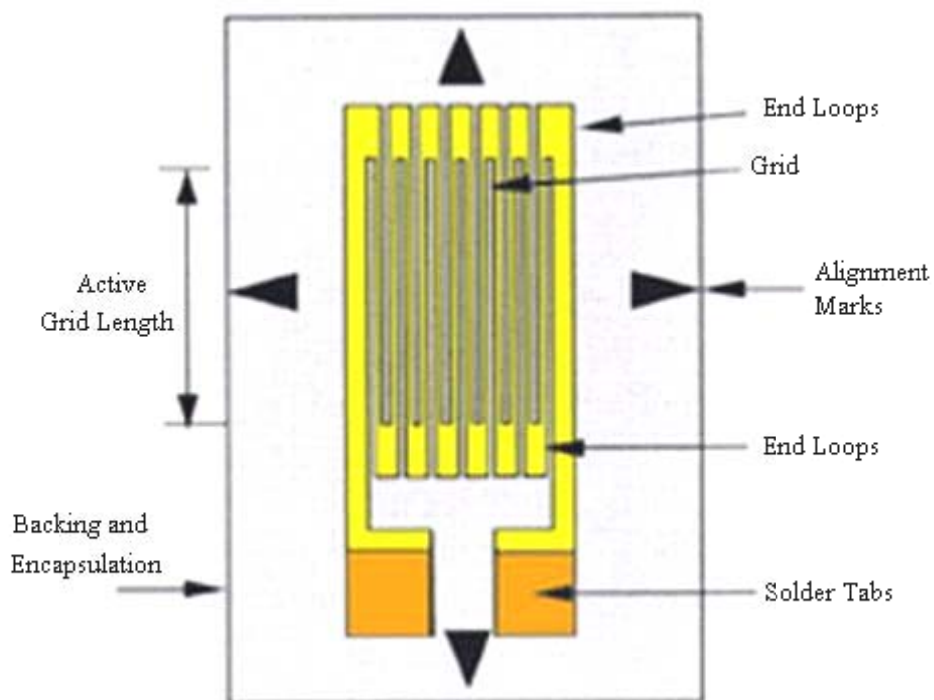
รูปผนวกที่ ข10 ปูนขาวหมัก



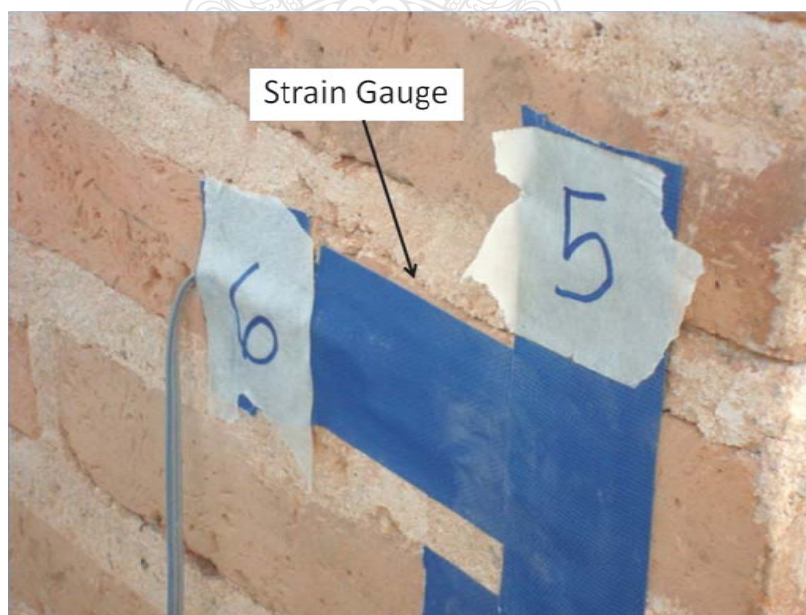
รูปผนวกที่ ข11 การก่อผนังอิฐโบราณในชั้นแรก



รูปผนวกที่ ข12 ผนังอิฐที่ก่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปผนวกที่ ข13 strain gauge



รูปผนวกที่ ข14 การติดตั้ง strain gauge



รูปผนวกที่ ข15 การติดตั้ง LVDT



รูปผนวกที่ ข16 steel place สำหรับวางด้านบนผนัง



รูปผนวกที่ ข17 Data Logger



รูปผนวกที่ ข18 steel frame สำหรับทดสอบผนังอิฐ