

การศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Glass Fiber-Reinforced
Polymer (GFRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร

STUDY ON THE BEHAVIOR OF ANCIENT MASONRY WALL
RETROFITTED USING GLASS FIBER-REINFORCED POLYMER
(GFRP) UNDER LATERAL CYCLIC LOAD

ชินโชติ บรรจงปรุ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Glass Fiber-Reinforced
Polymer (GFRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร

ชินโชติ บรรจงปรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร

Study on the Behavior of Ancient Masonry Wall Retrofitted Using Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Under Lateral Cyclic Load

ชื่อ-นามสกุล

นายชินโชติ บรรจงปรุ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ปรึกษา

อาจารย์หมีง จิ่ง, D.Eng.

ปีการศึกษา

2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีชัย สำราญวานิช, Ph.D.)

..... กรรมการ
(อาจารย์วีระศักดิ์ ละอองจันทร์, D.Eng.)

..... กรรมการ
(อาจารย์หมีง จิ่ง, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกร
ชื่อ-นามสกุล	นายชิน โชติ บรรจงปรุ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ปรึกษา	อาจารย์หมีง จิ่ง, D.Eng.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

โบราณสถานในประเทศไทยเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีอารยธรรมมาช้านาน ด้วยลักษณะของโครงสร้างเป็นผนังอิฐก่อและไม่ได้คำนึงถึงเรื่องของการรับแรงดันด้านข้างหรือแรงสั่นสะเทือน ทำให้เกิดความชำรุดเสียหายได้ง่าย อันอาจนำไปสู่การวิบัติได้ ในที่สุดการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกรของผนังอิฐก่อโบราณ โดยเสริม GlassFiber-Reinforced Polymer (GFRP) ซึ่งจะเป็นข้อมูลและเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านงานก่อสร้างที่สำคัญ และเป็นทางเลือกหนึ่งในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถาน สามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนทางด้านข้างหรือแผ่นดินไหวได้ดีขึ้น

การศึกษาวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างแบบ full scaletest ขนาด 1.50x1.50x0.60 ม ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกร จำนวน 5 ตัวอย่าง ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ 1 ตัวอย่าง ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณเมื่อเกิดการวิบัติและซ่อมแซมรอยแตกร้าวบนผิวผนังด้วย GFRP 1 ตัวอย่าง ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย GFRP 3 ตัวอย่าง และนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบการกระจายพลังงานภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกร

ผลการศึกษาวิจัยพบว่าการเสริมกำลังและการซ่อมแซมผนังอิฐก่อด้วยวัสดุ GFRP สามารถต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกรได้เพิ่มขึ้นมากกว่า 2 เท่า ของผนังที่ไม่ได้เสริมด้วยวัสดุ GFRP, การเสริมวัสดุ GFRP บนผิวผนังแนวทแยงมุม 2 ด้าน ร้อยละ 20 ของพื้นที่ผนัง มีระยะการเคลื่อนตัวมากกว่าผนังที่เสริมวัสดุ GFRP ในรูปแบบอื่นๆ สามารถกระจายพลังงานได้ดีกว่าทุกแบบ จึงมีความเหมาะสมในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกรของผนังอิฐก่อโบราณ

คำสำคัญ: ผนังอิฐก่อโบราณ เส้นใยแก้ว แรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกร

Thesis Title	Study on the Behavior of Ancient Masonry Wall Retrofitted Using GlassFiber-Reinforced Polymer (GFRP) Under Lateral Cyclic Load
Name - Surname	Mr. Chinchot Banjongpru
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Mrs.Meng Jing, D.Eng.
Academic Year	2012

ABSTRACT

Archaeological sites in Thailand have symbolized the civilization of construction for a long time. They are usually characterized by brick walls which were constructed without calculations for lateral loads or vibrations that may cause damages easily. The study of the behavior of ancient masonry wall retrofitted using Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) under lateral cyclic load aimed to investigate this type of technology in construction as an alternative choice to restore historic ancients in order to resist lateral impact or decrease a great damage from earthquake.

The purpose of this research is to determine the mechanical properties of ancient masonry walls (AMW) retrofitted with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) under lateral cyclic load through experimental methods. Five full scale ancient masonry wall specimens with nominal dimensions of 1.50x1.50x0.60 m were tested under lateral cyclic load. One wall specimen was served as reference without retrofitting. One wall specimen was damaged a predefined degree under lateral cyclic load and repaired using GFRP. Three wall specimens were retrofitted using GFRP before the test. The test results of energy dissipation were compared for lateral cyclic loads of wall specimens.

The results demonstrated that ancient masonry walls retrofitted using Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) could resist over twice as much the lateral cyclic load as those without the use of GFRP. The 2-sided crosswise with 20 percent use of GFRP in the wall showed the greatest movement distance and energy dissipation among other types of using GFRP, thus suitable for resisting lateral cyclic load on ancient masonry walls.

Keywords: ancient masonry wall, glassfiber reinforced polymer, lateral cyclic load

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสำเร็จอย่างสูงจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.หมิง จิ่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ทวิชัย สำราญวานิช ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ เสนอแนะ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องตลอดมา ตั้งแต่ต้นจนแล้วเสร็จ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักวิชาการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ เจ้าหน้าที่ สำนักงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้กรุณาให้ความสะดวกในการติดต่อประสานงาน ให้คำแนะนำ ปรีกษา ในขั้นตอนและเอกสารต่างๆ ด้วยดีตลอดมา ศูนย์อุตสาหกรรม อิตาเลียนไทย อำนวยวิหารแดง จังหวัดสระบุรี ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ ตลอดจนบุคลากรที่มีความรู้ ความชำนาญ จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่า และประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชา พระคุณบิดา มารดา ตลอดจนบูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณ ที่ให้การอบรมสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชา ซึ่งผู้วิจัยจะนำความรู้ที่ได้รับไปพัฒนาการทำงานให้ดียิ่งขึ้น เพื่อประโยชน์ต่อตน สังคม และประเทศชาติสืบไป

ชิน โชติ บรรจงปรุ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย.....	3
1.6 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ความหมายของวัสดุก่อ.....	5
2.2 ขนาดและคุณลักษณะของอิฐก่อ.....	6
2.3 ส่วนผสมและวิธีทำอิฐก่อ.....	9
2.4 ราคาอิฐ.....	11
2.5 คุณสมบัติของมอร์ตาร์.....	11
2.6 รอยต่อของผนังอิฐก่อ.....	12
2.7 การวางอิฐและรูปแบบการเรียงอิฐ.....	12
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของวัสดุก่อ.....	14
2.9 อิฐที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน.....	14
2.10 มอร์ตาร์ที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน.....	16
2.11 การเสื่อมสภาพของมอร์ตาร์.....	17

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.12 วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Polymer Composite หรือ FRP Composite)	18
2.13 ชนิดของเส้นใย (Fiber Reinforcement Type).....	18
2.14 ลักษณะหรือรูปแบบทั่วไปของเส้นใย (Fiber Reinforcement Form).....	20
2.15 เรซิน (Resin)	21
2.16 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP)	22
2.17 การออกแบบและข้อกำหนดรายละเอียด FRP	25
2.18 ข้อควรระวังในการออกแบบติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP)	25
2.19 พฤติกรรมของผนังอิฐก่อ (Masonry Wall) รับแรงกระทำด้านข้าง	26
2.20 การทดสอบผนังอิฐก่อ (Masonry Wall) รับแรงกระทำด้านข้าง	28
3 วิธีการดำเนินการวิจัย	33
3.1 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่าง	33
3.2 ทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่าง.....	38
3.3 ปูนก่อ (Mortar) ที่ใช้ในการทดสอบ	40
3.4 วัสดุเส้นใย (Fiber Reinforcement)	41
3.5 การเตรียมผนังอิฐโบราณตัวอย่างสำหรับทดสอบ	41
3.6 การทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ	46
3.7 การดำเนินการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ	47
3.8 ความเหนียว (Ductility) และการวิบัติ (Failure) ของอิฐก่อโบราณตัวอย่างขณะทดลอง	49
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	50
4.1 ผลการทดลองกายภาพของอิฐ	50
4.2 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของอิฐ.....	51
4.3 ผลการทดสอบทางกลของอิฐ และมอร์ตาร์	53
4.4 วัสดุเส้นใย (Fiber Reinforcement)	53
4.5 ผลการทดสอบของผนังอิฐแบบโบราณ	54
4.6 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร	63

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4.7 การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง	69
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	71
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก ภาพการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง	76
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	114



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ขนาดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้และขีดจำกัดในการทดสอบ	6
2.2	แรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	7
2.3	กำลังอัดของวัสดุก่อคืดเนื้อที่รวมสำหรับวัสดุก่อชนิดก้อนตัน	7
2.4	หน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงที่เกิดจากการตัดสำหรับงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก	8
2.5	ข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างอิฐโบราณ	15
2.6	สรุปค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของอิฐโบราณจากการทดสอบ	16
2.7	คุณสมบัติของอิฐโบราณแยกตามกลุ่มอายุ	16
2.8	ข้อมูลทางเทคนิคของน้ำยาเรซิน	22
3.1	สรุปชนิดของผนังที่ใช้ทดสอบ	43
4.1	การวัดขนาดและน้ำหนักอิฐจากการสุ่มตัวอย่างจากแหล่งบ้านลุมพลีจำนวน 10 ตัวอย่าง	51
4.2	การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption Test)	51
4.3	การทดสอบการต้มเดือด (Boiling Test)	52
4.4	การทดสอบการรับกำลังอัดของอิฐทดแทน	53
4.5	ข้อมูลทางด้านเทคนิคของ GFRP	53
4.6	ผลทดสอบการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ...	54

สารบัญภาพ

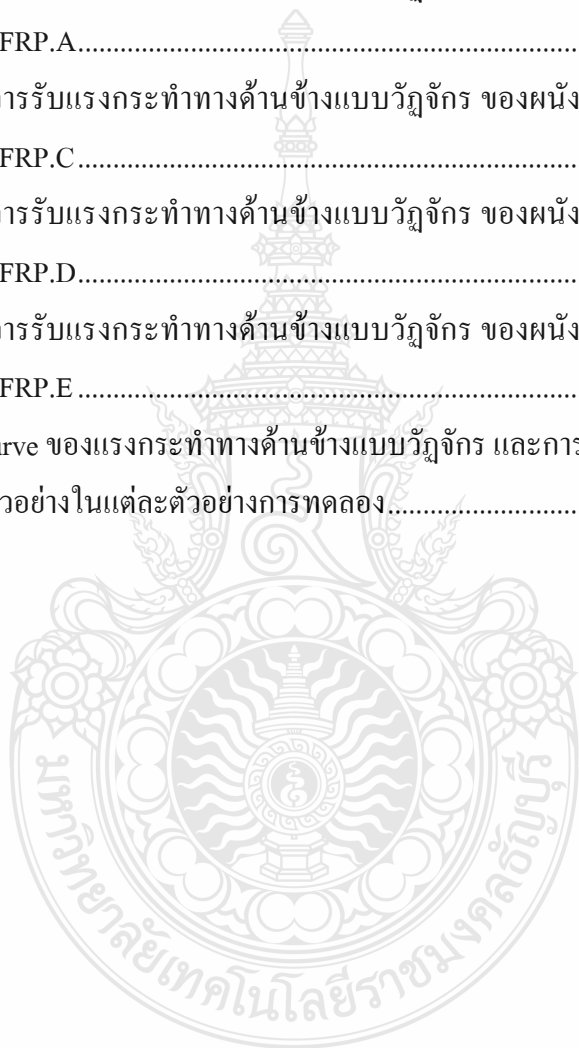
ภาพที่	หน้า
2.1 รอยต่อของผนังก่ออิฐ	12
2.2 แบบการวางอิฐก่อ.....	13
2.3 แบบการเรียงอิฐก่อ	13
2.4 ชนิดของเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber Reinforcement Type).....	19
2.5 Stress – Strain เส้นใย (Fiber Reinforcement)	20
2.6 ลักษณะ Fiber Sheet.....	20
2.7 ลักษณะLaminate.....	20
2.8 ลักษณะRod & Grid.....	22
2.9 ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยแบบ Unidirectional (0°), Bidirectional ($0^{\circ}+90^{\circ}$), Bidirectional (45°).....	21
2.10 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP).....	23
2.11 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP) อย่างมีประสิทธิภาพ	24
2.12 การติดตั้งโดยเส้นใย (Fiber Reinforcement) อยู่ด้านล่างเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพ การเสริมกำลังลดลง.....	24
2.13 ฟองอากาศในเรซินเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังลดลง	24
2.14 ลักษณะการ Debonding บริเวณมุมอด้านใน	26
2.15 การวิบัติของผนังอิฐก่อเมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างร่วมกับแรงกระทำในแนวตั้ง	27
2.16 ลักษณะการวิบัติในผนังอิฐก่อเนื่องจากแรงเฉือน	28
2.17 การเสีรูปร่างเนื่องจากแรงกระทำด้านข้างของผนังอิฐก่อทดสอบ	29
2.18 ลักษณะผนังอิฐก่อในการทดสอบแบบต่างๆ	29
2.19 ลักษณะผนังอิฐก่อทดสอบวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน	30
2.20 ลักษณะการทดสอบผนังอิฐก่อรับแรงด้านข้างโดย Simms และ Murthy.....	30
2.21 ลักษณะการเสริมเหล็กเส้นกลม (Rebar,Rods) ในแนวตั้งเพื่อป้องกันการหมุนของผนัง อิฐก่อทดสอบ โดย Monk	31
2.22 การทดสอบผนังอิฐก่อ ด้วยการเสริมกรอบ (frame) โดยรอบผนังอิฐก่อทดสอบโดย Benjamin ,Williams และ Wood.....	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.1 ตัวอย่างของอิฐที่ใช้ในการทดสอบ	34
3.2 การวัดขนาดของอิฐที่ใช้ในการทดสอบ	34
3.3 การทดสอบการหาน้ำหนักโดยการอบแห้ง	35
3.4 การทดสอบการหาน้ำหนักหลังจากการอบแห้ง.....	35
3.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำโดยการแช่น้ำ.....	37
3.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำโดยการต้มเดือดแบบ 2 ชั่วโมง	37
3.7 การทดสอบการรับแรงกดอัด.....	39
3.8 ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW01	43
3.9 ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW01_GFRP.A	44
3.10 ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW03_GFRP.C	44
3.11 ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW04_GFRP.D	45
3.12 ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW05_GFRP.E	45
3.13 ผนังตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	46
3.14 การติดตั้งผนังอิฐก่อโบราณสำหรับการทดสอบ Test setup.....	47
3.15 Loading Sequence for Static Cyclic Loading Displacement Cycles.....	48
4.1 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW 01 (ด้านหน้า)	55
4.2 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW 01 (ด้านหลัง)	55
4.3 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW01_GFRP.A (ด้านหน้า)	56
4.4 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW01_GFRP.A (ด้านหลัง)	57
4.5 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW03_GFRP.C (ด้านหน้า)	58
4.6 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW03_GFRP.C (ด้านหลัง)	58
4.7 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW04_GFRP.D (ด้านหน้า).....	59
4.8 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW04_GFRP.D (ด้านหลัง)	60
4.9 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW05_GFRP.E (ด้านหน้า)	61
4.10 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW05_GFRP.E (ด้านหลัง).....	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.11 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกร ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW 01.....	63
4.12 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกร ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW01_GFRP.A.....	64
4.13 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกร ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW03_GFRP.C.....	65
4.14 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกร ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW04_GFRP.D.....	66
4.15 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกร ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW05_GFRP.E.....	67
4.16 Skeleton Curve ของแรงกระทำทางด้านข้างแบบวิถัจกร และการเคลื่อนตัวของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างในแต่ละตัวอย่างการทดลอง.....	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โบราณสถานในประเทศไทยเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีอารยธรรมมาช้านาน และเป็นสิ่งสำคัญในการบ่งบอกถึงประเพณี วัฒนธรรม ตลอดจนความรู้ ความชำนาญ ในการใช้เทคโนโลยีในงานก่อสร้างในแต่ละยุคได้เป็นอย่างดี โบราณสถานในสมัยก่อนส่วนใหญ่จะใช้อิฐเป็นวัสดุก่อสร้างหลัก ซึ่งอิฐทำมาจากดินเหนียว และวัสดุอื่นๆ เช่น ทราย นำมาขึ้นรูปและผ่านกระบวนการเผา ทำให้อิฐมีความแข็งแรง ทนทานพอที่จะใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างโบราณสถานได้ ด้วยลักษณะของโครงสร้างโบราณสถานเป็นโครงสร้างผนังอิฐก่อ และไม่ได้คำนึงถึงเรื่องของการรับแรงดันด้านข้างหรือแรงสั่นสะเทือน อันเนื่องมาจากความรู้และวิทยาการในงานก่อสร้างในสมัยนั้น การต้านทานแรงดัด สั่นสะเทือนทางด้านข้างจึงไม่สามารถที่จะต้านทานได้ดีพอ ทำให้เกิดความชำรุดเสียหายได้ง่าย อันอาจนำไปสู่การวิบัติได้ในที่สุด การบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ จึงเป็นสิ่งสำคัญ และมีความจำเป็นต้องอาศัยความรู้และข้อมูลทางวิศวกรรม เพื่อเสริมความมั่นคงแข็งแรงของผนังอิฐก่อซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของโบราณสถาน

วัสดุเสริมแรง Fiber-Reinforced Polymer (FRP) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ทนทาน มีความยืดหยุ่น ทนทานต่อสภาพอากาศ การผุกร่อนต่อฤทธิ์สารเคมี กรด ด่าง ได้ดี ไม่เป็นสนิม อายุการใช้งานยาวนาน และโดยเฉพาะคุณสมบัติเด่นที่มีความแข็งแรงสามารถทนแรงดึงได้สูง วัสดุ FRP มีลักษณะเป็นแผ่นสามารถใช้ได้ในลักษณะงานซ่อมแซมเพื่อลดขนาดรอยแตกร้าว (crack size) ซึ่งอาจจะก่อผลเสียหายให้กับโครงสร้าง หรือทำให้โครงสร้างกลับคืนสู่สภาพเดิม และประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างใหม่เพื่อเสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงสั่นสะเทือนทางด้านข้างของผนังอิฐก่อโบราณ โดยเสริม Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) จะสามารถกำหนดความสามารถในการรับแรงดันทางด้านข้าง หรือแรงสั่นสะเทือนในผนังอิฐก่อโบราณได้ ซึ่งจะเป็นข้อมูลและเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านงานก่อสร้างที่สำคัญ และเป็นทางเลือกหนึ่งในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานซึ่งส่วนใหญ่โครงสร้างเป็นผนังอิฐก่อนั้น ให้มีความมั่นคงแข็งแรงลดความเสียหายกับโครงสร้างโบราณสถาน หรือในงานที่จะต้องก่อสร้างขึ้นมาใหม่เพื่อเพิ่มเติมจากของเก่าที่มีอยู่ให้มีความสมบูรณ์ และสามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนทางด้านข้างหรือแรงแผ่นดินไหวได้ดีขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อทดสอบหาคุณสมบัติของอิฐโบราณ ที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณ ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร

1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณแบบ Full Scale Test ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร บนผนังอิฐก่อตัวอย่างที่ไม่เสริมวัสดุ GFRP และผนังตัวอย่างที่ซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วย FRP เมื่อผนังตัวอย่างเกิดการวิบัติ

1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณแบบ Full Scale Test เสริมด้วย Glass Fiber – Reinforced Polymer (GFRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร

1.2.4 เปรียบเทียบพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรของผนังตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP กับผนังตัวอย่างที่ซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วย GFRP เมื่อผนังตัวอย่างเกิดการวิบัติ และผนังตัวอย่างที่เสริมด้วย GFRP

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1.3.1 คุณสมบัติของอิฐโบราณมีคุณสมบัติใกล้เคียงอิฐที่ใช้ทดสอบ

1.3.2 ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างที่ซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วย GFRP และผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างที่เสริมวัสดุ GFRP สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร ได้เพิ่มขึ้นจากผนังอิฐก่อโบราณที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ทดสอบหาคุณสมบัติของอิฐโบราณตัวอย่าง จากแหล่งทำอิฐปัจจุบัน บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา ตามมาตรฐาน ASTM C67

1. ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่าง โดยวิธีการทดสอบการวัดขนาด (Measurement of Size) ทดสอบหาน้ำหนัก (Test Seek Weight Division) ทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption Test)

2. ทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Property) โดยวิธีการทดสอบกำลังต้านแรงอัด (Compressive Strength Test)

3. ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างสำหรับทดสอบมี ขนาด กว้าง 1.50 เมตร สูง 1.50 เมตร หนา 0.60 เมตร ก่อบนฐานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดกว้าง 0.90 เมตร ยาว 2.00 เมตร สูง 0.30 เมตร โดยมี

กานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดกว้าง 0.60 เมตร ยาว 1.50 เมตร สูง 0.30 เมตร ด้านบนของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading)

4. วัสดุเส้นใยไฟเบอร์ ใช้ชนิดเส้นใยแก้ว Glass Fiber (GFRP) แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) ตัดตามรูปแบบการเสริมบนผิวพื้นผนังตัวอย่าง แต่ละรูปแบบ

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมรายละเอียดแนวคิด ทฤษฎี วรรณกรรมหรือผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

1. วัสดุที่ใช้ในการก่อผนังอิฐโบราณ และคุณสมบัติขั้นต้นของวัสดุก่อผนังอิฐโบราณ
2. การทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อผนังอิฐโบราณ
3. วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย Fiber-Reinforced Polymer (FRP)
4. พฤติกรรมของผนังอิฐก่อรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา
5. การทดสอบผนังอิฐก่อรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา
6. แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading)

1.5.2 จัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ อาทิเช่น อิฐโบราณตัวอย่าง ปูนก่อแบบโบราณ อีพ็อกซี (Epoxy Resin) เส้นใยไฟเบอร์ (Fiber Reinforced)

1.5.3 เตรียมเครื่องมือการทดสอบ อาทิเช่น Hydraulic Jack, Load Cell, เครื่องแปลงข้อมูล (Data Logger), LVDT:(Linear Variable Displacement Transducers), Electric Strain Gages

1.5.4 ทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลของอิฐโบราณ ซึ่งเป็นอิฐใหม่สำหรับการก่อสร้าง และบูรณะโบราณสถาน จากแหล่งทำอิฐปัจจุบัน บริเวณริมคลองสระบัว ตำบล ลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

1.5.5 ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร จำนวน 1 ตัวอย่าง

1.5.6 ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ที่ซ่อมแซมรอยแตกร้าบนผิวพื้นผนังด้วยวัสดุ GFRP ภายใต้กระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร จำนวน 1 ตัวอย่าง

1.5.7 ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ที่เสริมด้วยวัสดุ GFRP ภายใต้กระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร จำนวน 3 ตัวอย่าง

1.5.8 เปรียบเทียบพฤติกรรมการกระจายพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal Load กับ Horizontal Displacement ของผนังอิฐก่อโบราณ ทั้ง 5 ตัวอย่าง

1.5.9 สรุปผลงานวิจัยและเขียนรายงานผลการวิจัยเพื่อนำเสนอ

1.6 ข้อจำกัดของการวิจัย

1.6.1 ข้อมูลของวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยเช่น อีฐ และมอร์ต้า ต้องมีมีลักษณะทางกายภาพ และทางกล คล้ายกับอีฐในสมัยอยุธยา ซึ่งต้องใช้เวลาในการหาข้อมูลของแหล่งผลิต ซึ่งแหล่งผลิตอีฐดังกล่าวผลิตที่ ตำบลลุมพินี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

1.6.2 การเคลื่อนย้ายตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบต้องทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากชิ้นงานที่ทดสอบมีขนาดใหญ่ และน้ำหนักมากทำให้ต้องเพิ่มความปลอดภัยในการเคลื่อนย้ายผนังตัวอย่าง

1.6.3 งบประมาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ค่อนข้างสูง เนื่องจากตัวอย่างทดสอบมีขนาดใหญ่ และมีจำนวนหลายตัวอย่าง ต้องใช้วัสดุเป็นจำนวนมาก

1.6.4 สถานที่ภายในห้องปฏิบัติการของภาควิชา ไม่เหมาะสมในการทดสอบ ต้องเคลื่อนย้ายผนังตัวอย่างซึ่งมีขนาดใหญ่ ไปใช้ในสถานที่ทดสอบ ณ ศูนย์อุตสาหกรรมอิตาเลียนไทย อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี

1.6.5 เครื่องมือ และอุปกรณ์การทดสอบ ต้องดำเนินการจัดทำขึ้นใหม่ เพื่อให้มีความเหมาะสมในการทดสอบ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทราบถึงคุณสมบัติอีฐทดแทนซึ่งเป็นอีฐใหม่สำหรับใช้ซ่อมแซมบูรณะโบราณสถาน

1.7.2 ทราบพฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร ของผนังที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP กับผนังที่ซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวัสดุ GFRP และผนังที่เสริมด้วยวัสดุ GFRP

1.7.3 ทราบพฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร ในรูปแบบการเสริมวัสดุ GFRP รูปแบบต่างๆ

1.7.4 สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร ของผนังที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP กับผนังที่วิบัติและซ่อมแซมด้วยวัสดุ GFRP และผนังที่เสริมวัสดุ GFRP

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษา วิจัย จำเป็นต้องคำนึงถึงความรู้หลายประการ ในการดำเนินการแต่ละขั้นตอนให้มีประสิทธิภาพ และมีประสิทธิผล จำเป็นต้องทราบถึงวิธีการ ขั้นตอน และวัสดุที่เหมาะสมกับการซ่อมแซมบูรณะโบราณสถาน ซึ่งได้มีผู้ศึกษา ทดลอง วิเคราะห์ วิจัย ถึงวิธีการ ขั้นตอน และวัสดุที่ใช้ให้ใกล้เคียงโบราณสถานเดิมให้มากที่สุด เช่น การก่ออิฐซ่อมแซมผนังเดิมตามสภาพหลักฐานเดิมที่มีอยู่เพื่อให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เท่าที่จำเป็น ในโครงสร้างอิฐก่อ (Masonry Structure) อิฐดินเผา (Masonry Brick) ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา นั้นจะถูกจัดเรียงในรูปแบบคล้ายสมัยอยุธยา และใช้ปูนก่อ (Mortar) ซึ่งได้จากการผสมปูนซีเมนต์ขาว ปูนหมัก ทราย และน้ำ ในอัตราส่วนที่พอเหมาะเป็นตัวประสานก้อนอิฐดินเผาต่างๆ เข้าด้วยกัน ดังนั้น อิฐก่อในลักษณะนี้จะถูกออกแบบให้รับแต่แรงกดอัดเท่านั้น อีกทั้งยังมีแนวความคิดที่จะนำวัสดุ Fiber Reinforced Polymer (FRP) มาช่วยเสริมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร โดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างผนังอิฐโบราณสถาน และไม่รบกวนทัศนียภาพของผนังอิฐโบราณ จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแนวความคิด ทฤษฎี รวบรวมเอกสารวรรณกรรมหรือผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1 ความหมายของวัสดุก่อ

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2553) [1] ได้นิยามความหมายของคำไว้ในมาตรฐานสำหรับอาคารวัสดุก่อไว้ดังนี้

ก้อนวัสดุก่อตัน หมายถึง ก้อนวัสดุก่อซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดในทุกระนาบ ซึ่งขนานกับผิวหน้า ที่รับน้ำหนักตั้งแต่ร้อยละ 75 ของเนื้อที่หน้าตัดรวม ซึ่งวัดในระนาบเดียวกันขึ้นไป

มอร์ตาร์ หมายถึง ส่วนผสมเหลวๆ ของวัสดุที่เป็นตัวประสานมวลรวมและน้ำ

เกร้าท์ หมายถึง ส่วนผสมของวัสดุที่เป็นเชื้อประสานและมวลรวมซึ่งจัดส่วนปฏิกิริยาให้มีความชื้นเหลวพอดีที่จะเทหรือสูบได้ โดยวัสดุที่เป็นส่วนผสมไม่เกิดการแยกแยะ

งานวัสดุ หมายถึง งานก่อสร้างที่ประกอบด้วยก้อนวัสดุก่อ ซึ่งวางเรียงกันในมอร์ตาร์หรือเกร้าท์

2.2 ขนาดและคุณลักษณะของอิฐก่อ

2.2.1 ขนาดของอิฐก่อ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2517) [2] ได้กำหนดประเภท ขนาดของอิฐก่อสร้างสามัญ โดยแบ่งประเภทของอิฐก่อสร้างสามัญไว้ 2 ประเภท ดังนี้

1. ประเภทที่ 1 อิฐขนาดเล็ก (อิฐมอญ) หมายถึง อิฐที่มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมตัน ผิวไม่สู้เรียบ ทำด้วยมือหรือเครื่องจักร เหมาะสำหรับใช้ก่อผนังหรือกำแพงที่ฉาบปูน

2. ประเภทที่ 2 อิฐขนาดใหญ่ หมายถึง อิฐที่มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมตัน ใหญ่กว่าอิฐมอญ ผิวหน้าเรียบ มีร่องสำหรับยึดปูนก่อทำด้วยเครื่องจักร เหมาะสำหรับก่อผนังหรือกำแพง

ขนาดและความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้สำหรับอิฐประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้และขีดจำกัดในการทดสอบ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) [2]

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) [2] กำหนดคุณลักษณะที่ต้องการของอิฐไว้ดังนี้

1. ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปต้องมีขนาดตามตารางที่ 2.1 โดยมีลักษณะและคุณสมบัติอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) เสาสุกและมีสีสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น
- 2) มีความแข็งแรงทนทานตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.2
- 3) มุมทุกมุมควรเป็นมุมฉาก
- 4) รูปร่างและขนาดสม่ำเสมอ
- 5) เนื้อแน่นและไม่มียอยแตกร้าว

2. คุณสมบัติทางกายภาพ

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

ตารางที่ 2.2 แรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [2]

ประเภทที่	ยาว	×	กว้าง	×	หนา	แรงอัดต่ำสุด (กก./ ซม. ²)	การดูดซึมน้ำสูงสุด ร้อยละของน้ำหนักอิฐ
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

ตารางที่ 2.3 กำลังอัดของวัสดุก่อคิณเนื้อที่รวมสำหรับวัสดุก่อชนิดก้อนตัน [1]

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

2.2.3 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้กำหนดคุณภาพของวัสดุไว้ดังนี้ [1]

1. หากมิได้ระบุเป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ในงานวัสดุก่อคอนกรีตจะต้องมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม หรือมาตรฐานสากล
2. มอร์ต้าร์ และ เกร้าท์
 - 1) หากมิได้มีการระบุเป็นอย่างอื่น มอร์ต้าร์ และเกร้าท์ จะต้องมียุทธสมบัติตรงตามมาตรฐานสากลที่เหมาะสม

2) ห้ามใช้เคลือบเชื่อมคลอไรด์ หรือสารผสมเพิ่มซึ่งมีเคลือบเชื่อมคลอไรด์ กับมอร์ต้าร์หรือเกร้าท์ ซึ่งมีเหล็กเสริม เหล็กปลอก หรือเหล็กยึดอื่นๆ ฝังอยู่

ในกรณีที่มีได้มีการหาค่ากำลังอัดของวัสดุก่อคอนกรีตโดยวิธีทดสอบล่วงหน้า และก่อนวัสดุก่อ มอร์ต้าร์ตลอดจนฝีมือการทำงานตรงตามเกณฑ์กำหนดในมาตรฐานแล้ว อาจคิดค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้โดยเฉลี่ยค่ากำลังอัดของวัสดุก่อทั้งหมดจากค่าตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.4 หน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงที่เกิดจากการตัดสำหรับงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก [1]

หน่วยแรงที่ยอมให้	งานก่อสร้างด้วยวัสดุก่อ			
	ชนิดกึ่งกลาง		ชนิดกึ่งตัน หรือ เกร้าท์	
	มอร์ต้าร์	มอร์ต้าร์	มอร์ต้าร์	มอร์ต้าร์
	กำลังสูง ^(ก)	ธรรมดา ^(ข)	กำลังสูง ^(ก)	ธรรมดา ^(ข)
หน่วยแรงเฉือน, กก. / ซม. ²	2.4 ^(ง)	1.6 ^(ง)	2.4 ^(ง)	1.6
หน่วยแรงดึงในการตัด ^(ฉ)				
ตั้งฉากกับรอยต่อทางราบ ^(ช)	1.6 ^(ง)	1.1 ^(ง)	2.7	1.9
ขนานกับรอยต่อทางราบ ^(ฅ)	3.2 ^(ง)	2.2 ^(ง)	5.5	3.8

2.2.4 ค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็กจะต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้

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

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

หากไม่มีผลทดสอบมาแสดงจนเป็นที่พอใจแล้วค่าหน่วยแรงเฉือนและแรงดึงอันเกิดจากการตัดสำหรับงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็กจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดให้ตามตารางที่ 2.4

1. ในกรณีที่ไม่มีการควบคุมงานทางวิศวกรรมหรือสถาปัตยกรรมให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดให้ลดค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ต่างๆ ลงครึ่งหนึ่ง
2. ทิศทางของหน่วยแรงตั้งฉากกับชั้นรอยต่อทางราบ ตั้งตั้งในงานวัสดุก่อธรรมดา
3. ทิศทางของหน่วยแรงขนานกับรอยต่อทางราบซึ่งจะอยู่ในแนวราบในงานวัสดุก่อสร้างธรรมดา ในกรณีที่ก่อวัสดุก่อแบบเรียงตามขวางจะยอมให้เกิดหน่วยแรงดึงในแนวราบในวัสดุก่อไม่ได้

4. เนื้อที่สุทธิของชั้นมอร์ตาร์
5. ในการคำนวณความต้านทานแรงคด จะต้องถือว่าโมดูลัสหน้าตัดของผนังกลวงมีค่าเท่ากับผลรวมของโมดูลัสหน้าตัดของผนังแต่ละแผง
6. กำลึงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ต้องไม่ต่ำกว่า 140 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
7. กำลึงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ต้องไม่ต่ำกว่า 50 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

2.3 ส่วนผสมและวิธีทำอิฐก่อ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2517) [2] ได้อธิบายส่วนผสมของอิฐและวิธีทำอิฐ ตามประเภทของอิฐไว้ดังนี้

ประเภทที่ 1 อิฐขนาดเล็ก (อิฐมอญ) วัสดุที่ใช้ในการทำได้แก่ ดินเหนียว หรือดินโคลน และวัสดุอื่นๆ เช่น แกลบ ทราช ขี้เถ้า อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายๆ อย่างรวมกันแล้วแต่ความเหมาะสม ถ้าเป็นการทำด้วยมือจะใช้ดินเหนียวผสมกับทราชหรือแกลบหรือใช้ดินโคลนผสมกับแกลบย่ำผสมน้ำอัดลงในแบบพิมพ์ไม้ ซึ่งวางอยู่บนลานดินที่เรียบ โดยโรยเถ้าแกลบบนลานดินและภายในแบบพิมพ์ เพื่อกันไม่ให้ดินผสมติดแบบพิมพ์ ปาดให้เรียบ ยกแบบพิมพ์ไม้ออกผึ่งไว้กลางลานดินให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา หากเป็นการทำด้วยเครื่องจักรจะใช้ดินเหนียวผสมกับทราชหรือแกลบนำเข้าเครื่อง ฟันน้ำ นวด อัด ริด ออกมาเป็นแท่งยาว ตัดด้วยลวดเป็นแผ่นอิฐ ผึ่งให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา

ประเภทที่ 2 อิฐขนาดใหญ่ วัสดุที่ใช้ในการทำได้แก่ ดินเหนียว และวัสดุอื่นๆ เช่น ทราช โดยใช้ดินเหนียวผสมกับทราช ย่ำผสมน้ำ อัดลงในแบบพิมพ์ ปาดให้เรียบแล้วยกแบบไม้ ออก หรือนำเข้าเครื่อง นวด อัด ริด ออกมาเป็นแท่งยาว ตัดด้วยลวดเป็นก้อนขนาดใหญ่กว่าแผ่นอิฐเล็กน้อย ผึ่งก้อนดินที่เตรียมไว้ให้มีความชื้นพอสมควร นำเข้าเครื่องอัดให้แน่นเป็นก้อนอิฐตามขนาดที่ต้องการ ผึ่งให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2542) ได้อธิบายถึงกรรมวิธีการผลิตอิฐที่ทำด้วยมือไว้ดังนี้ [3]

เป็นการผลิตอิฐที่เก่าแก่ที่สุดในประเทศไทย จะให้ขนาดของอิฐไม่คงที่ เนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น ขนาดของแบบทำอิฐที่ไม่เท่ากัน การอัดดินลงในแบบทำอิฐที่ไม่แน่นพอ และส่วนผสมของดินไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้การหดตัวของอิฐในขณะเผาไม่เท่ากัน

การเลือกดิน

เป็นดินที่ไม่มีเม็ดทรายเจือปนมากเกินไปและไม่เป็นดินเหนียวมากเกินไปถ้าดินมีทรายมากจะทำให้อิฐนั้นร้อนและร่วน และถ้าดินเป็นดินเหนียวมากเกินไป เมื่อนำไปตากแดดจะเกิดการแตกร้าวค่อนข้างสูง

การขุดและการย่ำดิน

ขุดดินและแยกเอาเศษไม้หรือสารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ออกให้หมด จากนั้นทำการผสมเกลบประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของดินละย่ำดินให้ละเอียดและให้เข้ากันดี ถ้าดินมีลักษณะแห้งจนเกินไปก็ให้เติมน้ำได้ตามสมควร พอที่จะทำการย่ำดินและเทลงในแบบได้สะดวก

การผสมเกลบจะช่วยให้เนื้อดินมีความโปร่งมากขึ้น หลังจากที่เกลบถูกความร้อนเผาไหม้ไปจากเนื้ออิฐแล้ว จะทำให้อิฐมีน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีขึ้น นอกจากนั้นแล้วยังป้องกันไม่ให้อิฐแตกในเวลาตากแดด และป้องกันไม่ให้ดินแม่พิมพ์อีกด้วย

การพิมพ์แบบ

แบบที่ใช้หล่อดินให้เป็นแผ่นอิฐจะเป็นแบบที่ทำด้วยไม้ 4 ด้าน โดยจะมีเฉพาะด้านข้าง (ไม่มีส่วนบนและส่วนล่าง) ไม้ที่ทำแบบเป็นไม้ที่ทนทานต่อน้ำและความชื้น ไม้ด้านในใตริยขนาดของแบบจะใหญ่กว่าขนาดของอิฐที่ต้องการประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากดินที่ตากแห้งแล้วจะมีขนาดเล็กกลง ในขั้นตอนนี้ เริ่มต้นทำการจุ่มแบบลงในน้ำ แล้ววางแบบลงบนพื้นราบ จากนั้นนำดินเหนียวที่ผสมได้ที่แล้วเทลงในแบบและทำการอัดดินโดยใช้ไม้ตบดินให้แน่นโดยทั่ว สุดท้ายปาดดินส่วนเกินออกให้เรียบเสมอ ไม้แบบและยกแบบออกจากก้อนดิน

การตากแดด

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

การตากแต่งก้อนดิน

เมื่อก้อนดินแห้งสนิท ด้านข้างก้อนดินจะไม่เรียบ ต้องใช้มีดตากแต่งก้อนดินเพื่อให้ได้ก้อนอิฐที่เรียบสม่ำเสมอ ก่อนจะนำเข้าเตาเผาอิฐ

การเผาอิฐ

เมื่อก้อนดินแห้งแล้ว นำก้อนดินมาวางเป็นแถว แถวหนึ่งกว้างเท่ากับก้อนดินที่จะทำการเผา โดยเว้นระยะระหว่างแถวให้เท่าๆ กัน เพื่อที่จะใส่เกลบลงในช่องว่างระหว่างแถวได้โดยง่าย โดยทั่วไปแล้ว กองดินจะมีความกว้างประมาณ 4 เมตร ยาวประมาณ 6 ถึง 7 เมตร และสูงประมาณ

1.6 เมตร เมื่อกองเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำก้อนอิฐที่เผาสุกแล้วมาล้อมกองดินทั้ง 4 ด้าน เพื่อกันความร้อนไม่ให้กระจายออกไปจากกองดินในขณะเผา จากนั้นเทแกลบลงไปให้เต็มทุกช่องว่างระหว่างแถว จากนั้นจุดไฟให้แกลบไหม้ เมื่อแกลบไหม้และยุบลงให้คอยเติมแกลบให้ได้ระดับอยู่เสมอ เผาอิฐเป็นเวลาประมาณ 15 วัน แล้วรอนอิฐเย็นตัวลง แล้วทำการลำเลียงอิฐไปเข้าโกดังเก็บไว้เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป

2.4 ราคาอิฐ

จากการสำรวจราคาอิฐในบริเวณใกล้เคียงกันพบว่า ราคาไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางของแหล่งดิน ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต ราคาขายส่ง ณ แหล่งผลิต ประมาณ 9 บาท ไม่รวมค่าขนส่ง ราคาขายปลีก ประมาณ 15-20 บาท ขึ้นอยู่กับพื้นที่

2.5 คุณสมบัติของมอร์ต้าร์

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2553) [1] ได้กำหนดคุณสมบัติของมอร์ต้าร์สำหรับอาคารวัสดุก่อไว้ดังนี้

การวัดปริมาณวัสดุต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง เพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมตามที่กำหนดอยู่ตลอดเวลา ซึ่งอัตราส่วนผสมให้เป็นไปตามมาตรฐานสากลที่กำหนด

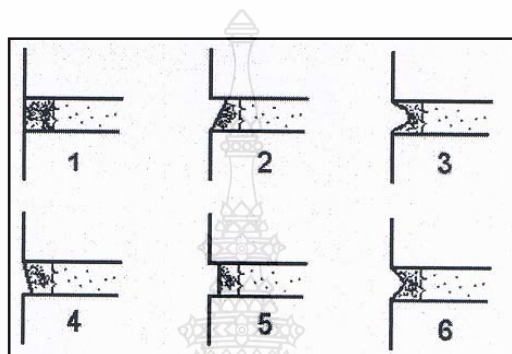
มอร์ต้าร์ผสมจะต้องคลุกวัสดุผสมต่างๆ เข้าด้วยกันในเครื่องผสมที่ใช้เครื่องจักรกลเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 3 นาที ความชื้นเหลวของส่วนผสมจะต้องขึ้นที่สูงเท่าที่จะใช้งานได้ดี

ห้ามนำมอร์ต้าร์ซึ่งทิ้งไว้จากการผสมครั้งแรกเริ่มก่อตัว หรือไม่ได้ใช้ภายใน 2.5 ชั่วโมง มาใช้เป็นอันขาด สำหรับมอร์ต้าร์ซึ่งกระด้างเนื่องจากน้ำระเหยออกไป ให้ทำการผสมต่อเพื่อรักษาให้อยู่ในสภาพใช้ได้ แต่ทั้งนี้ต้องอยู่ภายในระยะเวลา 2.5 ชั่วโมงดังกล่าว

สำหรับชั้น และรอยต่อมอร์ต้าร์ที่ใช้ในก้อนวัสดุต้นให้เรียบ โดยขาดมอร์ต้าร์เต็มหน้าทั้งรอยต่อทางหัว และทางราบ รอยต่อทางราบและทางตั้งต้องหนาไม่น้อยกว่า 9 มิลลิเมตรนอกจากจะระบุเป็นอย่างอื่น รอยต่อทางตั้งจะต้องอัดให้แน่น สำหรับรอยต่อที่ผิวด้านนอกให้ปาดให้เรียบหลังจากอัดมอร์ต้าร์ให้แน่นด้วยเครื่องมือรูปรี หรือกลม รอยต่อที่ผิวด้านในจะปาดมอร์ต้าร์ให้เรียบหรือกำหนดให้เป็นอย่างอื่นก็ได้ รอยต่อของวัสดุก่อที่ไม่ฉาบปูนได้ระดับดินจะต้องใช้เกรียงอัดมอร์ต้าร์ให้แน่น

Hendry และคณะ (1986) ได้แนะนำมอร์ต้าร์สำหรับวัสดุก่อว่าควรประกอบด้วยส่วนผสมของ ซีเมนต์ : ปูนขาว : ทราย ผสมเข้าด้วยกันตามมาตรฐาน BS 5628 สำหรับอิฐที่มีกำลังรับแรง

ก่อนข้างต่ำ ควรใช้มอร์ต้าร์ที่อ่อน โดยมีส่วนผสม 1 : 2 : 9 โดยปริมาตร การกำหนดปริมาณน้ำที่ใช้ผสม ควรใช้ในปริมาณที่พอเหมาะ โดยให้ความแข็งแรงของมอร์ต้าร์เพียงพอตามต้องการและเหมาะสมกับการคูดซึมน้ำของอิฐจะทำให้มีประสิทธิภาพของการยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้าร์กับอิฐต่ำลง นอกจากนี้ปริมาณน้ำยังมีผลกระทบต่อกำลังของมอร์ต้าร์ ซึ่งจะส่งผลไปยังความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุก่อด้วย



ภาพที่ 2.1 รอยต่อของผนังก่ออิฐ

2.6 รอยต่อของผนังอิฐก่อ

โดยทั่วไปแล้ว รอยต่อที่ใช้ในผนังอิฐก่อสามารถแบ่งได้เป็น 6 แบบ คือ

1. รอยต่อแบบ Flush Joint
2. รอยต่อแบบ Weather Joint
3. รอยต่อแบบ Concave Tooled Joint
4. รอยต่อแบบ Struck Joint
5. รอยต่อแบบ Raked Joint
6. รอยต่อแบบ “V” Tooled Joint

2.7 การวางอิฐและรูปแบบการเรียงอิฐ

2.7.1 การวางอิฐแบ่งออกเป็น 6 แบบ คือ

1. Stretcher
2. Header
3. Rowlock
4. Shiner

5. Soldier

6. Sailor

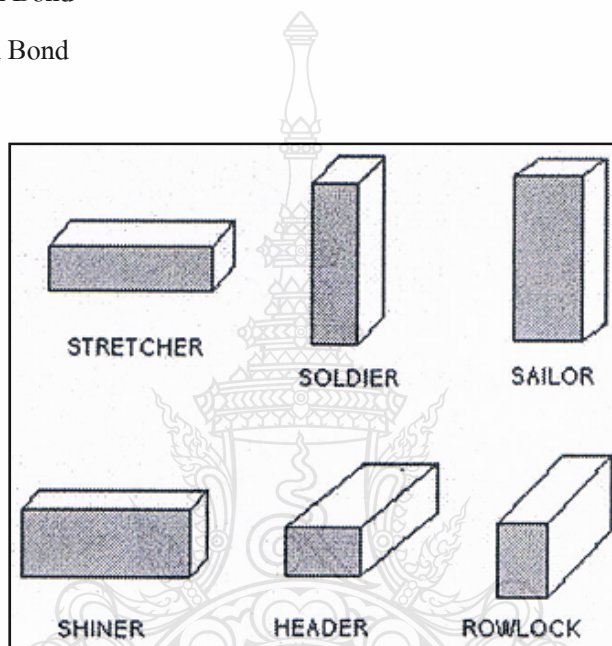
2.7.2 รูปแบบการเรียงสามารถเรียงได้ 4 แบบ คือ

1. Running Bond

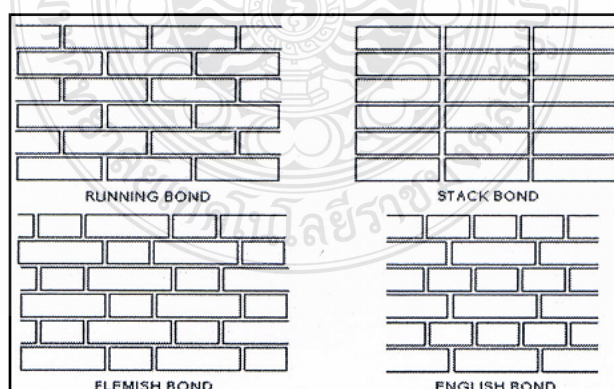
2. Stack Bond

3. Flemish Bond

4. English Bond



ภาพที่ 2.2 แบบการวางอิฐก่อ



ภาพที่ 2.3 แบบการเรียงอิฐก่อ

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของวัสดุก่อ

Curtin และคณะ (1995) กล่าวว่า กำลังรับแรงอัดโดยรวมของวัสดุก่อขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ ประกอบด้วย ความแข็งแรงของวัสดุได้แก่ ก้อนวัสดุก่อและมอร์ตาร์ และรวมถึงการควบคุมคุณภาพในการผลิต การก่อสร้าง พื้นที่หน้าตัดของวัสดุก่อ ความสูง และความหนา หรืออัตราส่วนความชะลุดของวัสดุก่อที่ก้ำกักรับแรงอัดของก้อนวัสดุที่เท่ากัน กำลังแรงอัดโดยรวมของวัสดุก่อจะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ โดยหลังรับแรงอัดของวัสดุก่อจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังของมอร์ตาร์

ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่มีผลกระทบต่อกำลังของวัสดุก่อก็คือ ความหนาของรอยต่อ โดยที่ความหนาของรอยต่อที่ประสานด้วยมอร์ตาร์ที่หนาขึ้น จะทำให้กำลังของวัสดุก่อมีค่าลดลง

2.9 อิฐที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน

ชาติชาย (2539) [4] ได้ศึกษาตัวอย่างอิฐก่อโบราณจากโบราณสถานต่างๆ ในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยาพบว่าอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา มีลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี และชนิดทางจุลทรรศน์ที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำอิฐและชนิดดิน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้มีความคล้ายคลึงกัน และมีความต่อเนื่องถ่ายทอดกันมาตลอดสมัยอยุธยา อย่างไรก็ตามมีตัวอย่างอิฐบางตัวอย่างเมื่อพิจารณาทางด้านโบราณคดีและสถาปัตยกรรมของโบราณสถานแล้ว น่าสงสัยว่าอาจจะเป็นอิฐคนละสมัยหรือเป็นอิฐที่นำมาเสริมเติมภายหลัง แต่ก็สามารถตรวจสอบได้อย่างชัดเจนโดยวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ อีกประการหนึ่งคือ ผลการศึกษาองค์ประกอบของอิฐในปัจจุบันที่ยังมีการผลิตอยู่ที่บ้านลุมพินี บริเวณริมคลองสระบัว ซึ่งอยู่ด้านเหนือของเกาะเมืองอยุธยามีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา แสดงให้เห็นถึงเทคโนโลยีการผลิตอิฐที่สืบทอด นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์อิฐโดยวิธี Thin Section พบว่าอิฐส่วนใหญ่ประกอบด้วยแร่ไมก้า ซึ่งพบว่าเป็นแร่ที่ปะปนในดินชุดท่าม่วง และราชบุรีซึ่งเป็นดินเหนียวที่แพร่กระจายอยู่บริเวณสองฝั่งลำน้ำตอนบนของเกาะเมืองอยุธยาเท่านั้น แสดงให้เห็นชัดเจนว่าแหล่งผลิตอิฐแหล่งใหญ่ที่สุดในสมัยอยุธยาน่าจะเป็นบริเวณริมคลองสระบัว

สุดชาย (2543) [5] ได้ดำเนินการทดสอบหาความสามารถในการรับแรงของอิฐสมัยต่างๆ ที่ใช้ก่อสร้างโบราณสถานภายในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา เพื่อหาแนวโน้มความเปลี่ยนแปลงกำลังแรงอัดของอิฐโบราณที่มีการผลิตในปัจจุบัน บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เปรียบเทียบกับตัวอย่างอิฐโบราณที่หลุดร่วงจากโบราณสถานที่สามารถประมาณอายุการก่อสร้างได้ ตามตารางที่ 2.5 และ 2.6

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างอิฐโบราณ [5]

แหล่งตัวอย่าง	อายุโดย ประมาณ	กว้าง	ขนาด (ซม.)		น้ำหนัก (กรัม)	หมายเหตุ
	(ปี)		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	บูรณะในสมัย จอมพล ป. พิบูลสงคราม
		5.17	5.68	5.31	215	
		5.23	5.62	5.79	226	
3. อิฐวัดขุนแสน	130	5.11	5.15	3.86	139	บูรณะในสมัย พระบาทสมเด็จพระ พระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว
		5.39	5.650	4.43	190	
		5.29	5.50	4.58	185	
4. อิฐวัดหน้าพระเมรุ	145	5.09	5.18	3.83	149	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 สมเด็จพระนารายณ์ มหาราช
		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 สมเด็จพระมหาจักรพรรดิ
		5.24	5.31	4.48	164	
		5.15	5.39	4.10	143	

ตารางที่ 2.6 สรุปค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของอิฐโบราณจากการทดสอบ [5]

แหล่งตัวอย่าง	หน่วย น้ำหนัก	กำลังอัด ประลัย	โมดูลัสความ ยืดหยุ่น	หมายเหตุ
	(ก./ซม. ³)	(กก./ซม. ²)	(กก./ซม. ²)	
1. อิฐบ้านลุมพินี	1.373	40.12	31,033	วรสักดี และคณะ (2539) สถาบันเทคโนโลยีแห่ง เอเชีย, 2540
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	
11. อิฐภูเขาทอง (ยุคแรก)	1.584	67.50	25,482	

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของอิฐโบราณแยกตามกลุ่มอายุ [5]

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) [6] ปูนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดสำหรับโบราณสถานก็คือ ปูนแบบโบราณ ซึ่งหมักจากปูนขาวนั่นเอง เพราะมีความแข็งแรงพอประมาณ มีความพรุน และความยืดหยุ่นค่อนข้างสูงพอเหมาะสำหรับกำแพงอิฐโบราณสถาน ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน แตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีความแข็งและที่บดตันสูง มีการหดตัวมากและขาดความยืดหยุ่น

การเตรียมปูนหมักแบบโบราณ มีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การเตรียมปูนขาวเพื่อใช้ทำปูนหมัก เริ่มจากการเผาหินปูนด้วยความร้อนสูง เพื่อให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์ หินปูนจะแตกออกเป็นก้อนสีขาวใหญ่บ้างเล็กบ้างเรียกว่า ปูนดิบ ซึ่งจะนำไปดำเนินการเป็นมอร์ต้าร์ต่อไป

2. การหมักปูนดิบ ที่ทำให้ปูนดิบดูดน้ำ แล้วกลายสภาพเป็นปูนเหนียว ถ้าปูนดิบที่ได้มาจากโรงงานมีขนาดก้อนใหญ่เกินไป ให้เคาะออกเป็นก้อนเล็กๆ ก่อนหมัก เพื่อลดความรุนแรงจากปฏิกิริยาของก้อนปูนขาวในน้ำ นำปูนดิบไปแช่ในบ่อหมักปูน ใส่ น้ำในบ่อหมักให้สูงกว่าปูนประมาณ 2.5 เซนติเมตรเป็นอย่างน้อย เมื่อใส่ปูนดิบลงในน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาปูนแตกตัวอย่างรุนแรง น้ำและปูนร้อนจัดจนอุณหภูมิขึ้นสูงถึงจุดเดือด ให้กวนปูนอยู่เรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาหยุดและน้ำในบ่อหมักแห้งจะได้ปูนขาวเหนียว นำปูนขาวเหนียวขึ้นจากบ่อหมัก ล้างน้ำร้อนผ่านตะแกรงขนาดตา 5 มิลลิเมตร เพื่อกรองเอาสิ่งปนเปื้อนหรือก้อนปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือก้อนปูนขนาดใหญ่ออกไป เก็บปูนขาวเหนียวนี้ไว้ได้น้ำ ให้น้ำอยู่สูงจากผิวปูนไม่น้อยกว่า 2.5 เซนติเมตร เป็นอย่างน้อย และหมักทิ้งไว้ประมาณ 14 วัน แต่ถ้าจะให้มีความเหนียวมากขึ้นต้องหมักไว้ 60 วันขึ้นไป ปูนหมักนี้สามารถหมักเก็บไว้เป็นปี ปูนหมักที่มีอายุการหมักนานๆ จะแข็งตัว แต่ก็สามารถนำมาใช้งานได้เมื่อผสมน้ำแล้วทำให้ได้ที่

3. การผสมปูนกับทราย เมื่อหมักปูนจนได้ระยะเวลาตามกำหนดแล้วให้นำปูนหมักมาผสมกับทรายและปูนซีเมนต์ขาวโดยปริมาตรดังนี้ ปูนซีเมนต์ขาว 1 ส่วน ปูนหมักร่อนแล้ว 2 ส่วน ทรายหยาบ 9 ส่วน ผสมน้ำพอให้ปูนทรายเข้ากันดี จึงนำไปใช้ก่ออิฐ

2.11 การเสื่อมสภาพของมอร์ต้าร์

Bernard (1995) [6] สรุปถึงการเสื่อมสภาพของวัสดุก่อสร้างว่าเกิดขึ้นจากสาเหตุหลายประการ ภูมิอากาศเป็นหนึ่งในสาเหตุพื้นฐานของการเสื่อมสภาพ การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ ความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุอาคารเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นอยู่ กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ขนาดของความเปลี่ยนแปลงทางมิติ
2. ความยืดหยุ่นของวัสดุ (Elasticity of Material)
3. ความสามารถของวัสดุที่จะแผ่ (creep) หรือไหลภายใต้ น้ำหนัก
4. ค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของวัสดุโดยการเชื่อมต่อกับองค์ประกอบอื่นๆ ของโครงสร้าง

Ashursi (1989) ได้สรุปวงจรของการเสื่อมสภาพของมอร์ตาร์ไว้ว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ประสานวัสดุที่ไม่มีการฉาบผิวปิดรอยต่อจะเริ่มเสื่อมสภาพในช่วงปีแรกๆ ของการก่อสร้าง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ และจะเสื่อมสภาพมากขึ้นจากการกัดเซาะของน้ำฝนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หากมีการซ่อมวัสดุประสานอย่างไม่ถูกวิธีจะทำให้เกิดการแตกร้าวบริเวณรอยต่อเนื่องจากการหดตัวที่แตกต่างของมอร์ตาร์ที่ประสานเข้าไปใหม่

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

วัสดุคอมโพสิต (Composite Material) เป็นวัสดุที่ประกอบกันมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Macroscopic) วัสดุที่ถูกลำมาประกอบเข้าด้วยกันนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะต้องมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุที่ถูกลำมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุที่ถูกลำมาประกอบ ถ้าเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตประเภทพลาสติกเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Plastic หรือ FRP) กับคอนกรีตเสริมเหล็ก จะพบว่าเส้นใยทำหน้าที่เปรียบเสมือนเหล็กเสริมและพลาสติกทำหน้าที่เปรียบเสมือนคอนกรีต

ในปัจจุบันพลาสติกเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Plastic หรือ FRP) โดยเฉพาะแบบอีพ็อกซี (Epoxy) เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) หรือเส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar Fiber) หรือเส้นใยแก้ว (Glass Fiber) ได้ถูกนำมาใช้งานวิศวกรรมโยธาในหลายด้าน เช่น ใช้แทนเหล็กเสริมและเคเบิลใช้ในการเสริมกำลัง (Strengthening) และซ่อมแซม (Repair) โครงสร้างหรือองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างองค์อาคารและโครงสร้างต่างๆ โดยตรงโดยเฉพาะในงานที่ต้องการวัสดุที่มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักสูง มีน้ำหนักเบา และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมและสารเคมีได้ดี

2.13 ชนิดของเส้นใย (Fiber Reinforcement Type) [7]

เส้นใย Fiber Reinforcement ที่นิยมใช้งานเสริมกำลัง โดยทั่วไปคือมีอยู่ด้วยกัน 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 มีความสามารถรับ

แรงดึงได้สูงถึง 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

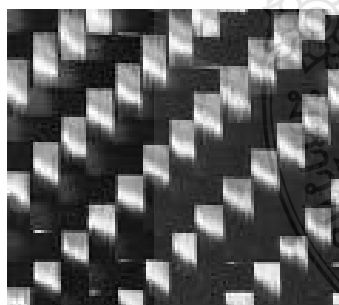
2.13.2 Aramid Fiber หรือเส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar Fiber)

มักใช้งานที่ต้องการทั้งกำลังและความยืดหยุ่น ซึ่ง Aramid Fiber จะสามารถทนแรงกระแทกได้ดี และสามารถงอ 90 องศาได้โดยไม่แตกหัก

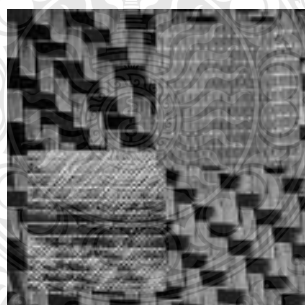
2.13.3 เส้นใยแก้ว (Glass Fiber)

เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) จะเหมาะสมกับการใช้งานแบบระยะสั้น-กลาง หรือไม่มีการใส่ น้ำหนักต่อเนื่องยาวนาน (Sustained Load) เนื่องจากจะเกิดปัญหาจาก Creep หากจะใช้ Glass Fiber ในงานระยะยาวควรควบคุมให้เกิด Stress ไม่เกิน 20% ของ Ultimate Tensile Strength

แต่เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) จะมีความเปราะแตกหักได้ง่ายและไม่สามารถดัดงอที่มุม 90 องศาได้ เนื่องจากจะหักและไม่สามารถถ่ายแรงได้



เส้นใยคาร์บอน

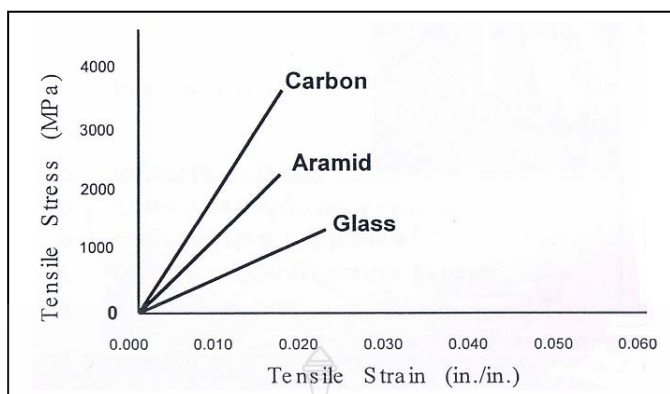


เส้นใยเคฟลาร์



เส้นใยแก้ว

ภาพที่ 2.4 ชนิดของเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber Reinforcement Type)



ภาพที่ 2.5 Stress – Strain เส้นใย (Fiber Reinforcement)

2.14 ลักษณะหรือรูปแบบทั่วไปของเส้นใย (Fiber Reinforcement Form)

รูปแบบของ FRP ที่นิยมใช้งานอยู่ 3 ประเภท คือ

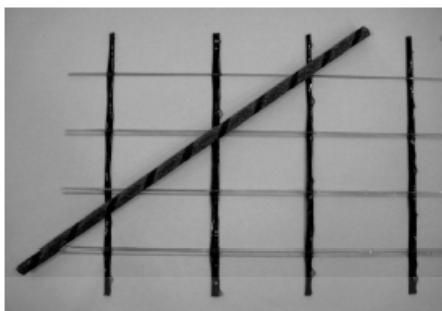
1. แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet)
2. แบบแผ่นแข็ง (Laminate, Plate)
3. แบบเส้น (Rod, Bar)



ภาพที่ 2.6 ลักษณะ Fiber Sheet

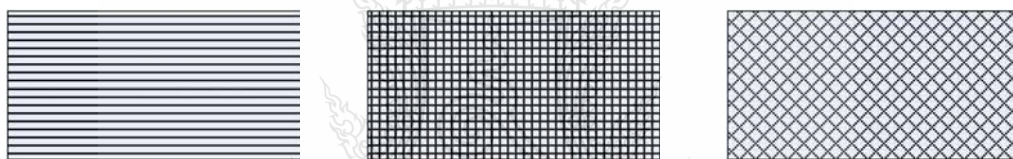


ภาพที่ 2.7 ลักษณะ Laminate



ภาพที่ 2.8 ลักษณะ Rod & Grid

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



ภาพที่ 2.9 ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยแบบ Unidirectional (0°), Bidirectional ($0^\circ+90^\circ$), Bidirectional (45°)

2.15 เรซิน (Resin)

2.15.1 หน้าที่หลักของเรซิน

เรซิน (Resin) มีหน้าที่หลัก 3 ประการคือ ทำหน้าที่ยึดประสานเส้นใย (Fiber) เข้าด้วยกัน ถ่ายแรงระหว่างเส้นใย และป้องกันความเสียหายของเส้นใยจากสภาวะแวดล้อม โดยที่เรซินนั้นมีด้วยกัน 2 ประเภท คือ Thermoplastics เป็นเรซินที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ส่วนใหญ่จะใช้งานอุตสาหกรรม และเรซินประเภท Thermosets เป็นเรซินที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก เรซินประเภทนี้จะใช้ในงานเสริมกำลัง

2.15.2 ชนิดของเรซิน (Resin Types)

1. Unsaturated Polyesters

1) Vinyl Esters (VE)

- 2) Orthophthalic Polyesters
- 3) 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

ตารางที่ 2.8 ข้อมูลทางเทคนิคของน้ำยาเรซิน

Property	Typical Test Value	Unit
Barcol Hardness (935)	84	--
Density at 20 °C	1.21	g/cm ³
Refractive Index n _D ²⁰	1.557	--
Tensile Strength	55	N/mm ²
Elongation	2.0	%
Flexural Strength	110	N/mm ²
Modulus of Elasticity	3200	N/mm ²
Impact Strength	7	KJ/m ²
Impact Strength with Notch	1.0	KJ/m ²
Compressive Strength	160	N/mm ²
Hardness After 10 sec	175	N/mm ²
Water Absorption	0.3	%

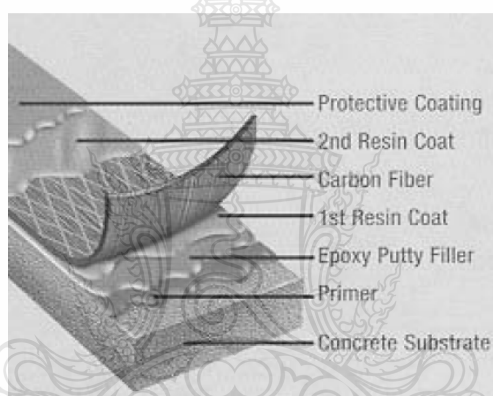
2.16 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP) [8]

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

1. Adhesive Bonding แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยที่ถูกผลิตและบ่มมาจากโรงงานถูกยึดเข้ากับผิวชิ้นงานโดยใช้กาวภายใต้ความดัน

2. Wet Lay-Up ทาเรซินบนผิวชิ้นงานจากนั้นวางพลาสติกเสริมเส้นใยที่อยู่ในรูปของ fabric และใช้ลูกกลิ้งกลิ้งไปบน fabric เพื่อรีดให้กาวส่วนเกินไหลออกมาเพื่อก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่สมบูรณ์

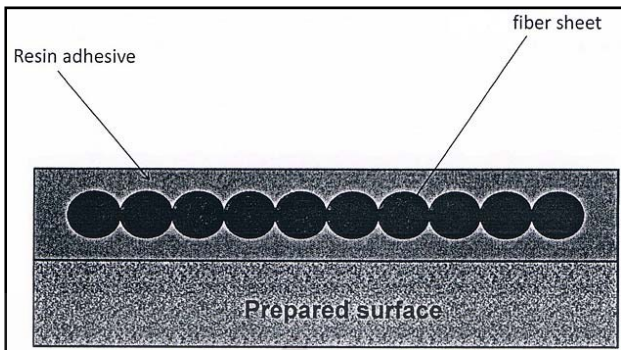
3. Resin Infusion จัดวาง Fabric ลงบนพื้นที่ที่ต้องการเสริมกำลังจากนั้นทำการห่อพื้นที่ดังกล่าวด้วย Vacuum Bag และอัดเรซินให้ซึมเข้าไปใน Fabric และให้ความดันแก่ Vacuum Bag เพื่อกดอัด Fabric ให้สัมผัสกับผิวคอนกรีตอย่างแนบแน่นซึ่งวิธีการนี้จะทำให้เรซินซึมแทรกเข้าไปในรอยแตกของชิ้นงานด้วย



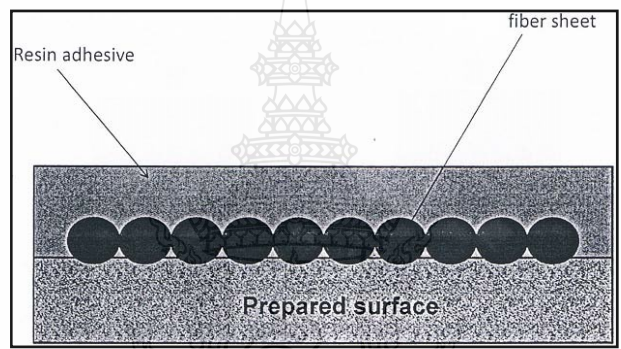
ภาพที่ 2.10 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP)

ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังในลักษณะนี้ จะขึ้นอยู่กับการใช้ชนิดของกาวที่เหมาะสม ซึ่งควรมีค่าความแกร่ง และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานและพลาสติกเสริมเส้นใยให้มากที่สุด

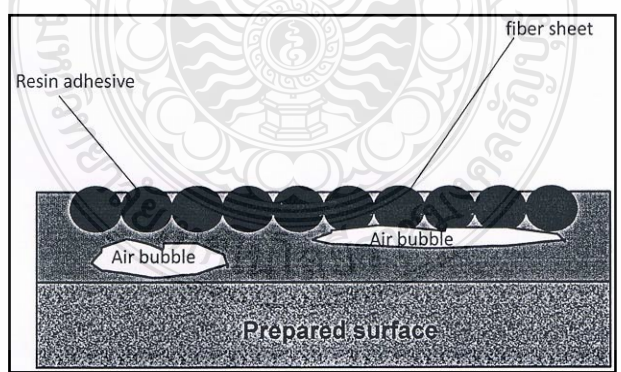
ในสามวิธีการติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยเข้ากับผิวชิ้นงานข้างต้น วิธีที่ใช้มากที่สุด เหมาะสมกับการก่อสร้างงานที่สุุด และถูกที่สุดคือ วิธี Wet Lay-Up อย่างไรก็ตามเรซินที่ใช้ควรมีปริมาณที่เหมาะสมเพราะถ้ามากเกินไปจะทำให้ Fabric ย่นได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังลดลงอย่างมาก นอกจากนั้นแล้ววิธีการนี้ อาจจะมีฟองอากาศเกิดขึ้นในเนื้อกาวได้เป็นจำนวนมากหากไม่มีการรีดกาวด้วยลูกกลิ้งที่ดี ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้กาวเสื่อมสภาพได้ในเวลาอันสั้น วิธี Resin Infusion ในสนามเป็นวิธีการที่ค่อนข้างใหม่ที่ทำให้กาวยึดติดกับผิวคอนกรีตและ Fabric ได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.11 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP) อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2.12 การติดตั้งโดยเส้นใย (Fiber Reinforcement) อยู่ด้านล่างเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังลดลง



ภาพที่ 2.13 ฟองอากาศในเรซิน เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังลดลง

2.17 การออกแบบและข้อกำหนดรายละเอียด FRP [8]

2.17.1 การกำหนดทิศทางของแรง

แรงในเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber) จะเป็นแรงดึง ฉะนั้นแนวแรงควรจะเป็นเส้นตรงในระนาบให้มากที่สุด ในการออกแบบควรมีการกระจายแรงไปตาม 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) [9]

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

2.18.2 ควรมีการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง โดยที่ Stress ที่เกิดขึ้นจากการรับแรงในแนวนานกับผิวสัมผัสควรอยู่ในระดับที่ต่ำเท่าที่จะเป็นไปได้

2.18.3 ระยะ Development Length จากตำแหน่งที่ต้องการเสริมกำลัง และการต่อทาบของแต่ละ Layer ต้องเพียงพอต่อการถ่ายเทและกระจายแรงทั้งใน Flexural Strengthening และ Shear Strengthening

2.18.4 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 เช่น เมื่อรับน้ำหนัก Concentrate Load และมี Hogging Region ใกล้กับ Support

2.18.5 ทิศทางของการเสริมกำลัง Unidirectional FRP จะสามารถรับแรงได้ดีเฉพาะในทิศทางการจัดเรียงเส้นใยเท่านั้น ส่วนในทิศทางตั้งฉากจะอ่อนแอกว่ามากหรือใช้ไม่ได้เลย

2.18.6 Bidirectional Fiber Sheet จะควบคุมแนวทิศทางแรงและคุณภาพการทำงานได้ยากกว่าการใช้ Unidirectional 2 ชั้นในทิศทางตั้งฉากกัน

2.18.7 โดยทั่วไป Fiber จะรับแรงเป็นแนวเส้นตรง ในการออกแบบไม่ควรเปลี่ยนทิศทางของ Fiber เช่น การหักมุมหรือตัดโค้งงอ หากจำเป็นก็ควรมีรัศมีความโค้งที่เพียงพอ หรือใช้การแยกส่วนแล้วต่อทาบกับ Fiber ในทิศทางใหม่ที่ต้องการ

2.18.8 ไม่ควรติดตั้ง FRP ผ่านมุมงอด้านใน (Inner Corner) เนื่องจากจะเป็นจุดเริ่มของการ Debonding

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

2.18.10 การใช้ Adhesive ที่มากเกินไป อาจทำให้แนวเส้นใย Fiber เกิดการเคลื่อนตัว และหย่อนในขณะที่ถ้าใช้ Adhesive ไม่เพียงพอ ก็จะทำให้เกิด Unsaturated Area ซึ่งจะทำให้การถ่ายเทแรงไม่สมบูรณ์ หรือเป็นจุดเริ่ม Debonding

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

2.18.12 การลบมุมที่ไม่เรียบร้อย หรือมีรัศมีความโค้งที่ไม่เพียงพอ จะทำให้บริเวณมุมมี Stress สูง และ Fiber อาจหักในขณะที่ติดตั้ง หรือนึกขาดในขณะที่รับแรง



ภาพที่ 2.14 ลักษณะการ Debonding บริเวณมุมงอด้านใน

2.19 พฤติกรรมของผนังอิฐก่อ (Masonry Wall) รับแรงกระทำด้านข้าง

Miha Tomazevic (2008) [10] เมื่อผนังอิฐก่อถูกแรงกระทำรวมกันทั้งทางด้านแนวตั้งและแนวราบพฤติกรรมของผนังอิฐก่อนั้น จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของผนัง (Height/Length Ratio), คุณสมบัติ และกำลังของอิฐก่อ นอกจากนี้พฤติกรรมของผนังอิฐก่อยังขึ้นอยู่กับ

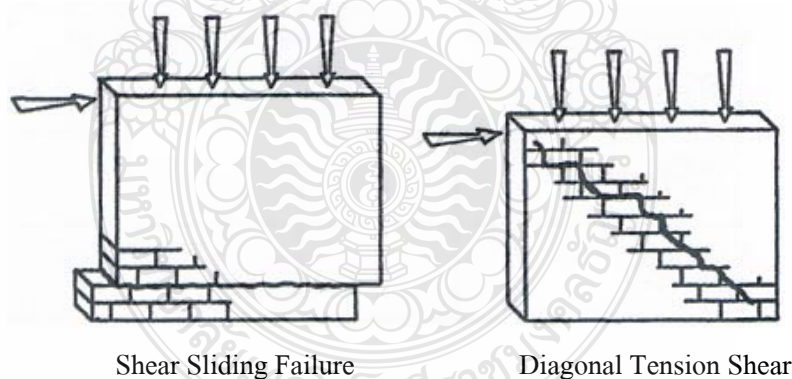
กับอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress) ในผนังอิฐก่อ กับน้ำหนักที่กระทำ และกำลังอัดของอิฐก่อ เช่นเดียวกันกับผนังอิฐก่อเมื่อรับแรงด้านข้าง พฤติกรรมของผนังอิฐก่อจะขึ้นอยู่กับทิศทาง และขนาดของแรงกระทำด้วยเช่นกัน

เมื่อพิจารณาผนังอิฐก่อรับแรงกระทำทางด้านข้าง และตัวแปรต่างๆ ดังกล่าวที่มีผลต่อพฤติกรรมของผนังอิฐก่อแล้ว อาจจะทำให้ผนังอิฐก่อวิบัติจนไม่สามารถต้านแรงกระทำได้ใน 2 กรณีด้วยกันคือ

1. Shear Sliding failure จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงเค้นอัดในแนวตั้ง (Vertical Compressive Stresses) เกิดขึ้นในผนังมีขนาดต่ำ และมอร์ตาร์ที่ใช้ในการก่ออิฐไม่มีคุณภาพ ดังภาพที่ 2.15 ลักษณะการวิบัติเช่นนี้ นานๆ ครั้งจึงจะเกิดขึ้น ซึ่งจะพบบ่อยในส่วนล่างของผนัง

2. Diagonal Tension Shear Failure จะเกิดรอยแตกบนผนังอิฐก่อจากด้านล่างของผนังขึ้นไปทางด้านบนผนังในแนวทแยง ดังภาพที่ 2.15 ลักษณะการวิบัติเช่นนี้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของอิฐก่อ และมอร์ตาร์ ลักษณะรอยแตกในแนวทแยงนี้อาจแบ่งได้อีกคือ

- 1) รอยแตกตามรอยต่อของอิฐก่อ
- 2) รอยแตกผ่าอิฐก่อ
- 3) มีทั้งรอยแตกตามรอยต่อ และผ่าอิฐก่อ

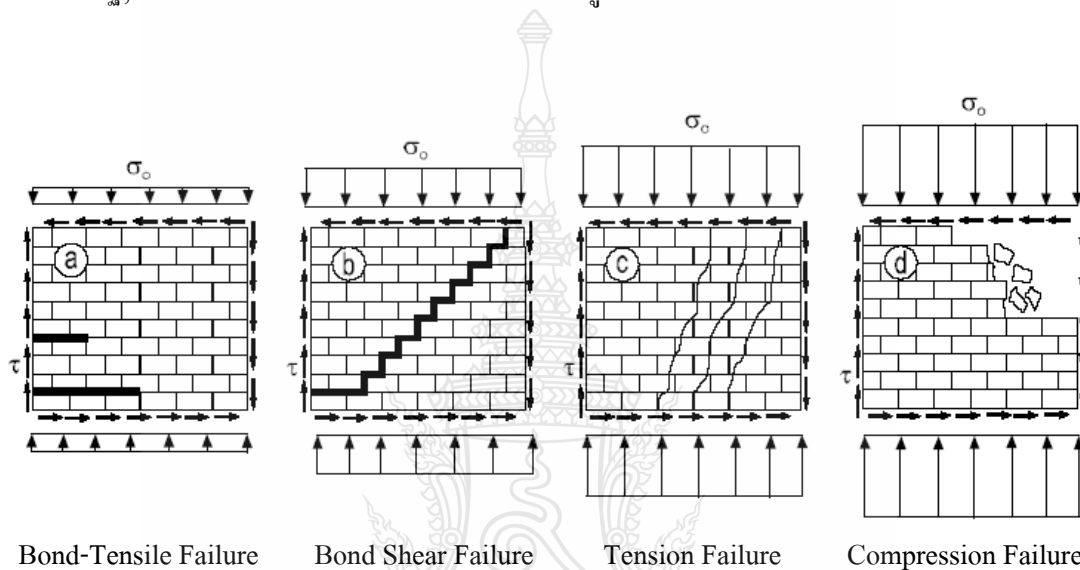


ภาพที่ 2.15 การวิบัติของผนังอิฐก่อเมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างร่วมกับแรงกระทำในแนวตั้ง

Gero Marzahn (1996) [11] การวิบัติในผนังอิฐก่อเนื่องจากแรงเฉือนสามารถแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะดังภาพที่ 2.16 ซึ่งการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ แรงเค้นเฉือนกับแรงเค้นอัดในแนวตั้ง

1. Bond-Tensile Failure
2. Shear Failure In The Bed Joint (Bond Shear Failure)
3. Tension Failure of The Bricks
4. Compression Failure of Masonry

Tension Failure of The Bricks และ Compression Failure of Masonry ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก้อนอิฐ, Bond-Tensile Failure จะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าสูงกว่า Bond-Shear Failure



ภาพที่ 2.16 ลักษณะการวิบัติในผนังอิฐก่อเนื่องจากแรงเฉือน

2.20 การทดสอบผนังอิฐก่อ (Masonry Wall) รับแรงกระทำด้านข้าง

TNO Report (2004) [12] กล่าวถึงตัวแปรหลายๆ ตัวที่พบในการทดสอบผนังอิฐก่อ ซึ่งได้แก่

1. ชนิดของอิฐก่อที่ใช้ก่อเป็นผนังอิฐก่อทดสอบ
2. ผนังอิฐก่อที่ช่องเปิด
3. ผนังอิฐก่อที่มี หรือ ไม่มีการเสริมกำลัง
4. ผนังอิฐก่อที่มี หรือ ไม่มีเฟรม (Frame) ล้อมรอบผนังอิฐก่อ
5. ทิศทางในการกระจายน้ำหนัก
6. เงื่อนไขที่ด้านบนของผนังอิฐก่อ
7. ผนังอิฐก่อที่มี หรือ ไม่มี แรงกระทำคดทับในแนวดิ่ง
8. ชนิดของน้ำหนักกระทำ (Monotonic, Cyclic, Impact)

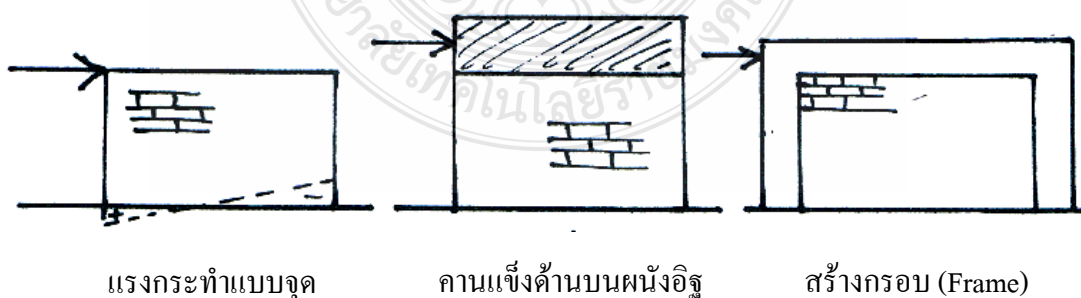
เงื่อนไขต่างๆ เหล่านี้ จะสามารถกำหนดลักษณะของการเกิดแรงเฉือน และการเสียรูปของผนังอิฐก่อทดสอบ ดังภาพที่ 2.17 โดยด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแรงที่กระทำในแนวราบ



ภาพที่ 2.17 การเสียรูปเนื่องจากแรงกระทำด้านข้างของผนังอิฐก่อทดสอบ

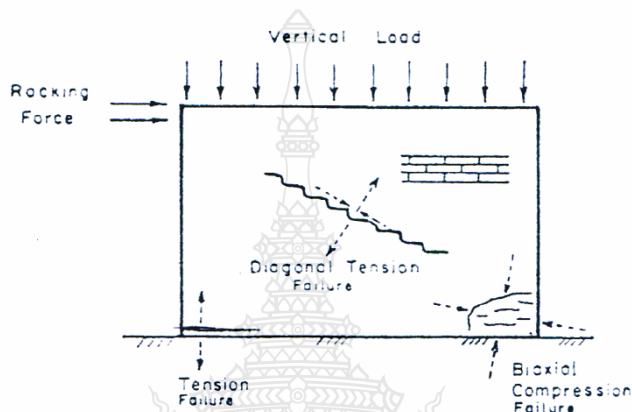
สำหรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในผนังอิฐก่อทดสอบนั้น เกิดจากการหมุนของผนังอิฐก่อทดสอบเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้าง และฐานด้านล่างของผนังอิฐก่อทดสอบยึดแน่น สำหรับการทดสอบจำเป็นต้องประยุกต์ใช้วิธีใดวิธีหนึ่งที่ด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบ ได้แก่วิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

1. ให้แรงกระทำแบบจุด (Concentrated) ที่ด้านบนของผนังอิฐก่อ ดังภาพที่ 2.18
2. นำเอาคานที่มีความแข็งแรงมากไว้ที่ด้านบนของผนังอิฐก่อ ลักษณะเช่นนี้สามารถกระจายความเค้นเฉือน (Shear Stress) ด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบ ดังภาพที่ 2.18
3. ใช้คานที่มีความแข็งแรงต่ำเปรียบเทียบกับให้เห็นความคล้ายกันกับผนังอิฐก่อทดสอบ
4. สร้างกรอบ (Frame) ล้อมรอบผนังอิฐก่อทดสอบ ดังภาพที่ 2.18

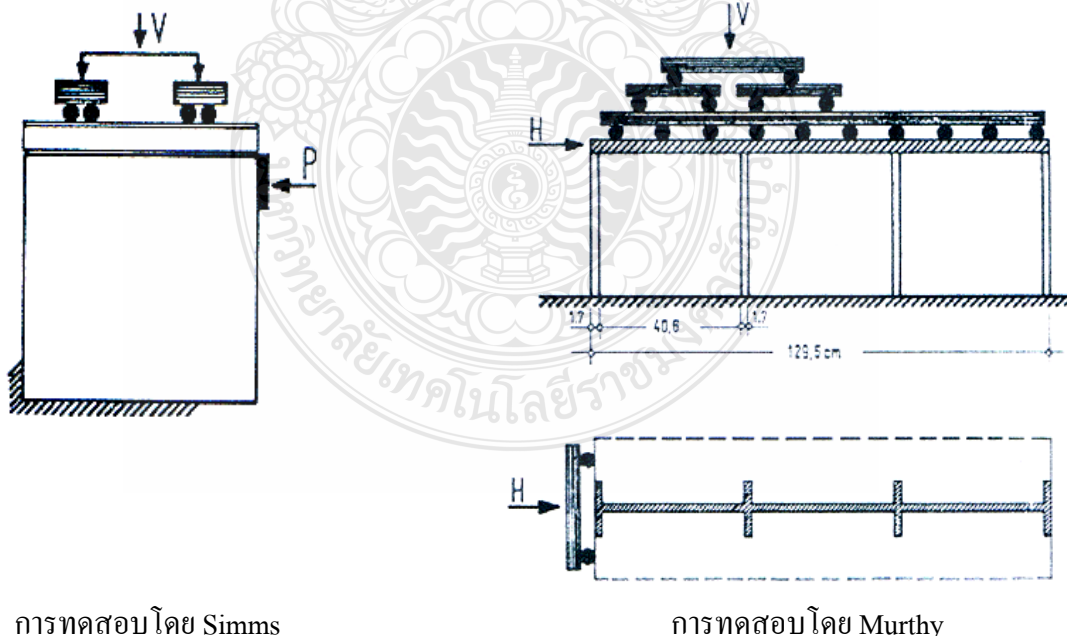


ภาพที่ 2.18 ลักษณะผนังอิฐก่อในการทดสอบแบบต่างๆ

ภาพที่ 2.18 แสดงการเกิดโมเมนต์พื้นฐานด้านล่างของผนังอิฐก่อทดสอบ เนื่องจากแรงที่กระทำทางข้างกับผนังอิฐก่อทดสอบ การวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดังกล่าวจะเกิดแรงดึง (Tensile Strength) ที่บริเวณฐานของผนังอิฐก่อทดสอบ ดังภาพที่ 2.19 การวิบัติจากแรงดึง (Tensile Strength) นี้จะเกิดขึ้นในด้านที่แรงกระทำด้านข้างกระทำกับผนังอิฐก่อทดสอบ ในตำแหน่งใต้แรงกระทำดังกล่าวจากด้านบนถึงด้านล่างของผนังอิฐก่อทดสอบ

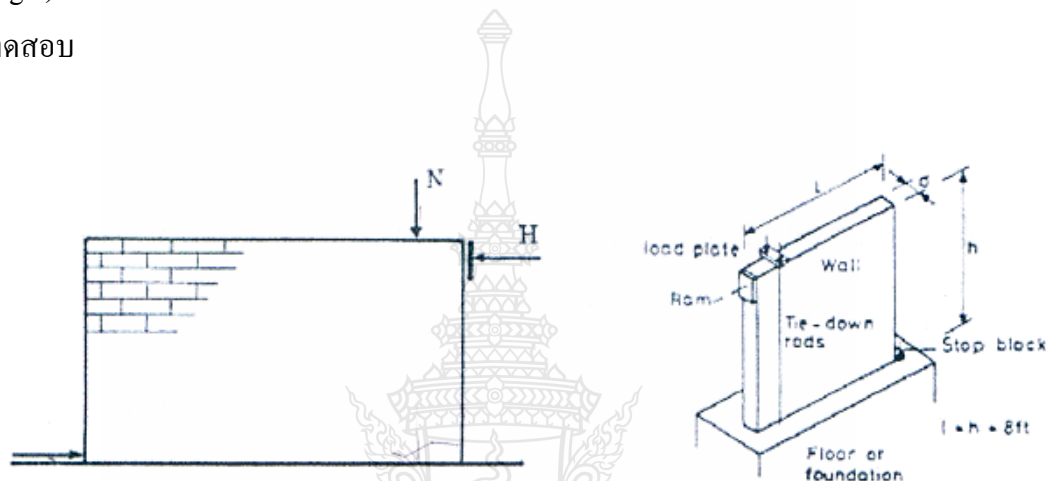


ภาพที่ 2.19 ลักษณะผนังอิฐก่อทดสอบวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน



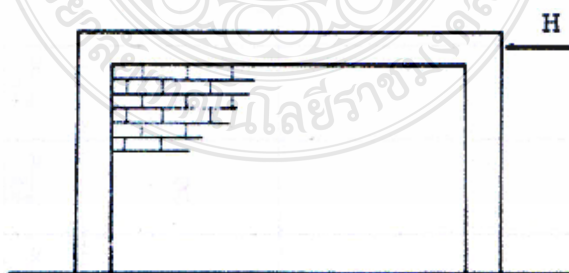
ภาพที่ 2.20 ลักษณะการทดสอบผนังอิฐก่อรับแรงด้านข้างโดย Simms และ Murthy

Simms และ Murthy ดำเนินการทดสอบผนังอิฐก่อในภาพที่ 2.20 ตามลำดับ โดยเป็นการประยุกต์ใช้น้ำหนักกดทับบนผนังอิฐก่อทดสอบเพื่อเป็นการลดทอนแรงเค้นดึง (Tensile Stress) ที่บริเวณฐานด้านล่างของผนังอิฐก่อทดสอบ หรือเพื่อเป็นการเปลี่ยนรูปจากแรงเค้นดึง (Tensile Stress) ให้เป็นแรงเค้นอัด (Compressive Stress) แต่ถ้าหากน้ำหนักที่กดทับบนผนังอิฐก่อทดสอบดังกล่าวมีขนาดมากเกินไป อาจจะทำให้ผนังอิฐก่อทดสอบเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงอัด (Compressive Strength) ได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นด้านฝั่งตรงข้ามกับแรงกระทำด้านข้าง บริเวณตำแหน่งด้านล่างของผนังอิฐก่อทดสอบ



ภาพที่ 2.21 ลักษณะการเสริมเหล็กเส้นกลม (Rebar, Rods) ในแนวตั้งเพื่อป้องกันการหมุนของผนังอิฐก่อทดสอบ โดย Monk

Monk ทดสอบแรงเฉือนในผนังอิฐก่อ โดยแรง N จะป้องกันการหมุนของผนังอิฐก่อทดสอบ ด้วยวิธีการเสริมเหล็กเส้นกลม (Rebar, Rods) ในแนวตั้ง และวิ่งเหล็กจากด้านบน จนถึงด้านล่างของผนังอิฐก่อทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 72-61 Standard Shear Test ตามภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.22 การทดสอบผนังอิฐก่อ ด้วยการเสริมกรอบ (Frame) โดยรอบผนังอิฐก่อทดสอบ โดย Benjamin, Williams และ Wood

Benjamin ,Williams และ Wood ทำการทดสอบผนังอิฐก่อ ด้วยการเสริมกรอบ (Frame) โดยรอบผนังอิฐก่อทดสอบ ตามภาพที่ 2.22 ด้วยเหล็ก หรือคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นการป้องกันการหมุนผนังอิฐก่อทดสอบที่เป็นสาเหตุของการแรงเค้นดึง (Tensile Stress) ในผนังอิฐก่อทดสอบ ซึ่งกรอบ (Frame) ดังกล่าวจะเปลี่ยนรูปไปตามผนังอิฐก่อทดสอบด้วย ตามภาพที่ 2.17



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้จะดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลของอิฐโบราณ ตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Materials) : ASTM C67 ได้แก่ การวัดขนาด การหาน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ และการรับกำลังอัดของอิฐ และทำการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณในกรณีดังต่อไปนี้

1. ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading) จำนวน 1 ตัวอย่าง

2. ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ เมื่อเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร และซ่อมแซมรอยแตกร้าวบนผิวพื้นผนังด้วย Fiber-Reinforced Polymer (FRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร จำนวน 1 ตัวอย่าง

3. ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ เสริมด้วย Fiber-Reinforced Polymer (FRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร จำนวน 3 ตัวอย่าง

โดยกำหนดวิธีการทดสอบเป็นลำดับขั้นตอนดังนี้

3.1 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่าง

ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C67 โดยอิฐโบราณที่นำมาทดสอบในครั้งนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา [4] [5] จากแหล่งทำอิฐปัจจุบัน บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยวิธีการดังต่อไปนี้

3.1.1 การวัดขนาด

1. เครื่องมือบรรทัดเหล็กมีความยาว 30 ซม. และมีความละเอียดถึง 1 มม.
2. จำนวนและลักษณะก้อนตัวอย่าง ใช้อิฐเต็มก้อนขณะแห้ง จำนวน 10 ก้อน มีขนาดและสีแตกต่างกันมากที่สุดเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า
3. วิธีการทดสอบ ใช้เครื่องมือวัดในข้อ 1. วัดความยาวของอิฐทางหน้ายาวทั้ง 4 หน้าบันทึกผลการวัดทั้ง 4 หน้าให้ละเอียดถึง 1 มม. และบันทึกค่าเฉลี่ยความยาวให้ละเอียดถึง 0.5 มม. วัดความกว้างและความหนาของก้อนในลักษณะเช่นเดียวกับการวัดความยาว และบันทึกผลการวัดในทำนองเดียวกัน



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างของอิฐที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 3.2 การวัดขนาดของอิฐที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.2 การทำน้ำหนัก

1. เครื่องมือ

1) เครื่องชั่ง มีความละเอียดภายในร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่เล็กที่สุดที่ถูกทดสอบ

2) ตู้อบแห้ง มีอุณหภูมิระหว่าง 110 ถึง 115 องศาเซลเซียส

3) พัดลม



ภาพที่ 3.3 การทดสอบการห้ำน้ำหนักโดยการอบแห้ง



ภาพที่ 3.4 การทดสอบการห้ำน้ำหนักหลังจากการอบแห้ง

2. วิธีทดสอบ

1) 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

2) ทำให้อิฐตัวอย่างเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง โดยการเก็บอิฐตัวอย่างวางแยกๆ กันในห้องที่อากาศถ่ายเทได้สะดวกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยเปิดพัดลมให้กระแสลมพัดผ่านอิฐตัวอย่างเป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง เมื่อสัมผัสไม่รู้สึกร้อนจึงนำไปชั่งน้ำหนักต่อไปได้

3) นำอิฐตัวอย่างที่ได้จากการอบแห้ง และทำให้เย็นตัวลงแล้ว ไปชั่งน้ำหนัก เรียกว่าน้ำหนักแห้ง

3. วิธีการคำนวณและรายงานผล

1) คำนวณหาน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ของอิฐตัวอย่าง โดยน้ำหนักเป็นกิโลกรัมหารด้วยพื้นที่เฉลี่ยระหว่างหน้าทั้งสองของอิฐตัวอย่างเป็นตารางเมตร ตามลักษณะที่ก่อกำแพง

2) การรายงานผลจะรายงานผลการคำนวณอิฐแต่ละก้อนและผลเฉลี่ยของอิฐ 5 ก้อน

3.1.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

1. เครื่องมือ

เครื่องชั่งที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ ใช้เครื่องชั่งที่สามารถชั่งน้ำหนักได้ 2000 กรัม และมีความละเอียดถึง 0.5 กรัม

2. จำนวนและลักษณะก้อนตัวอย่าง

ใช้อิฐตัวอย่างเต็มก้อนจำนวน 5 ก้อน ที่เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดในข้อ 3.1.2 และอยู่ในสภาพสมบูรณ์ ไม่มีแตกหัก หรือบิ่น

3. วิธีการทดสอบ

1) การทดสอบการแช่น้ำ

แช่อิฐตัวอย่างในสภาพที่มีอุณหภูมิ 15.5 ถึง 30°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง นำอิฐตัวอย่างขึ้นจากน้ำและเช็ดอิฐตัวอย่างด้วยผ้าที่ขึ้น เพื่อเอาน้ำส่วนเกินที่ผิวของอิฐตัวอย่างออก แล้วชั่งน้ำหนักของอิฐตัวอย่าง ขึ้นตอนที่นำอิฐตัวอย่างขึ้นจากน้ำและชั่งน้ำหนักจะต้องทำให้เสร็จภายใน 5 นาที

ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐตัวอย่างจะหาได้จากสมการ

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

โดยที่

W_d = น้ำหนักของอิฐตัวอย่างที่แห้ง

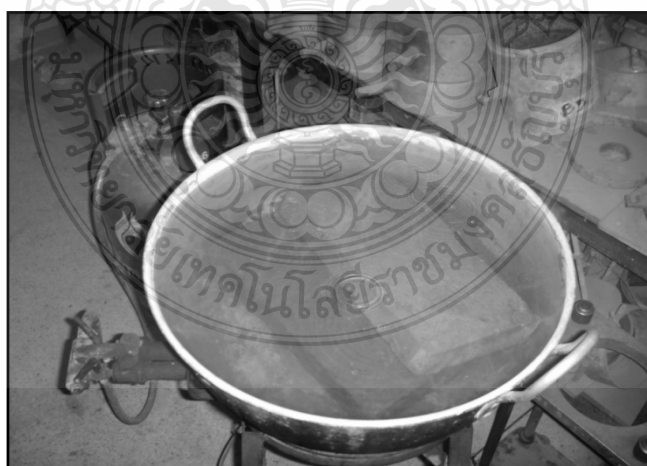
W_s = น้ำหนักของอิฐตัวอย่างหลังแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำโดยการแช่น้ำ

2) การทดสอบการต้มเดือด แบบ 2 ชั่วโมง

ในการทดสอบครั้งนี้ อีฐตัวอย่างจะใช้อีฐตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการแช่น้ำ ซึ่งดูดซึมน้ำจนอิ่มตัวแล้ว ต้มน้ำที่มีอีฐตัวอย่างแช่อยู่จนเดือดภายใน 1 ชั่วโมง แล้วทำการต้มต่อไปเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง จากนั้นดับไฟรอจน อุณหภูมิของน้ำลดลงอยู่ในช่วง 15.5 ถึง 30 °C แล้วนำอีฐตัวอย่างขึ้นจากน้ำและเช็ดอีฐตัวอย่างด้วยผ้าที่ชื้น เพื่อเอาน้ำส่วนเกินที่ผิวของอีฐตัวอย่างออก แล้วชั่งน้ำหนักของอีฐตัวอย่าง ขั้นตอนที่น่าอีฐตัวอย่างขึ้นจากน้ำและชั่งน้ำหนักจะต้องทำให้เสร็จภายใน 5 นาที



ภาพที่ 3.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำโดยการต้มเดือดแบบ 2 ชั่วโมง

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

3.2 ทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่าง

ทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Property) ของอิฐโบราณตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C67 โดยอิฐโบราณที่นำมาทดสอบในครั้งนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา [4] [5] จากแหล่งทำอิฐปัจจุบัน บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลคูมพลี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยวิธีการดังต่อไปนี้

3.2.1 การทดสอบกำลังต้านแรงอัด

1. เครื่องมือ

เครื่องกดเป็นไปตามมาตรฐานของสมาคมเพื่อการทดสอบและวัสดุของอเมริกัน

ASTM E4-1973

2. จำนวนและลักษณะก้อนตัวอย่าง

ใช้อิฐตัวอย่างเต็มก้อนจำนวน 5 ก้อน ที่ได้จากข้อ 3.1.2 และอยู่ในสภาพสมบูรณ์ ไม่มีแตกหัก หรือบิ่น

3. การปรับผิวอิฐตัวอย่าง

การปรับผิวอิฐอย่างนี้เป็นการปรับผิวด้วยปูนปลาสเตอร์ (Gypsum Capping) ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ทำการปรับผิว ได้แก่ปูนปลาสเตอร์และน้ำ ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก การปรับผิวจะมีความหนาประมาณ 3 มม. และพืดังก่อจะต้องมีความลาดเอียงไม่เกิน 0.076 มม. ต่อ 406.4 มม. จากนั้น ทำการบ่มปูนปลาสเตอร์อย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนทดสอบ



ภาพที่ 3.7 การทดสอบการรับแรงกดอัด

4. วิธีการทดสอบ

1. วางอิฐตัวอย่างโดยให้จุดกึ่งกลางของอิฐตัวอย่างทางด้านบน อยู่ตรงจุดกึ่งกลางของหัวกด โดยยอมให้เอียงกันไม่เกิน 1.6 มม.

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

3. การคำนวณและการรายงาน

1) คำนวณหาค่ากำลังต้านแรงอัด ของอิฐตัวอย่าง ได้จากสมการ

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

โดยที่

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

F = แรงกระทำสูงสุด มีหน่วยเป็น N

A = พื้นที่เฉลี่ยของผิวด้านบนและด้านล่างของอิฐตัวอย่างที่รองรับแรงกดอัด มีหน่วยเป็น m^2

2) การรายงานผลจะรายงานผลการคำนวณแต่ละก้อนและผลเฉลี่ยจาก 5

ก้อน

3.3 ปูนก่อ (Mortar) ที่ใช้ในการทดสอบ

สมชาติ (2540) [6] ปูนก่อที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดสำหรับผนังอิฐก่อโบราณก็คือ ปูนก่อแบบโบราณ ซึ่งหมักจากปูนขาว เพราะมีความแข็งแรงพอประมาณ มีความพรุน และความยืดหยุ่นค่อนข้างสูงพอเหมาะสำหรับกำแพงอิฐโบราณ ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับอิฐโบราณ แตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีความแข็งและทึบตันสูง มีการหดตัวมากและขาดความยืดหยุ่น โดยการเตรียมปูนก่อแบบโบราณ มีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 การเตรียมปูนขาวเพื่อใช้ทำปูนหมัก

เริ่มจากการเผาหินปูนด้วยความร้อนสูง เพื่อไล่คาร์บอนไดออกไซด์ หินปูน จะแตกออกเป็นก้อนสีขาวใหญ่บ้างเล็กบ้างเรียกว่า ปูนดิบ ซึ่งจะนำไปดำเนินการเป็นมอร์ตาร์ต่อไปการหมักปูนดิบ เพื่อให้ปูนดิบคุดน้ำแล้วกลายเป็นปูนเหนียว

3.3.2 ถ้าปูนดิบที่ได้มาจากโรงงานมีขนาดก้อนใหญ่เกินไป ให้เคาะออกเป็นก้อนเล็กๆก่อนหมัก เพื่อลดความรุนแรงจากปฏิกิริยาของก้อนปูนขาวในน้ำ

1. นำปูนดิบไปแช่ในบ่อหมักปูน ใส่ น้ำในบ่อหมักให้สูงกว่าปูนประมาณ 2.5 เซนติเมตรเป็นอย่างน้อย เมื่อใส่ปูนดิบลงในน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาปูนแตกตัวอย่างรุนแรง น้ำและปูนร้อนจัดจนอุณหภูมิขึ้นสูงถึงจุดเดือด

2. กวนปูนอยู่เรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะหยุด และน้ำในบ่อหมักแห้ง จะได้ปูนขาวเหนียว

3. นำปูนขาวเหนียวขึ้นจากบ่อหมัก แล้วล้างน้ำร้อนผ่านตะแกรงขนาดตา 5 มิลลิเมตร เพื่อกรองเอาสิ่งปนเปื้อนหรือก้อนปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือก้อนปูนขนาดใหญ่ออกไป

4. เก็บปูนขาวเหนียวนี้ไว้ได้น้ำให้น้ำอยู่สูงจากผิวปูนไม่น้อยกว่า 2.5 เซนติเมตรเป็นอย่างน้อย

5. หมักทิ้งไว้ประมาณ 14 - 60 วัน ปูนหมักที่มีอายุการหมักนานๆ จะแข็งตัวแต่ก็สามารถนำมาใช้งานได้เมื่อผสมน้ำแล้วทำให้ได้ที่

3.3.3 การผสมปูนกับทราย

เมื่อหมักปูนจนได้ระยะเวลาตามกำหนดแล้วให้นำปูนหมักมาผสมกับทรายและปูนซีเมนต์ขาวโดยปริมาตร ในอัตราส่วน 1 : 2 : 9 ผสมน้ำพอให้ปูนทรายเข้ากันดี จึงนำไปใช้ก่ออิฐ

3.4 วัสดุเส้นใย (Fiber Reinforcement)

วัสดุเส้นใยที่ใช้เสริมแรง และซ่อมแซมผนังอิฐก่อโบราณตัวในการศึกษาวิจัยนี้ ใช้เส้นใยไฟเบอร์ ชนิดเส้นใยแก้ว Glass Fiber (GFRP) แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) เนื่องจากลักษณะเส้นใยมีสีขาวใส การรบกวนทัศนียภาพของผนังอิฐก่อโบราณไม่มากนัก เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับผนังอิฐก่อโบราณ

ใช้เรซิน (Resin) ในการทำหน้าที่ยึดประสานวัสดุเส้นใย (Fiber) กับผนังอิฐก่อโบราณเข้าด้วยกัน และทำหน้าที่ในการถ่ายแรงจากผนังอิฐก่อโบราณสู่เส้นใย นอกจากนี้ยังป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเส้นใยจากสภาวะแวดล้อมอีกด้วย

3.5 การเตรียมผนังอิฐโบราณตัวอย่างสำหรับทดสอบ [13] [14] [15] [16]

การทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ ใช้ขนาดของผนังอิฐก่อทดสอบในอัตราส่วนความสูงต่อความยาว (Height to Length) 1 : 1 ซึ่งการใช้ผนังอิฐก่อทดสอบในอัตราส่วนดังกล่าวจะช่วยให้ลักษณะพฤติกรรมแรงเฉือนในผนังอิฐก่อตัวอย่างภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading) มีความชัดเจนยิ่งขึ้น โดยมีรายละเอียดในการเตรียมผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ดังนี้

3.5.1 ก่อผนังอิฐโบราณตัวอย่างแต่ละผนัง ขนาดความสูง 1.50 เมตร กว้าง 1.50 เมตร หนา 0.60 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.8

3.5.2 ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ก่ออยู่บนบนฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด ความกว้าง 0.90 เมตร ยาว 2.00 เมตร หนา 0.30 เมตร ที่ยึดแน่นด้วยเหล็กเส้นตีเกลียว และขันแน่นด้วย Bolt โดยการเจาะฝังเหล็กเส้นตีเกลียวด้วย Chemical Bolt ลงในพื้นที่ห้องปฏิบัติการเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของผนังอิฐก่อทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.14

3.5.3 ด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบมีเทคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด กว้าง 0.60 เมตร ลึก 0.30 เมตร และยาว 1.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.14 การติดตั้งคานดังกล่าวจะลักษณะคล้ายคลึงกับ โครงสร้างผนังโบราณ และทำหน้าที่ในการกระจายแรงกระทำทางด้านข้างสู่ผนังตัวอย่าง

3.5.4 ทำเครื่องหมายบนห้องปฏิบัติการเพื่อวางตำแหน่งและยึดฐานคอนกรีตเสริมเข้ากับพื้นที่ห้องปฏิบัติการด้วย Bolt โดยมีคานเหล็กรัดหัวท้ายเพื่อไม่ให้ฐานคอนกรีตเสริมเหล็กเคลื่อนตัวทั้งแนวราบและแนวตั้งดังแสดงในภาพที่ 3.14

3.5.5 ยึดฐานไฮดรอลิกส์แจ็ก (Hydraulic jack) บนโครงเหล็กทดสอบ (Load Frame) ในแนวราบ ระดับเดียวกันกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบ ผ่าน โหลดเซลล์

(Load Cell) เพื่อเป็นแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Lateral Loading) และยึด โหลดเซลล์ (Load Cell) ดังกล่าวเข้ากับตัวผนังอิฐก่อทดสอบด้วยเหล็กแผ่นประกบเข้ากับคานคอนกรีต เสริมเหล็ก โดยมี Bolt ที่ฝังไว้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นตัวถ่ายแรง ดังแสดงในภาพที่ 3.14

3.5.6 ติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ (FRP) ชนิดเส้นใยแก้ว Glass Fiber (GFRP) แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) บนผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ตามขั้นตอนดังนี้

1. ขัดพื้นผิวผนังอิฐก่อโบราณตำแหน่งที่จะติดตั้ง GFRP ให้เรียบ เช็ดทำความสะอาดพื้นผิวด้วยผ้าแห้ง

2. ผสมน้ำยา Resin Part A และ Part B ทาด้วยลูกกลิ้งบนพื้นผิวตามข้อ 1. ที่จัดเตรียมไว้ ทิ้งไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 สัปดาห์ (รอบที่ 1)

3. ผสมน้ำยา Resin Part A และ Part B ทาด้วยลูกกลิ้งบนพื้นผิว (รอบที่ 2) ปล่อยให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วติดตั้งแผ่น GFRP ดำเนินการผสมน้ำยา Resin Part A และ Part B ทาด้วยลูกกลิ้งบนพื้นผิว (รอบที่ 3) ทิ้งไว้ให้แห้ง อย่างน้อย 1 สัปดาห์ จึงจะทำการทดสอบผนังนั้นๆ ต่อไป

3.5.7 ติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ GFRP บนผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW01_GFRP.A ขนาด ความกว้าง 0.20 เมตร ยาว 1.50 เมตร บนผิวผนังตลอดแนวรอยร้าว ทั้ง 2 ด้านของผนัง ดังแสดงในภาพที่ 3.9

3.5.8 ติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ GFRP บนผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW03_GFRP.C ขนาด ความกว้าง 0.11 เมตร รูปกากบาท บนผิวผนัง ทั้ง 2 ด้านของผนัง คิดเป็นร้อยละ 20 ของพื้นที่ผนังแต่ละด้าน ดังแสดงในภาพที่ 3.10

3.5.9 ติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ GFRP บนผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW04_GFRP.D ขนาด ความกว้าง 0.22 เมตร รูปกากบาท บนผิวผนัง หนึ่งด้านของผนัง คิดเป็นร้อยละ 40 ของพื้นที่ผนังแต่ละด้าน ดังแสดงในภาพที่ 3.11

3.5.9 ติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ GFRP บนผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW05_GFRP.E ขนาด ความกว้าง 0.16 เมตร แถบแนวตั้ง 2 แถบ แนวนอน 2 แถบ หนึ่งด้านของผนัง คิดเป็นร้อยละ 40 ของพื้นที่ผนังแต่ละด้าน ดังแสดงในภาพที่ 3.12

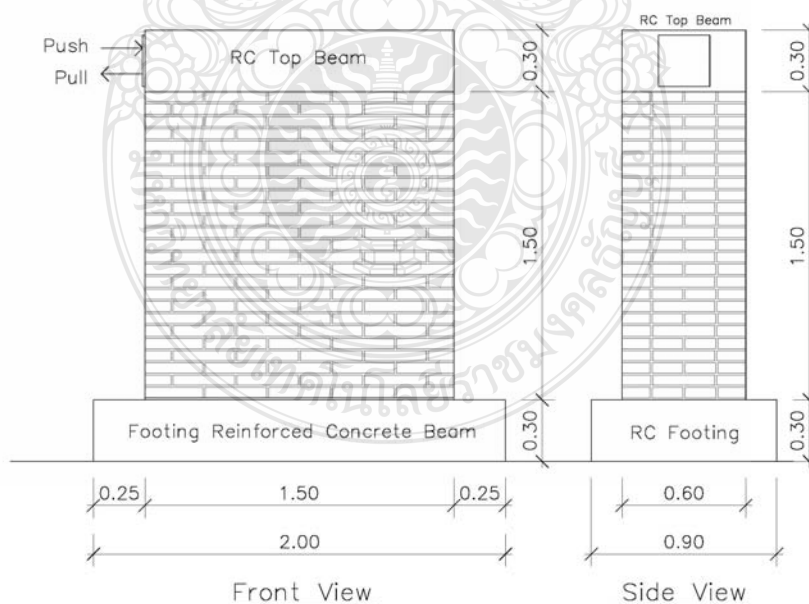
3.5.7 ติดตั้ง LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) เพื่อสังเกต และควบคุม ระยะเวลาเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ก (Hydraulic Jack) และจุดอื่นๆ จำนวน 10 จุด ดังแสดงในภาพที่ 3.14

3.4.8 ติดตั้ง Electric Strain Gages บนผนังอิฐก่อทดสอบเพื่อวัดค่าความเครียด (Strain) ของผนังอิฐก่อทดสอบ ในแนวทแยงมุม 45 องศา จำนวน 4 จุด ดังแสดงในภาพที่ 3.14

ตารางที่ 3.1 สรุปลักษณะของผนังที่ใช้ทดสอบ

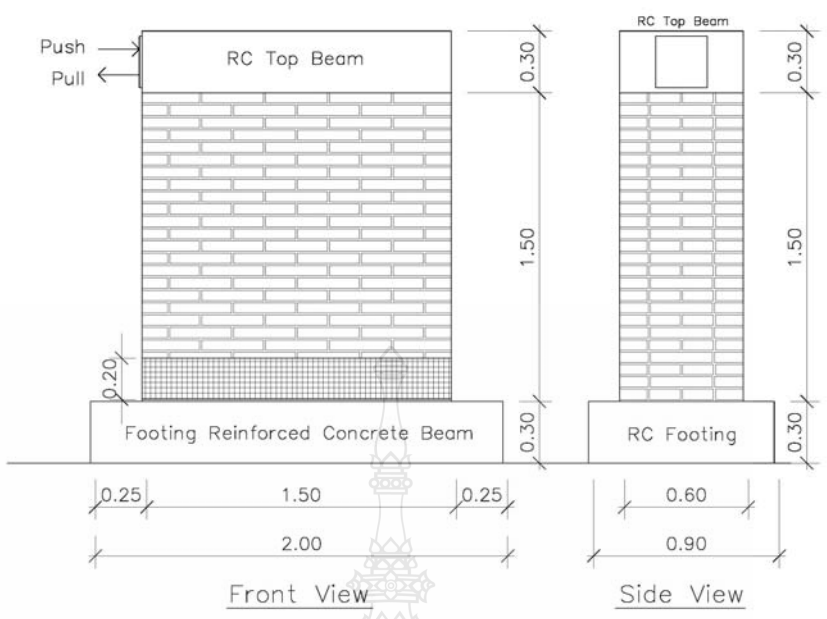
ทดสอบที่ Test No.	ผนังที่ Wall No.	รหัสผนังตัวอย่าง Wall Specimens Code	รูปแบบของการเสริม FRP. Type of Retrofit FRP.	จำนวนด้าน ที่เสริม
1	Sample.1	AMW01	ไม่ได้เสริมวัสดุ FRP	-
2	Sample.1	AMW01_GFRP.A	เสริม FRP ตามรอยแตกกร้าว	สองด้าน
3	Sample.3	AMW03_GFRP.C	เสริม FRP 20% ของพื้นที่ผนัง รูปกากบาท กว้าง 0.11 ม.	สองด้าน
4	Sample.4	AMW04_GFRP.D	เสริม FRP 40% ของพื้นที่ผนัง รูปกากบาท กว้าง 0.22 ม.	หนึ่งด้าน
5	Sample.5	AMW05_GFRP.E	เสริม FRP 40% ของพื้นที่ผนัง แบบแถบตาราง แนวตั้ง 2 แถบ แนวนอน 2 แถบ กว้างแถบละ 0.16 ม	หนึ่งด้าน

หมายเหตุ ผนังอิฐโบราณตัวอย่าง AMW02_FRP.B เกิดความเสียหายขณะเตรียมการทดลอง



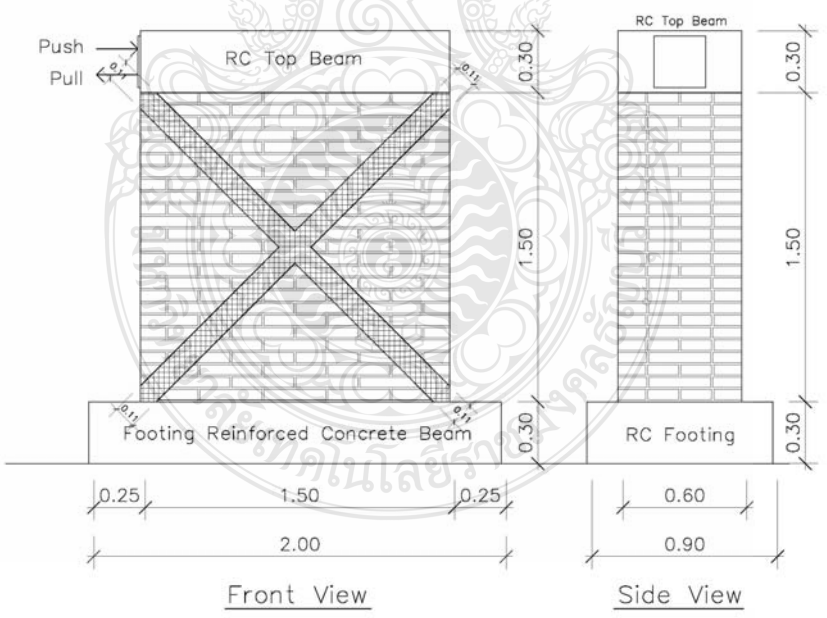
Test No.1 AMW01

ภาพที่ 3.8 ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW01



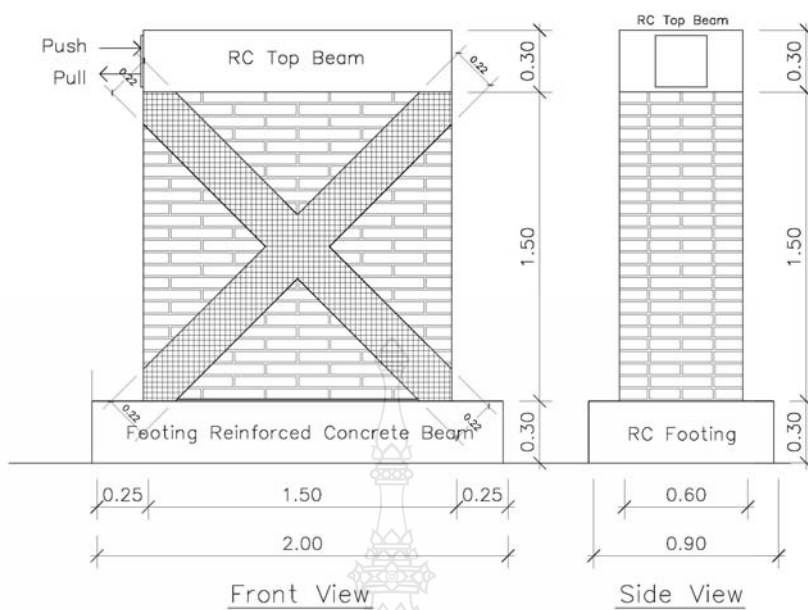
Test No.2 AMW01_GFRP.A

ภาพที่ 3.9 ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW01_GFRP.A

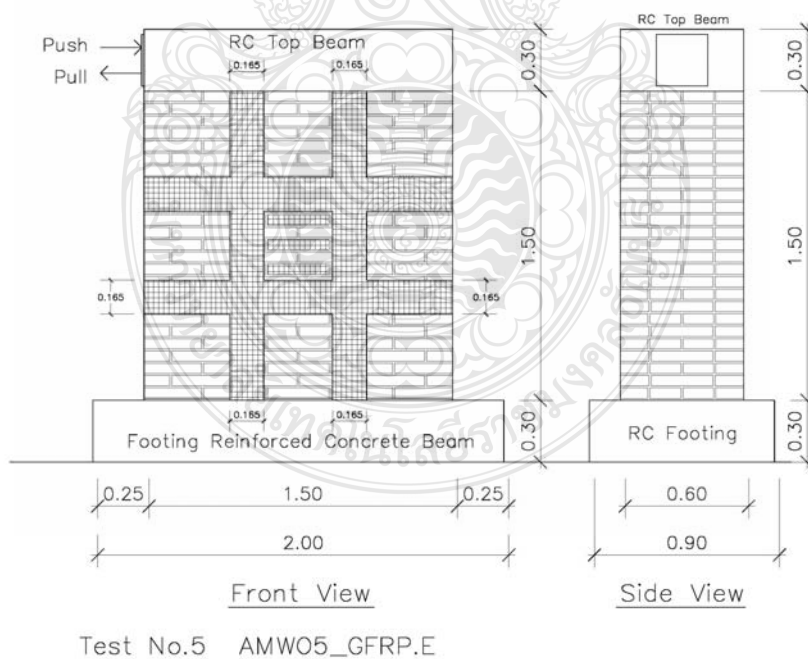


Test No.3 AMW03_GFRP.C

ภาพที่ 3.10 ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW03_GFRP.C



ภาพที่ 3.11 ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW04_GFRP.D



ภาพที่ 3.12 ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW05_GFRP.E



ภาพที่ 3.13 ผนังตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

3.6 การทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ

ขอบเขตของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือน (Shear Strength) และการกระจายพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal Load กับ Horizontal Displacement ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างแบบ Full Scale จำนวนทั้ง 4 ตัวอย่าง การทดสอบโดยมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

3.6.1 การทดสอบทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง

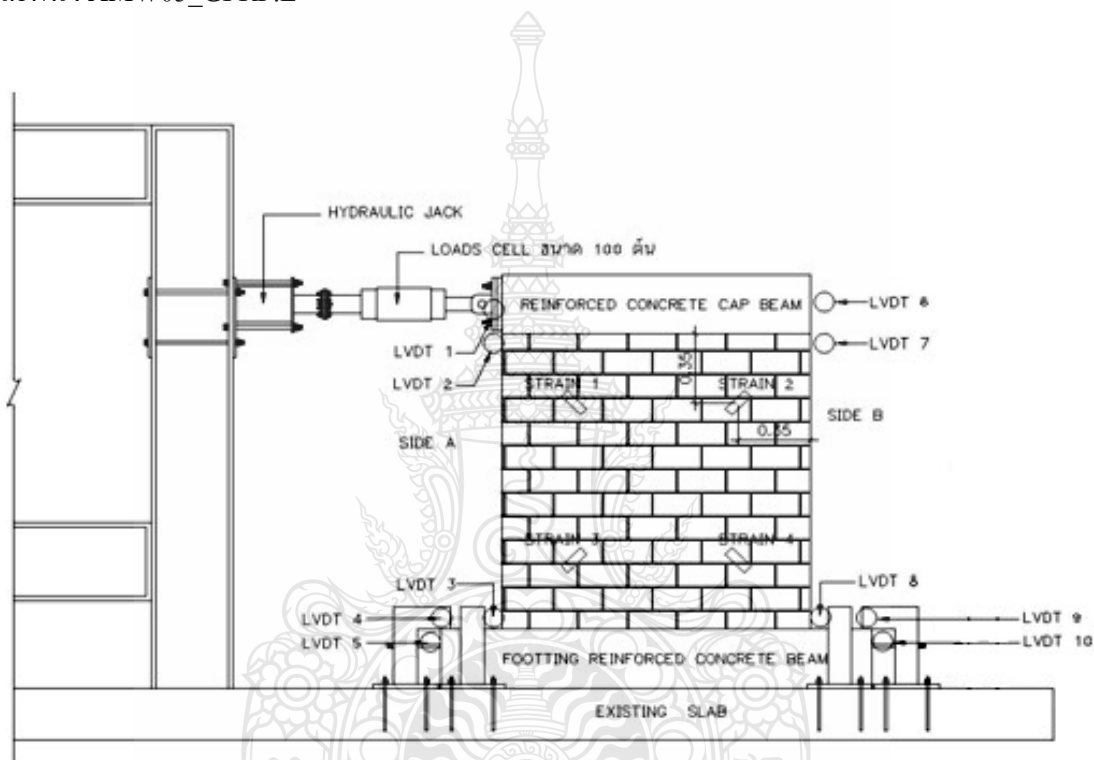
ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง โดยมีแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Lateral Loading) ดำเนินการทดสอบผนังตัวอย่างจำนวน 1 ตัวอย่าง ได้แก่ผนัง AMW01

3.6.2 การทดสอบการซ่อมแซมผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างหลังเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading)

ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ในข้อ 3.6.1 (AMW01) โดยทำการซ่อมแซมรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนผิวผนังด้วยเส้นใยไฟเบอร์ ชนิดเส้นใยแก้ว Glass Fiber (GFRP) แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) และมีแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Lateral Loading) ดำเนินการทดสอบผนังตัวอย่างจำนวน 1 ตัวอย่าง ได้แก่ผนัง AMW01_GFRP.A

3.6.3 การทดสอบการเสริมกำลังของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง

ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง เสริมด้วยเส้นใยไฟเบอร์ ชนิดเส้นใยแก้ว Glass Fiber (GFRP) แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) ที่ผิวพื้นผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างโดยมีรูปแบบการเสริม GFRP 3 รูปแบบ และมีแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Lateral Loading) ดำเนินการทดสอบผนังตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ผนัง AMW03_GFRP.C, ผนัง AMW04_GFRP.D และผนัง AMW05_GFRP.E



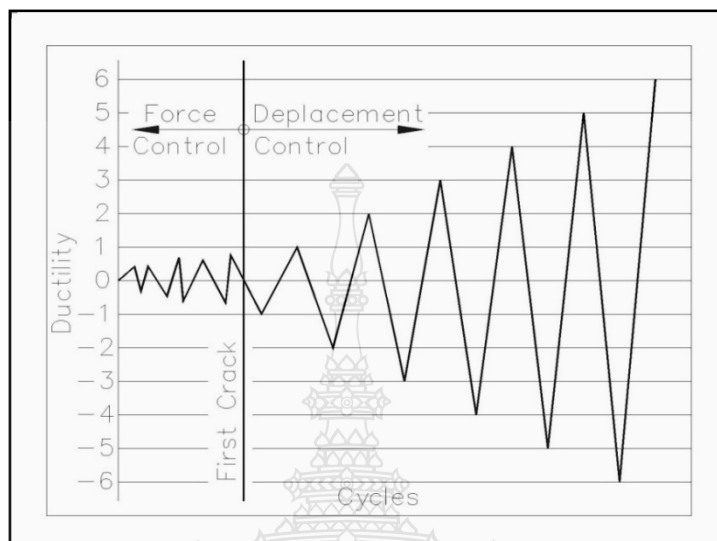
ภาพที่ 3.14 การติดตั้งผนังอิฐก่อโบราณสำหรับการทดสอบ Test Setup

3.7 การดำเนินการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ [13] [14] [15] [16]

การดำเนินการทดสอบ ให้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading) กับผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง มีรายละเอียดดังนี้

3.7.1 การให้แรงกระทำ ในช่วงเริ่มต้นจะใช้วิธีการควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) ผ่านโหลดเซลล์ (Load Cell) โดยการให้แรงกระทำในรอบการทดสอบที่ 1 ให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นทีละ 2 kN ต่อครั้งๆ ละครึ่งรอบจนครบ 1 รอบ (ดัน-ดึง) ของรอบการทดสอบที่ 1 และในรอบการทดสอบที่ 2 ให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นเป็น 4 kN ต่อครั้งๆ ละครึ่งรอบจนครบ 1 รอบ (ดัน-ดึง) ของรอบการทดสอบที่ 2

ทำเช่นเดียวกันนี้ในการทดสอบแต่ละรอบ (ดัน-ดึง) โดย เพิ่มแรงกระทำ รอบการทดสอบละ 2 kN จนผนังอิฐก่อทดสอบจะเกิดรอยแตกร้าว (First Cracking) ดังแสดงในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 Loading Sequence for Static Cyclic Loading Displacement Cycles

3.7.2 หลังจากผนังอิฐก่อตัวอย่างเกิดรอยแตกร้าวแรก (First Cracking) ให้เปลี่ยนวิธีการให้แรงกระทำ (load) จากการควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) มาเป็นการควบคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ก (Hydraulic Jack) โดยควบคุมระยะการเคลื่อนที่ในการทดสอบครั้งละจำนวน 3 รอบ (Cycles) ดังแสดงในภาพที่ 3.15 โดยทุกๆ ครั้งรอบ (ดันหรือดึง) ให้หยุด เพื่อทำการตรวจความเสียหายของผนังอิฐก่อทดสอบ และในกรณีของการเสริมเส้นใยไฟเบอร์ (FRP) ก็ให้ตรวจความเสียหาย (Debonding) ของแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) ด้วย กระทำเช่นเดียวกันนี้ทุกๆ ระยะการเคลื่อนที่ โดยค่อยๆ เพิ่มระยะการเคลื่อนที่ของไฮดรอลิกส์แจ็ก (Hydraulic jack) ไปเรื่อยๆ จนกว่าผนังจะเกิดการวิบัติ

3.7.3 สำหรับการวัดระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ก (Hydraulic Jack) จะดำเนินการควบคุมผ่าน LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) ที่ตำแหน่งคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบ และจะดำเนินการเช่นเดียวกันกับการเคลื่อนที่ระหว่างด้านบนและด้านล่างของผนังอิฐก่อทดสอบ ด้านฝั่งตรงข้ามกับไฮดรอลิกส์แจ็ก (Hydraulic Jack)

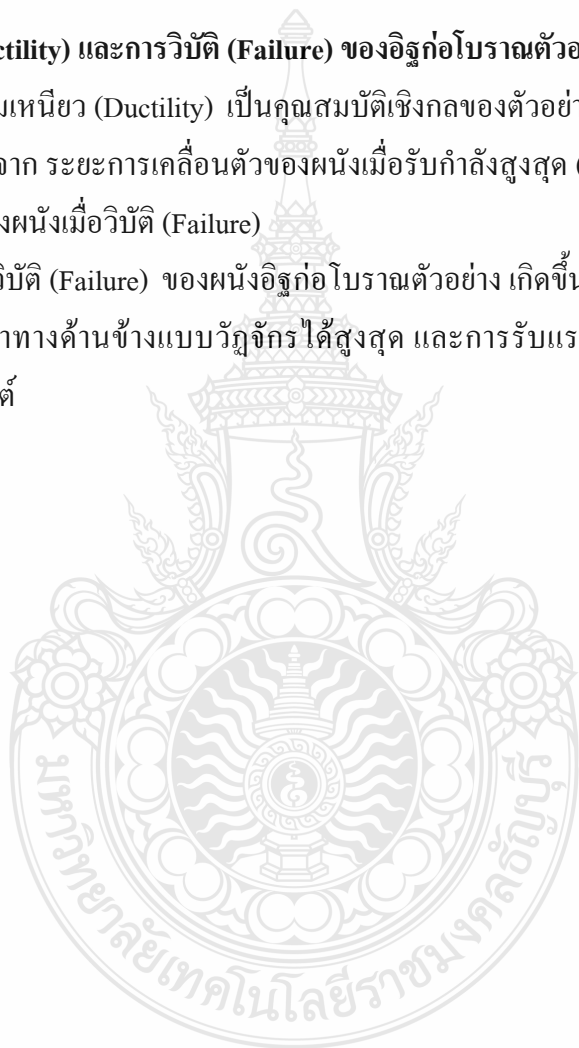
3.7.4 หลังจากผนังอิฐก่อตัวอย่างเกิดรอยแตกร้าว (First Cracking) ด้วยวิธีการควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) ทำการวัดค่าระยะการเคลื่อนที่ไว้ด้วย ซึ่งจะเป็นระยะการเคลื่อนที่เริ่มต้นหลังจากผนังอิฐก่อตัวอย่างเริ่มแตกร้าว (First Cracking Displacement)

3.7.5 การวัดการยืดหดตัวของผนังอิฐก่อทดสอบ และ GFRP สามารถอ่านค่าที่บันทึกได้ในเครื่องแปลงข้อมูล (Data Logger) ผ่าน Electric Strain Gages บนผนังอิฐก่อทดสอบ

3.8 ความเหนียว (Ductility) และการวิบัติ (Failure) ของอิฐก่อโบราณตัวอย่างขณะทดลอง

3.8.1 ความเหนียว (Ductility) เป็นคุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่างทดลอง ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ หาได้จาก ระยะการเคลื่อนตัวของผนังเมื่อรับกำลังสูงสุด (Ultimate Load)หารด้วย ระยะการเคลื่อนตัวของผนังเมื่อวิบัติ (Failure)

3.8.2 การวิบัติ (Failure) ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง เกิดขึ้นหลังจากผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรได้สูงสุด และการรับแรงกระทำดังกล่าวเริ่มลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

การศึกษานี้จะดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลของอิฐโบราณ ตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Materials) : ASTM C67 ได้แก่ การวัดขนาด, การหาน้ำหนัก, การดูดซึมน้ำ และการรับกำลังอัดของอิฐ ซึ่งอิฐโบราณที่นำมาทดสอบหาคุณสมบัติในครั้งนี้ เป็นอิฐใหม่มีอายุประมาณ 1 ปี สำหรับการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน ที่มีการผลิตในปัจจุบันที่ ตำบลลุมพิตี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และนำมาถือเป็นผนังตัวอย่างโดยมีอายุผนังก่อตัวอย่าง 3 ปี และทำการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างดังต่อไปนี้

1. ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading) จำนวน 1 ตัวอย่าง ได้แก่ ผนัง AMW01

2. ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ (AMW01) เมื่อเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร และซ่อมแซมรอยแตกร้าวบนผิวพื้นผนังด้วย Fiber-Reinforced Polymer (FRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร จำนวน 1 ตัวอย่าง ได้แก่ ผนัง AMW01_GFRP.A

3. ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ เสริมด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) ที่ผิวพื้นผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างโดยมีรูปแบบการเสริม GFRP 3 รูปแบบ ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ผนังตัวอย่าง AMW03_GFRP.C, ผนังตัวอย่าง AMW04_GFRP.D และผนังตัวอย่าง AMW05_GFRP.E

ซึ่งมีผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองกายภาพของอิฐ

4.1.1 การวัดขนาด และ น้ำหนัก ที่ได้จากการชั่งตัวอย่างของอิฐ ดังตารางที่ 4.1

พบว่าขนาดของการวัดขนาดมีค่าความคลาดเคลื่อน ความยาว ± 5 mm, ความกว้าง ± 3 mm, และความหนา ± 2 mm. ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 77-2545 อิฐก่อสร้างสามัญ (Building Bricks)

ตารางที่ 4.1 การวัดขนาดและน้ำหนักอิฐจากการสุ่มตัวอย่างจากแหล่งบ้านลุมพลี จำนวน 10 ตัวอย่าง

ด้าน	กว้าง			ยาว (ซม.)			หนา (ซม.)			น้ำหนักอิฐ (กรัม)
	ครั้งที่	1	2	3	1	2	3	1	2	
ตัวอย่างที่	(ซม.)	(ซม.)	(ซม.)	(ซม.)	(ซม.)	(ซม.)	(ซม.)	(ซม.)	(ซม.)	(ซม.)
1	14.90	14.80	14.90	29.90	29.90	29.60	4.70	5.00	4.90	3,129.40
2	14.20	14.90	14.70	29.70	29.50	29.30	4.90	5.00	4.50	3,150.80
3	14.50	14.50	14.50	29.50	29.60	29.40	4.90	5.10	4.40	2,980.50
4	14.40	14.60	14.40	29.20	29.00	29.20	4.90	4.90	4.90	3,122.30
5	14.50	14.70	14.60	29.00	29.00	29.00	4.50	5.00	5.00	2,991.70
6	14.60	14.70	14.70	29.30	29.30	29.30	5.00	4.70	4.90	3,119.80
7	14.70	14.80	14.70	29.40	29.20	29.40	4.60	4.70	4.80	2,899.70
8	14.50	14.90	14.60	29.00	29.90	29.20	5.00	5.10	4.70	3,038.10
9	15.00	14.70	15.00	29.20	29.40	29.00	4.30	4.70	4.60	2,909.40
10	14.60	14.60	14.40	29.00	29.00	29.00	4.90	4.60	4.40	2,871.80
เฉลี่ย	14.60	14.70	14.70	29.30	29.40	29.20	4.80	4.90	4.70	3,021.40

4.2 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของอิฐ

ส่วนเปอร์เซ็นต์การดูดซึมของน้ำที่ได้จากการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักของอิฐจากการสุ่มตัวอย่างทั้ง 10 ก้อน พบว่าอยู่ที่ประมาณ 0.465 % ดังแสดงผลดังตารางที่ 4.2 และเปอร์เซ็นต์การต้มเดือดอยู่ที่ประมาณ 2 % ดังแสดงผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption Test)

ลำดับ	น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (กรัม)	น้ำหนักหลังแช่น้ำแล้ว 24 ชั่วโมง (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึม (เปอร์เซ็นต์)
1	3,129.4	3,125.3	0.13
2	3,150.8	3,143.6	0.22
3	2,980.5	2,967.7	0.42

ตารางที่ 4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption Test) (ต่อ)

ลำดับ	น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (กรัม)	น้ำหนักหลังแช่น้ำแล้ว 24 ชั่วโมง (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์)
4	3,122.3	3,095.4	0.86
5	2,991.7	2,957.7	1.13
6	3,119.8	3,107.8	0.38
7	2,899.7	2,886.1	0.46
8	3,038.1	3,018.3	0.65
9	2,909.4	2,902.9	0.22
10	2,871.8	2,867.9	0.13
เฉลี่ย	3,021.4	3,007.3	0.43

ตารางที่ 4.3 การทดสอบการต้มเดือด (Boiling Test)

ลำดับ	น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (กรัม)	น้ำหนักหลังต้มเดือด (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การต้มเดือด (เปอร์เซ็นต์)
1	3,451.4	3,520.4	1.999
2	3,525.6	3,596.1	2.000
3	3,596.7	3,668.6	1.999
4	3,377.1	3,444.6	1.999
5	3,565.8	3,637.1	2.000
6	3,364.0	3,431.3	2.001
7	3,611.3	3,683.5	1.999
8	3,745.9	3,820.8	2.000
9	3,289.1	3,354.9	2.001
10	3,487.5	3,557.3	2.001
เฉลี่ย	3,501.4	3,571.4	2.000

4.3 ผลการทดสอบทางกลของอิฐ และมอร์ตาร์

ก่อนที่จะทำการทดสอบแบบ Full-Scale-Test ได้นำอิฐที่สุ่มตัวอย่างจากแหล่งผลิตไปทดสอบค่ากำลังอัดประลัย และค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่นก่อนที่จะนำไปใช้งานเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลอิฐโบราณ พบว่าค่ากำลังอัดประลัยที่จากการทดสอบคือ 52.72 กก./ซม² และค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ 30,190 กก./ซม² และมอร์ตาร์แบบโบราณที่อายุ 60 วัน แล้วทดสอบค่ากำลังอัดประลัยที่ 64.80 กก./ซม² และค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ 14,530 กก./ซม² แสดงตารางที่ 4.4 พบว่าผลที่ทำการทดสอบมีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกันกับงานวิจัยของสุคชาย (2543)

ตารางที่ 4.4 การทดสอบการรับกำลังอัดของอิฐทดแทน

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

4.4 วัสดุเส้นใย (Fiber Reinforcement)

วัสดุเส้นใย ใช้เส้นใยไฟเบอร์ ชนิดเส้นใยแก้ว Glass Fiber (GFRP) แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) เนื่องจากลักษณะเส้นใยมีสีขาวใส การรบกวนทัศนียภาพของผนังอิฐก่อโบราณไม่มากนัก เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับผนังอิฐก่อโบราณ ซึ่งได้แสดงคุณสมบัติของวัสดุ และข้อมูลทางด้านเทคนิค ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลทางด้านเทคนิคของ GFRP

Property	Typical Test Value
Width (mm)	1,000
Thickness (mm)	0.5
Warp x Weft (each/inch)	6 x 6
Weight (g/sq.m)	150

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลทางด้านเทคนิคของ GFRP (ต่อ)

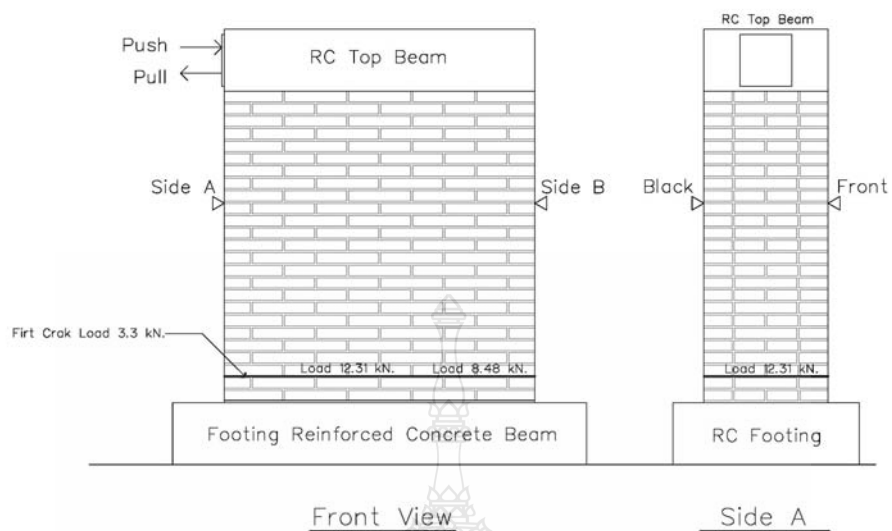
Filament Diameter (μm)	14
Nominal Row Length (m)	50(+0.50-0)
Nominal Row Width (m)	1(+0.50-0)
Moisture Content (%)	<0.3
Loss on Lognition (L.O.I.)	15
Mesh Density (%)	10x10 Strands (Warp & Weft)
Nominal strand tensile Per 10 cm Strength	1,700 Mpa
Property	Typical Test Value
Elastic Modulus	72 Gpa

4.5 ผลการทดลองผนังก่ออิฐแบบโบราณ

การทดลองผนังอิฐก่อโบราณซึ่งเสริมด้วย GFRP ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรนั้น จะช่วยให้ผนังตัวอย่างรับแรงได้ดีกว่าผนังที่ไม่ได้เสริม GFRP และจากผลการทดสอบยังพบว่าระหว่างด้านของผนังตัวอย่างที่เสริม GFRP กับด้านของผนังตัวอย่างที่ไม่ได้เสริม GFRP นั้น ปรากฏว่าด้านที่ไม่ได้เสริม GFRP จะเกิดรอยแตกร้าวก่อนด้านที่เสริม GFRP แสดงว่าวัสดุเส้นใยเสริมแรง FRP ชนิดเส้นใยแก้ว Glass Fiber เป็นตัวช่วยยึดประสานระหว่างวัสดุที่มากกว่า 2 ชนิด ให้เป็นเนื้อเดียวกันได้โดยไม่แยกออกจากกัน ซึ่งผลการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างทั้ง 5 การทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

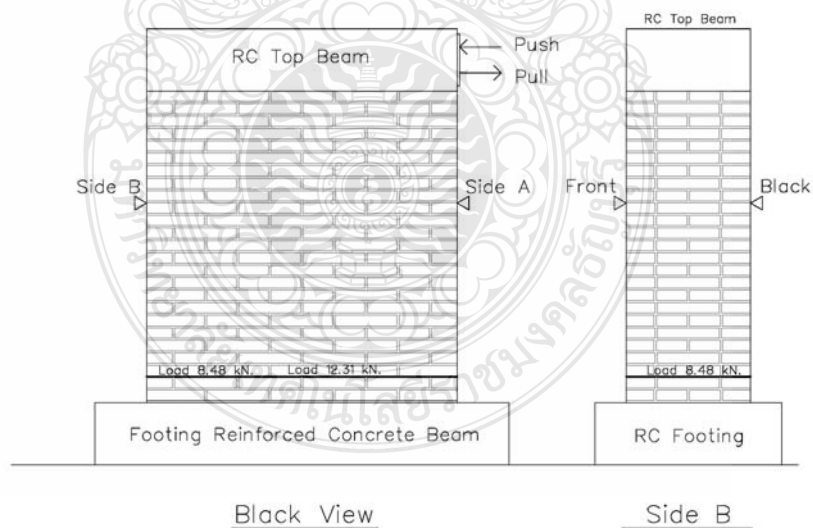
ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง

Test No.	Wall Specimens Code	Load (kN.)			Displacement (mm.)			Ductility
		Cracking	Max	Failure	Cracking	Max	Failure	
1	AMW01	3.30	16.00	13.66	0.09	2.05	3.05	33.88
2	AMW01_GFRP.A	16.00	25.00	18.84	0.65	4.00	7.00	10.77
3	AMW03_GFRP.C	26.00	29.00	23.08	1.98	2.79	5.30	2.68
4	AMW04_GFRP.D	26.00	50.87	28.26	1.09	2.96	3.97	3.64
5	AMW05_GFRP.E	18.00	22.61	19.31	0.83	1.09	3.14	3.78



Test No.1 AMW01

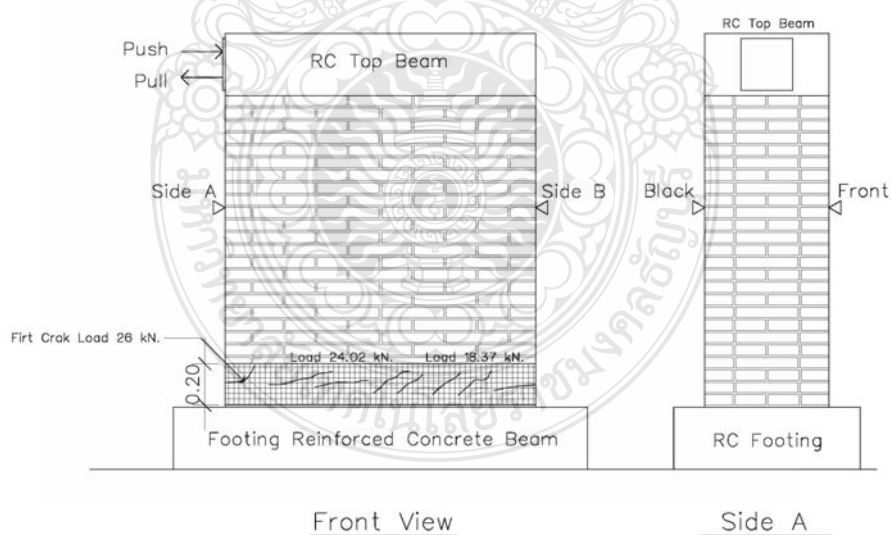
ภาพที่ 4.1 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW 01 (ด้านหน้า)



Test No.1 AMW01

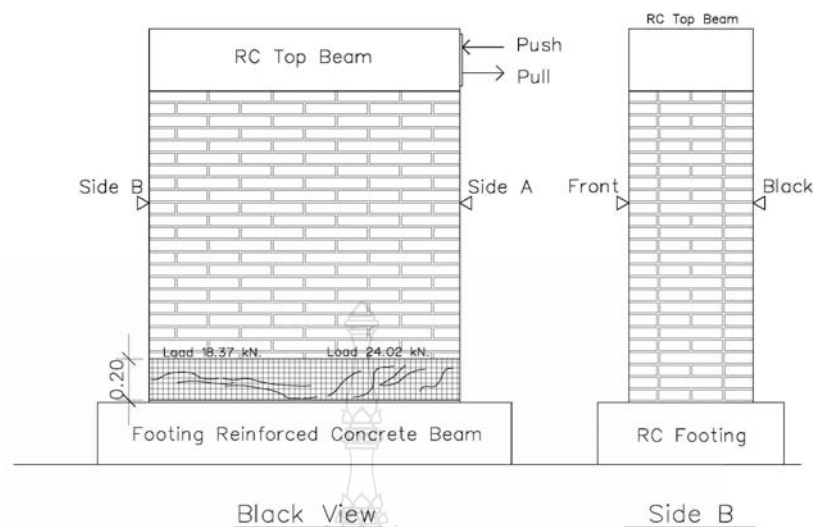
ภาพที่ 4.2 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW 01 (ด้านหลัง)

จากการทดสอบผนังตัวอย่าง AMW 01 พบว่า เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างแบบแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading) ในแนวราบ ให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นทีละ 2 กิโลนิวตัน ต่อครั้งๆ ละครั้งรอบจนครบ 1 รอบ (ดัน-ดึง) ไปจนกว่าผนังไม่สามารถรับแรงที่เพิ่มขึ้นได้อีก ผนังมีรอยแตกริ้วแรก (First Cracking) ที่แรงกระทำ 3.30 กิโลนิวตัน ระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 0.09 มิลลิเมตร ความกว้างของรอยร้าว 0.05 มิลลิเมตร สูงจากฐานคอนกรีตเสริมเหล็ก 13 เซนติเมตร มีความยาวของรอยร้าว 15 เซนติเมตร ตามแนวราบจากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง จากนั้นเปลี่ยนการให้แรงกระทำ (Load) จากการควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) มาเป็นการควบคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ค (Hydraulic jack) เมื่อระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 2.05 มิลลิเมตร ได้แรงกระทำสูงสุด (Load Max) 16.00 กิโลนิวตัน ความกว้างของรอยร้าว 1.6 มิลลิเมตร มีความยาวของรอยร้าว 130 เซนติเมตร ตามแนวราบ หลังจากนั้นเมื่อระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 3.05 มิลลิเมตร ได้แรงกระทำ (Load) 13.66 กิโลนิวตัน ความกว้างของรอยร้าว 3 มิลลิเมตร ผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้ เกิดการวิบัติของผนัง (Failure) โดยผนังนี้จะเกิดการแตกริ้วจากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง บริเวณด้านล่างทั้งสองฝั่งของผนังตามทิศทางของแรงที่กระทำ ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.2



Test No.2 AMW01_GFRP.A

ภาพที่ 4.3 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW01_GFRP.A (ด้านหน้า)

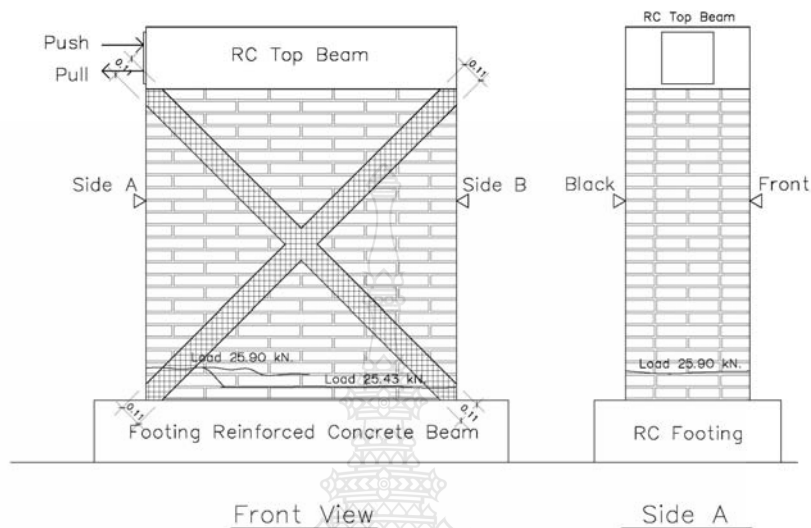


Test No.2 AMW01_GFRP.A

ภาพที่ 4.4 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW01_GFRP.A (ด้านหลัง)

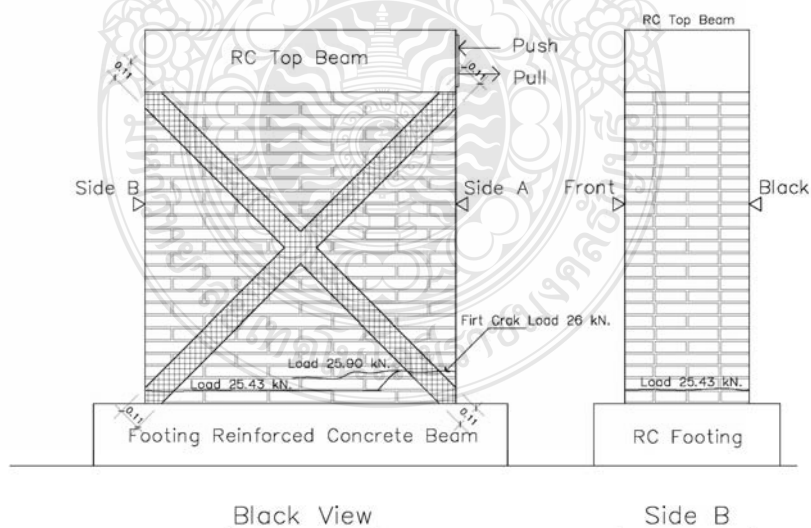
ผนัง AMW01_GFRP.A เป็นผนังที่ได้ทำการซ่อมแซมผนัง AMW01 หลังจากที่ผนังได้รับแรงกระทำจนเกิดรอยร้าวมากกว่า 2 มิลลิเมตร และไม่สามารถรับแรงกระทำได้อีก ด้วยการซ่อมผนังด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) กว้าง 20 เซนติเมตร ปิดทับบริเวณตามรอยแตกร้าวตลอดแนวทั้ง 2 ด้าน และให้แรงกระทำในแบบเดียวกันกับผนัง AMW 01 เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างแบบแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading) ในแนวราบให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นทีละ 2 กิโลนิวตันต่อครั้งๆ ละครั้งรอบจนครบ 1 รอบ (ดัน-ดึง) ไปจนกว่าผนังไม่สามารถรับแรงที่เพิ่มขึ้นได้อีก ผนังมีรอยแตกร้าวแรก (First Cracking) ที่แรงกระทำ 16.00 กิโลนิวตัน ระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 0.65 มิลลิเมตร สูงจากฐานคอนกรีตเสริมเหล็ก 13 เซนติเมตร มีความยาวของรอยร้าว 13 เซนติเมตร ตามแนวราบจากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนังจากนั้นเปลี่ยนการให้แรงกระทำ (Load) จากการควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) มาเป็นการควบคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ก (Hydraulic jack) เมื่อระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 4.0 มิลลิเมตร ได้แรงกระทำสูงสุด (Load Max) 25.0 กิโลนิวตัน ความกว้างของรอยร้าว 1.3 มิลลิเมตร มีความยาวของรอยร้าว 102 เซนติเมตร ตามแนวราบ หลังจากนั้นเมื่อระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 7.0 มิลลิเมตร ได้แรงกระทำ (Load) 18.84 กิโลนิวตัน ความกว้างของรอยร้าว 5 มิลลิเมตร ผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้ เกิดการวิบัติของผนัง (Failure) โดยผนังนี้จะ

เกิดการแตกร้าวจากกริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง บริเวณด้านล่างทั้งสองฝั่งของผนังตามทิศทางของแรงที่กระทำ ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.4



Test No.3 AMW03_GFRP.C

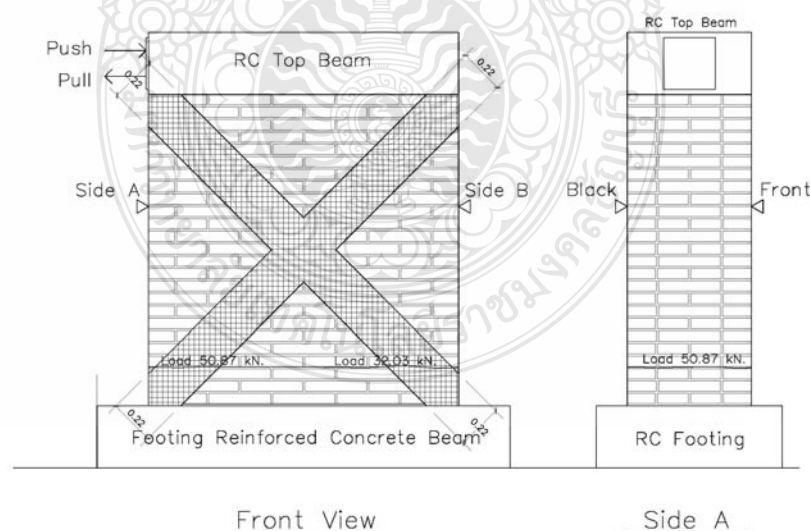
ภาพที่ 4.5 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW03_GFRP.C (ด้านหน้า)



Test No.3 AMW03_GFRP.C

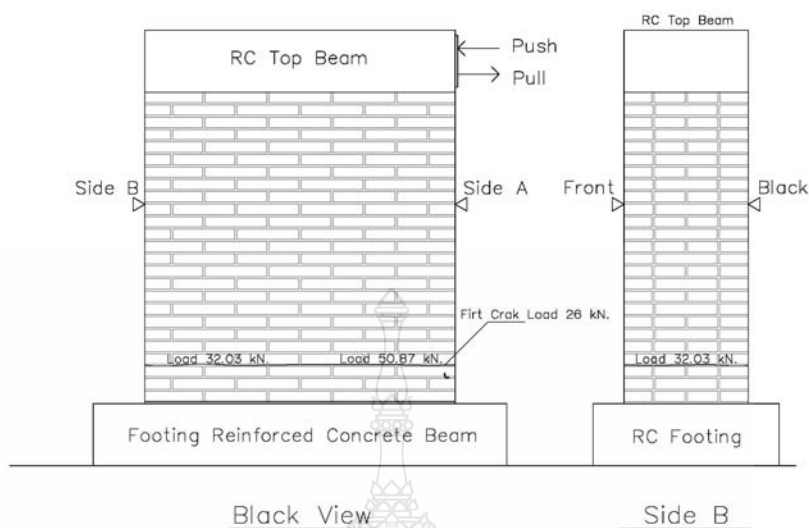
ภาพที่ 4.6 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW03_GFRP.C (ด้านหลัง)

ผนัง AMW03_GFRP.C เป็นผนังที่ได้ทำการเสริมผนังด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) 2 ด้าน ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผนัง และให้แรงกระทำในแบบเดียวกันกับผนัง AMW 01 เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างแบบแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading) ในแนวราบให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นทีละ 2 กิโลนิวตัน ต่อครั้งๆ ละครั้งรอบจนครบ 1 รอบ (ดัน-ดึง) ไปจนกว่าผนังไม่สามารถรับแรงที่เพิ่มขึ้นได้อีก ผนังมีรอยแตกริ้วแรก (First Cracking) ที่แรงกระทำ 26.0 กิโลนิวตัน ระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 1.98 มิลลิเมตร ความกว้างของรอยร้าว 0.2 มิลลิเมตร สูงจากฐานคอนกรีตเสริมเหล็ก 15 เซนติเมตร มีความยาวของรอยร้าว 15 เซนติเมตร ตามแนวราบ จากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนังของด้านที่ไม่ได้ทำการเสริมผนังด้วย Glass Fiber - Polymer (GFRP) จากนั้นเปลี่ยนการให้แรงกระทำ (Load) จากการควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) มาเป็นการควบคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ก (Hydraulic jack) เมื่อระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 2.79 มิลลิเมตร ได้แรงกระทำสูงสุด (Load Max) 29.0 กิโลนิวตัน ความกว้างของรอยร้าว 0.8 มิลลิเมตร มีความยาวของรอยร้าว 85 เซนติเมตร ตามแนวราบ หลังจากนั้นเมื่อระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 5.3 มิลลิเมตร ได้แรงกระทำ (Load) 23.08 กิโลนิวตัน ความกว้างของรอยร้าว 5 มิลลิเมตร ผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้ เกิดการวิบัติของผนัง (Failure) โดยผนังนี้จะเกิดการแตกริ้วจากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง บริเวณด้านล่างทั้งสองฝั่งของผนังตามทิศทางของแรงที่กระทำ ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และภาพที่ 4.6



Test No.4 AMW04_GFRP.D

ภาพที่ 4.7 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW04_GFRP.D (ด้านหน้า)

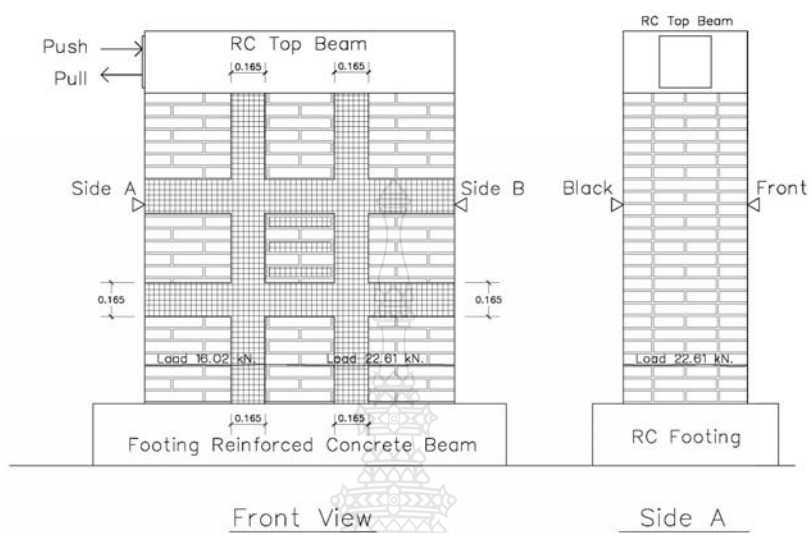


Test No.4 AMW04_GFRP.D

ภาพที่ 4.8 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW04_GFRP.D (ด้านหลัง)

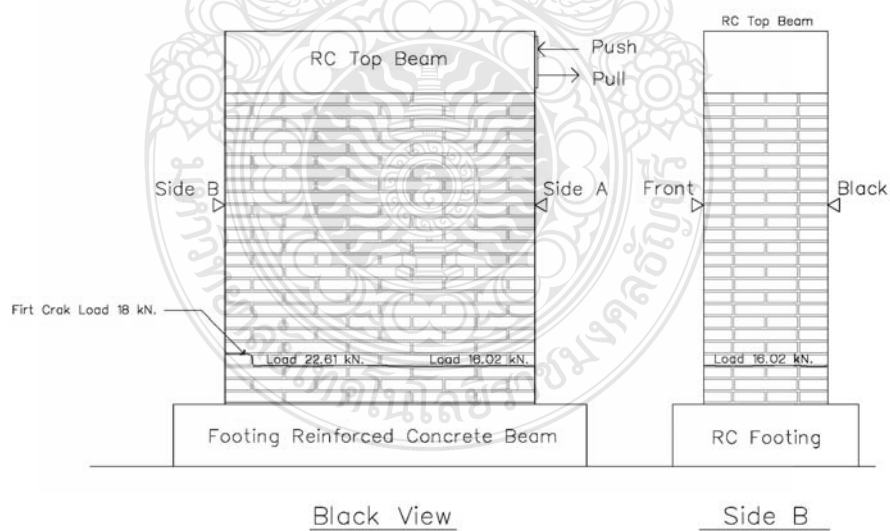
ผนัง AMW04_GFRP.D เป็นผนังที่ได้ทำการเสริมผนังด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) 1 ด้าน ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผนัง และให้แรงกระทำในแบบเดียวกันกับผนัง AMW 01 เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างแบบแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading) ในแนวราบให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นทีละ 2 กิโลนิวตัน ต่อครั้งๆ ละครั้งรอบจนครบ 1 รอบ (ดัน-ดึง) ไปจนกว่าผนังไม่สามารถรับแรงที่เพิ่มขึ้นได้อีก ผนังมีรอยแตกร้าวแรก (First Cracking) ที่แรงกระทำ 26.00 กิโลนิวตัน ระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 1.09 มิลลิเมตร ความกว้างของรอยร้าว 0.1 มิลลิเมตร สูงจากฐานคอนกรีตเสริมเหล็ก 15 เซนติเมตร มีความยาวของรอยร้าว 10 เซนติเมตร ตามแนวราบจากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง จากนั้นเปลี่ยนการให้แรงกระทำ (Load) จากการควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) มาเป็นการควบคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ก (Hydraulic jack) เมื่อระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 2.96 มิลลิเมตร ได้แรงกระทำสูงสุด (Load Max) 50.87 กิโลนิวตัน ความกว้างของรอยร้าว 1.3 มิลลิเมตร มีความยาวของรอยร้าว 102 เซนติเมตร ตามแนวราบหลังจากนั้นเมื่อระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 3.97 มิลลิเมตร ได้แรงกระทำ (Load) 28.26 กิโลนิวตัน ความกว้างของรอยร้าว 3 มิลลิเมตร ผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้ เกิดการวิบัติของผนัง (Failure) โดยผนังนี้จะเกิดการแตกร้าวจากริมผนัง

ด้านนอกเข้าสู่ภายในผนังบริเวณด้านล่างทั้งสองฝั่งของผนังตามทิศทางของแรงที่กระทำ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 และ 4.8



Test No.5 AMW05_GFRP.E

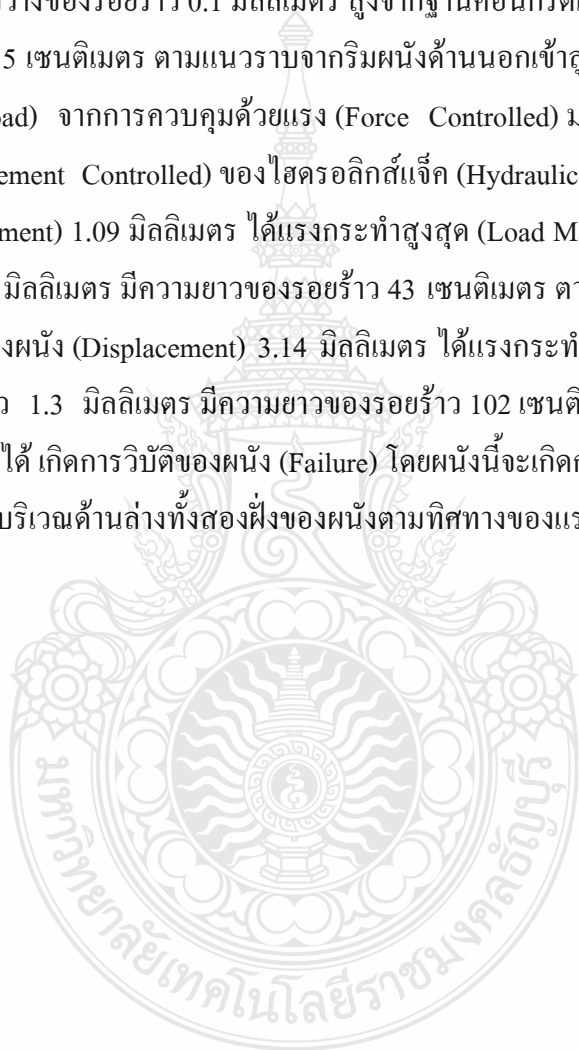
ภาพที่ 4.9 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW05_GFRP.E (ด้านหน้า)



Test No.5 AMW05_GFRP.E

ภาพที่ 4.10 รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบของผนัง AMW05_GFRP.E (ด้านหลัง)

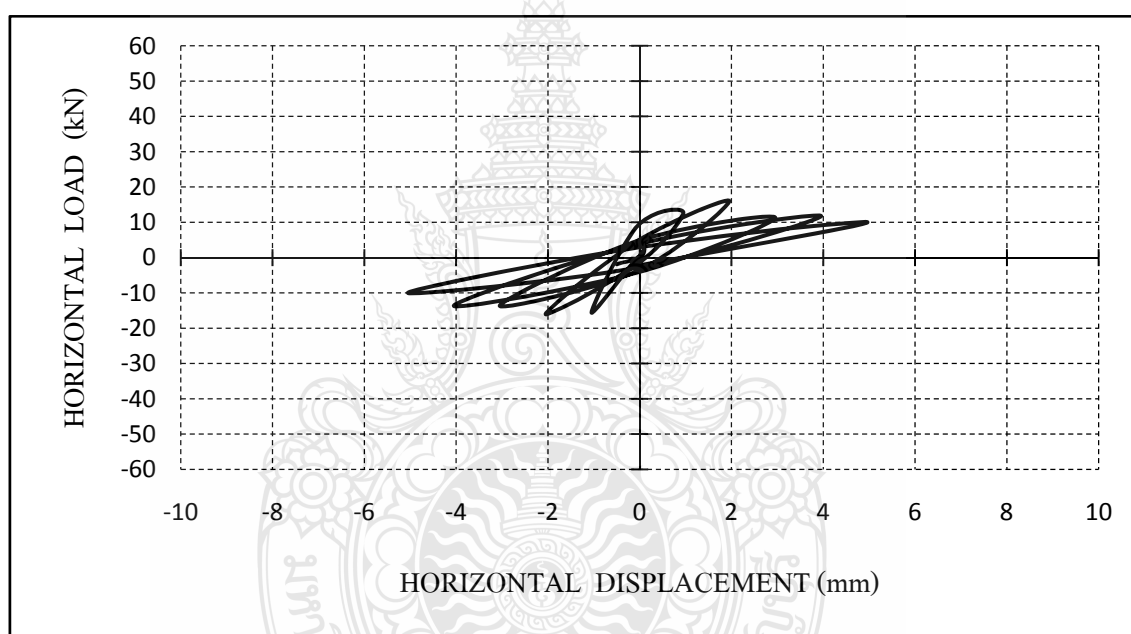
ผนัง AMW05_GFRP.E เป็นผนังที่ได้ทำการเสริมผนังด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) 1 ด้าน ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ผนัง และให้แรงกระทำในแบบเดียวกันกับผนัง AMW01 เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างแบบแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading) ในแนวราบ ครั้งละ 2 กิโลนิวตัน ไปจนกว่าผนังไม่สามารถรับแรงที่เพิ่มขึ้นได้อีก ผนังมีรอยแตกร้าวแรก (First Cracking) ที่แรงกระทำ 18.00 กิโลนิวตัน และมีระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 0.83 มิลลิเมตร ความกว้างของรอยร้าว 0.1 มิลลิเมตร สูงจากฐานคอนกรีตเสริมเหล็ก 15 เซนติเมตร มีความยาวของรอยร้าว 5 เซนติเมตร ตามแนวราบจากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง จากนั้นเปลี่ยนการให้แรงกระทำ (Load) จากการควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) มาเป็นการควบคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ค (Hydraulic jack) เมื่อระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 1.09 มิลลิเมตร ได้แรงกระทำสูงสุด (Load Max) 22.61 กิโลนิวตัน ความกว้างของรอยร้าว 0.1 มิลลิเมตร มีความยาวของรอยร้าว 43 เซนติเมตร ตามแนวราบ หลังจากนั้นเมื่อระยะการเคลื่อนตัวของผนัง (Displacement) 3.14 มิลลิเมตร ได้แรงกระทำ (Load) 19.31 กิโลนิวตัน ความกว้างของรอยร้าว 1.3 มิลลิเมตร มีความยาวของรอยร้าว 102 เซนติเมตร ตามแนวราบ ผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้ เกิดการวิบัติของผนัง (Failure) โดยผนังนี้จะเกิดการแตกร้าวจากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง บริเวณด้านล่างทั้งสองฝั่งของผนังตามทิศทางของแรงที่กระทำ ดังแสดงในภาพที่ 4.9 และ 4.10



4.6 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร

4.6.1 ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW01

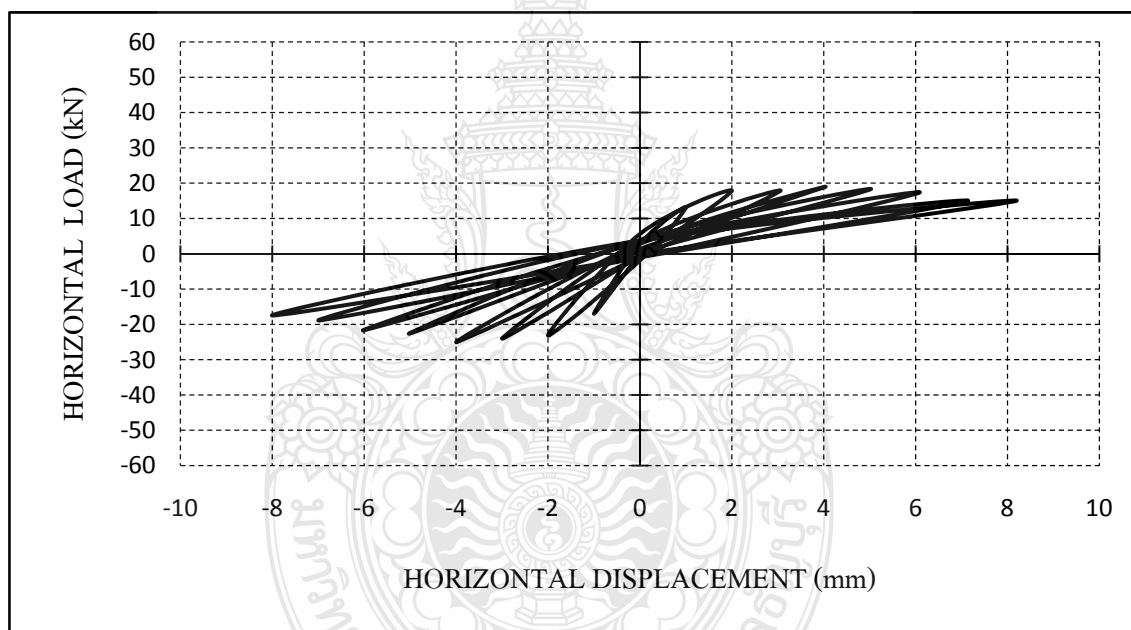
จากการทดสอบการรับกำลังทางด้านข้างของผนังก่ออิฐโบราณแบบชำไปชำมาของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW01 พบว่าสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงสุด 16 กิโลนิวตัน การเคลื่อนตัวของผนัง 3.05 มิลลิเมตร ทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะเส้นวงแคบสั้น ช่วงกราฟสั้น จำนวนเส้นวงน้อย จากลักษณะกราฟดังกล่าวผนังก่ออิฐโบราณตัวอย่างซึ่งไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP (AMW01) มีระยะการเคลื่อนตัวของผนังน้อย รับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรได้น้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW01

4.6.2 ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW01_GFRP.A

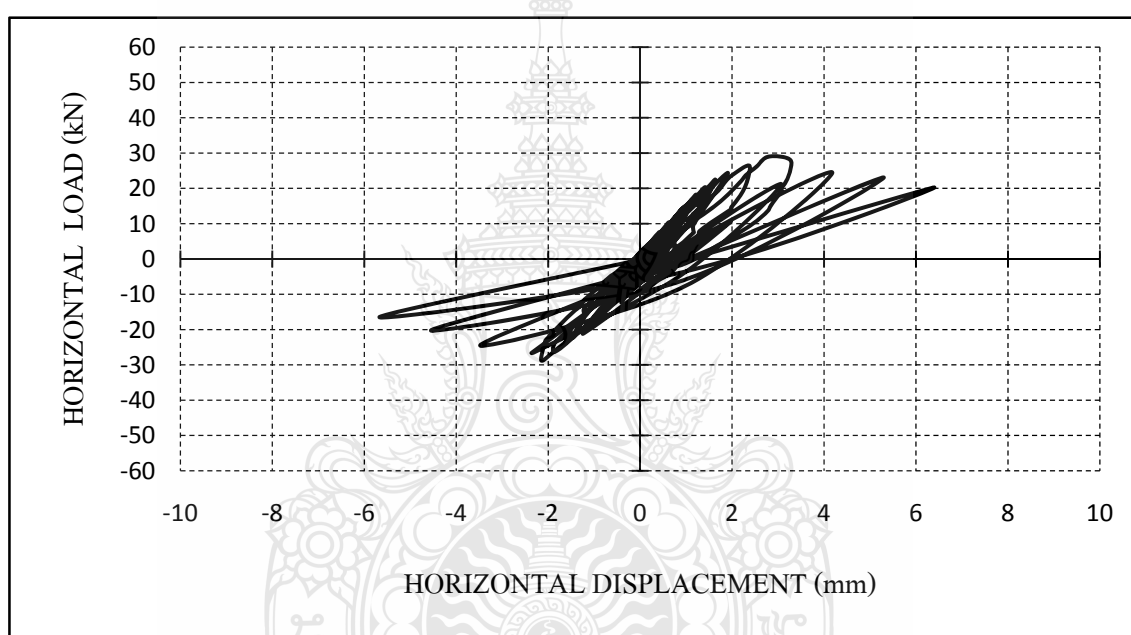
ผนังอิฐก่อโบราณ AMW01_FRP.A เป็นผนังที่ได้ทำการซ่อมแซมผนัง AMW01 หลังจากที่ได้รับแรงกระทำจนเกิดรอยร้าวมากกว่า 2 มิลลิเมตร และไม่สามารถรับแรงกระทำได้อีก และได้ทำการซ่อมแซมผิวผนังด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) กว้าง 20 ซม. ปิดทับบริเวณตามรอยแตกร้าวตลอดแนวทั้ง 2 ด้าน พบว่าสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงสุด 25.00 กิโลนิวตัน การเคลื่อนตัวของผนัง 4.00 มิลลิเมตร ทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะเส้นวงแคบยาว ช่วงกราฟกว้างจำนวนเส้นวงมากขึ้นจากผนัง AMW01 จากลักษณะกราฟดังกล่าวผนังอิฐก่อโบราณเมื่อซ่อมแซมแล้วผนังตัวอย่าง (AMW01_GFRP.A) สามารถเคลื่อนตัวของผนังเพิ่มขึ้น และรับแรงกระทำทางด้านข้างได้เพิ่มขึ้น ประมาณ 1.5 เท่า ของผนัง AMW01 ดังแสดงในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW01_GFRP.A

4.6.3 ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW03_GFRP.C

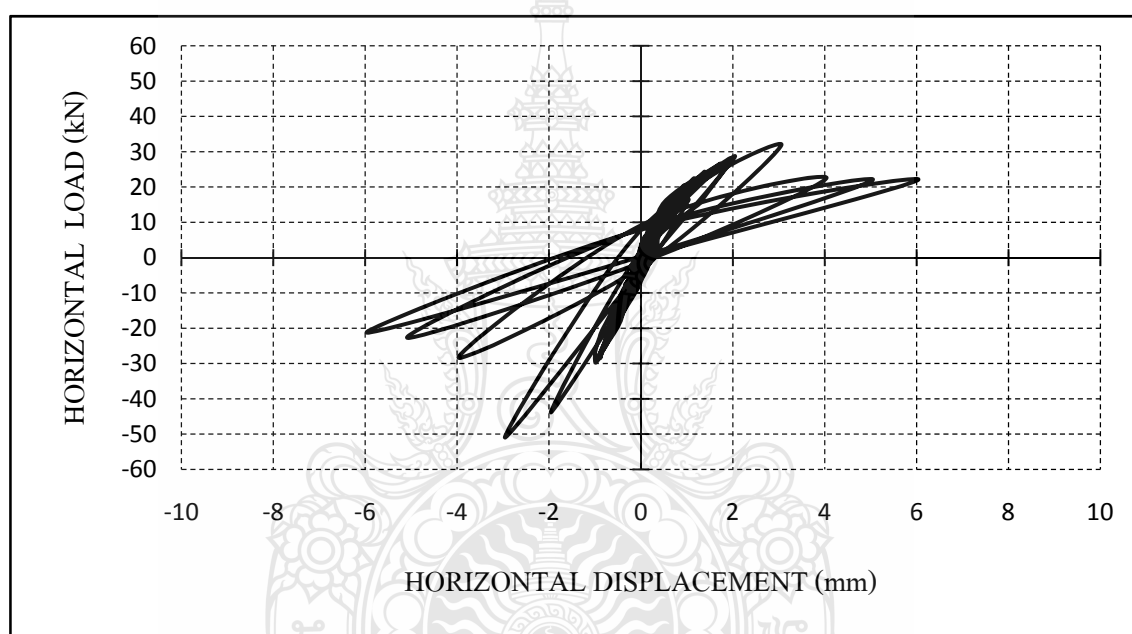
ผนังอิฐก่อโบราณ AMW03_GFRP.C เป็นผนังที่ได้ทำการเสริม Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) ทั้ง 2 ด้าน ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผนัง พบว่าสามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด 29.00 กิโลนิวตัน การเคลื่อนตัวของผนัง 2.79 มิลลิเมตร ทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะเส้นวงแคบยาว ช่วงกราฟกว้าง จำนวนเส้นวงมาก จากลักษณะกราฟดังกล่าวผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW 03_GFRP.C สามารถเคลื่อนตัวได้เพิ่มขึ้น และรับแรงกระทำทางด้านข้างได้มากกว่าผนัง AMW01 ประมาณ 1.8 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW03_GFRP.C

4.6.4 ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW04_GFRP.D

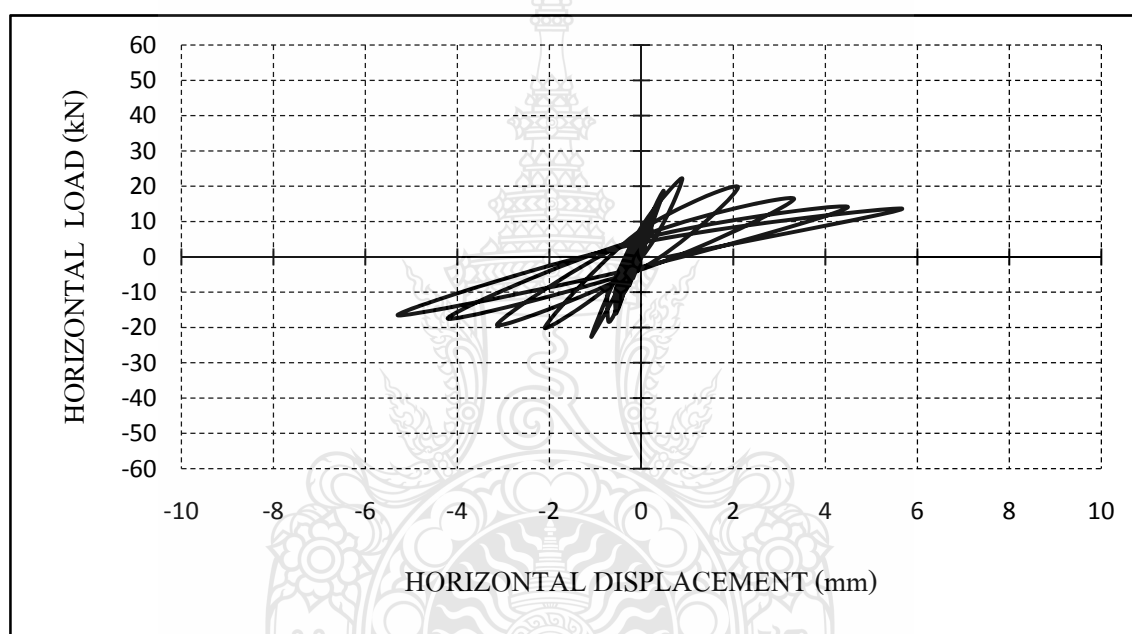
ผนังอิฐก่อโบราณ AMW04_GFRP.D เป็นผนังที่ได้ทำการเสริมผนังด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) 1 ด้าน ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผนัง พบว่าสามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด 50.87 กิโลนิวตัน การเคลื่อนตัวของผนัง 2.96 มิลลิเมตร ทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะเส้นวงแคบยาว ช่วงกราฟกว้าง จำนวนเส้นวงมาก ทำให้ทราบว่าผนังอิฐก่อโบราณ AMW04_GFRP.D สามารถเคลื่อนตัวได้เพิ่มขึ้น และรับแรงกระทำทางด้านข้างได้มากกว่าผนัง AMW01 ประมาณ 3.18 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW04_GFRP.D

4.6.5 ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW05_GFRP.E

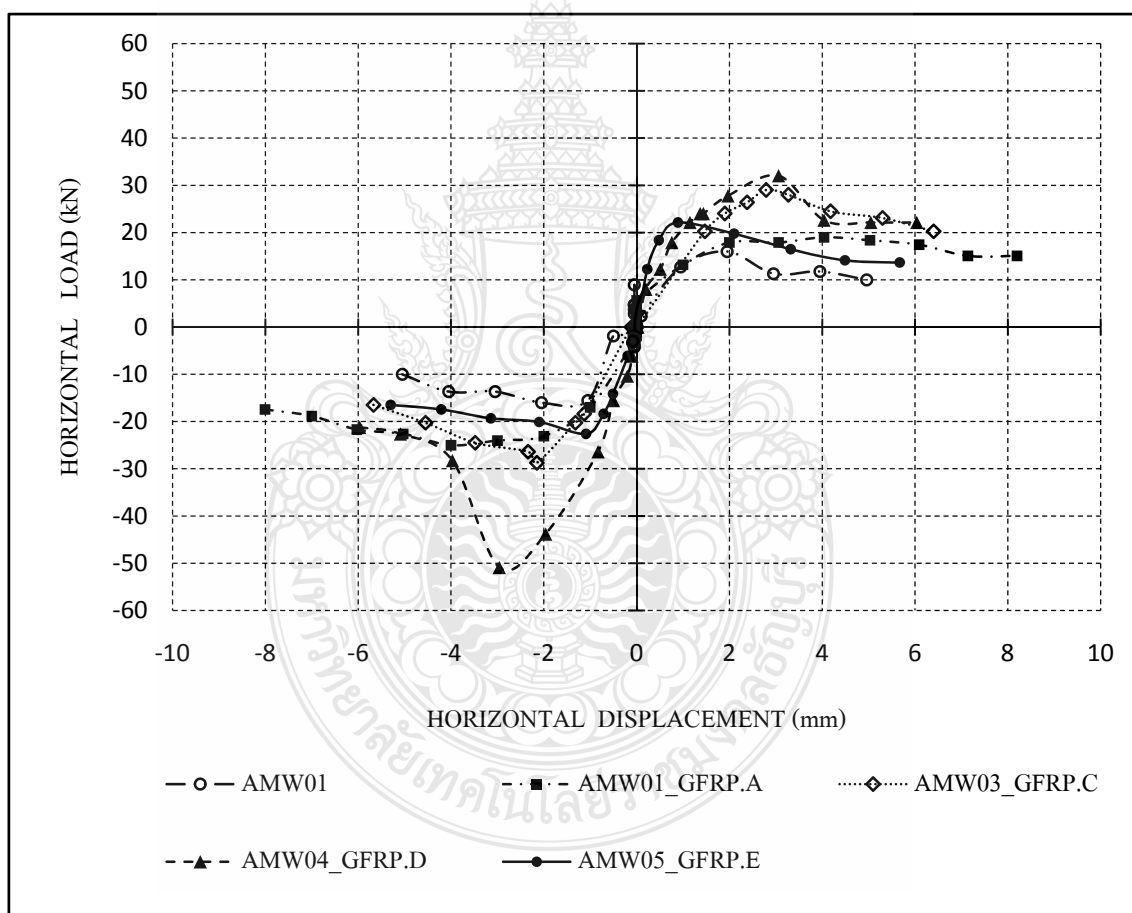
ผนังอิฐก่อโบราณ AMW05_GFRP.E เป็นผนังที่ได้ทำการเสริมผนังด้วย Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) 1 ด้าน ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผนัง พบว่าสามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด 22.61 กิโลนิวตัน การเคลื่อนตัวของผนัง 1.09 มิลลิเมตร ทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะเส้นวงแคบยาว ช่วงกราฟกว้าง จำนวนเส้นวงมาก ทำให้ทราบว่าผนังอิฐก่อโบราณ AMW05_GFRP.E สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้เพิ่มขึ้น ประมาณ 1.41 เท่าของผนัง AMW01 ดังแสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW05_GFRP.E

4.6.6 เปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร

จากการทดลองการรับกำลังด้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อที่ทำการซ่อมแซมด้วยวัสดุ GFRP สามารถต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรได้เพิ่มขึ้นมากกว่า 1 เท่า ของผนังที่ไม่ได้เสริมด้วยวัสดุ GFRP และผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างที่ทำการเสริมกำลังด้วยวัสดุ GFRP รูปกากบาท 1 ด้าน ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผนัง พบว่าสามารถรับแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรได้สูงสุด 50.87 กิโลนิวตัน การเคลื่อนตัวของผนัง 2.96 มิลลิเมตร สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรได้มากกว่าผนังที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP ประมาณ 3 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 Skeleton Curve ของแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร และการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของผนังอิฐก่อโบราณในแต่ละตัวอย่างการทดลอง

4.7 การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อโบราณ จำนวน 5 ตัวอย่าง ได้ดำเนินการทดลองผนังอิฐก่อโบราณที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP จำนวน 1 ตัวอย่าง (AMW01) ทดสอบผนังอิฐก่อโบราณที่ทำการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวัสดุ GFRP เมื่อผนังเกิดการวิบัติ จำนวน 1 ตัวอย่าง (AMW01_GFRP.A) และทดสอบผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วยวัสดุ GFRP จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยเสริมวัสดุ GFRP โดยมีรูปแบบการเสริมวัสดุ GFRP คือ รูปกากบาททั้งสองด้าน ร้อยละ 20 ของพื้นที่ผนังแต่ละด้าน จำนวน 1 ตัวอย่าง (AMW03_GFRP.C) รูปกากบาทหนึ่งด้าน ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผนัง จำนวน 1 ตัวอย่าง (AMW04_GFRP.D) เสริมแบบแถบตารางแนวตั้ง 2 แถบ แนวนอน 2 แถบ หนึ่งด้าน ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผนัง จำนวน 1 ตัวอย่าง (AMW05_GFRP.E) โดยสามารถวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองได้ดังนี้

4.7.1 ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW01_GFRP.A เมื่อทำการซ่อมแซมรอยแตกร้าวที่ผิวผนังด้วยวัสดุ GFRP สามารถต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรได้มากกว่า 1.5 เท่าของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง AMW01 ที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP เนื่องจากการซ่อมแซมหรือการเสริมกำลังในตำแหน่งที่รับแรงกระทำหรือโมเมนต์สูงสุด จึงทำให้สามารถต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรได้มากขึ้น และมีความเหนียวมากกว่าผนัง AMW01 ที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP

4.7.2 รูปแบบการเสริมวัสดุ GFRP ปริมาตรร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิวผนัง รูปกากบาทหนึ่งด้าน (AMW04_GFRP.D) สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรได้สูงสุด ดังนั้นการเสริม GFRP ในลักษณะดังกล่าวนี้จึงทำให้ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างมีความแข็งแรงในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรได้มากที่สุด

4.7.3 รูปแบบการเสริมวัสดุ GFRP ปริมาตรร้อยละ 20 ของพื้นที่ผิวผนัง รูปกากบาทสองด้าน (AMW03_GFRP.C) มีระยะการเคลื่อนตัวได้มากกว่า ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างที่เสริมวัสดุ GFRP ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิวผนัง รูปกากบาทหนึ่งด้าน (AMW04_GFRP.D) แสดงว่าการเสริมวัสดุ GFRP ทั้งสองด้าน จะทำให้ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างมีความเหนียวเพิ่มขึ้น มีระยะการเคลื่อนตัวได้มากขึ้น สามารถกระจายพลังงานในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในภาพที่ 4.16

4.7.4 รูปแบบการเสริมวัสดุ GFRP แบบแถบตารางแนวตั้ง 2 แถบ และแนวนอน 2 แถบ ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผนัง พบว่าสามารถต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรได้น้อยที่สุด และมีระยะการเคลื่อนตัวของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเสริมวัสดุ GFRP ในรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.16

4.7.5 จากผลการทดสอบการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่าง พบว่าด้านของผนังตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP จะเกิดการแตกร้าวก่อน ด้านของผนังตัวอย่างที่เสริมวัสดุ GFRP แสดงว่าวัสดุชนิดนี้ช่วยในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรให้กับผนังอิฐก่อได้มากขึ้น

4.7.6 จากผลการทดสอบการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่าง พบว่า การเสริมกำลังและการซ่อมแซมผนังอิฐก่อด้วยวัสดุ GFRP สามารถต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรได้เพิ่มขึ้นมากกว่า 1 เท่า ของผนังที่ไม่ได้เสริมด้วยวัสดุ FRP

4.7.7 จากผลการทดสอบการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่าง พบว่า ผนังตัวอย่าง AMW01_GFRP.A เป็นการซ่อมแซมเมื่อผนังวิบัติซึ่งผนังสามารถเคลื่อนตัวได้มากที่สุด ทำให้ผนังตัวอย่างดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่สุด ที่จะใช้ในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร ดังแสดงในภาพที่ 4.16



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Glass Fibe-Reinforced Polymer (GFRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้นข้างแบบวัฏจักร โดยดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของอิฐโบราณ ได้แก่ การวัดขนาด การหาน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ และการรับกำลังอัด ซึ่งอิฐโบราณที่นำมาทดสอบนี้ เป็นอิฐใหม่มีอายุประมาณ 1 ปี ซึ่งกรมศิลปากรนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนสำหรับก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน จากแหล่งผลิตในปัจจุบัน ณ ตำบลลุมพินี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และนำมาถือเป็นผนังตัวอย่างและทดสอบการรับแรงกระทำทางด้นข้างแบบวัฏจักร จำนวน 5 ตัวอย่าง คือ ผนังตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP จำนวน 1 ตัวอย่าง ผนังตัวอย่างเมื่อเกิดการวิบัติและซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวัสดุ GFRP จำนวน 1 ตัวอย่าง ผนังตัวอย่างที่เสริมวัสดุ GFRP จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 อิฐที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับอิฐโบราณ จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกล

5.1.2 ผนังอิฐก่อโบราณที่ซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยการเสริม GFRP ที่ผิวผนัง สามารถรับแรงกระทำทางด้นข้างแบบวัฏจักรได้เพิ่มขึ้น จากผนังอิฐก่อโบราณที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP

5.1.3 ผนังอิฐก่อโบราณที่เสริมวัสดุ GFRP 1 ด้าน ปริมาณร้อยละ 40 ของพื้นที่ผนัง แบบกากบาท สามารถรับแรงกระทำทางด้นข้างแบบวัฏจักรได้มากที่สุด

5.1.4 ผนังอิฐก่อโบราณที่เสริมวัสดุ GFRP ทุกรูปแบบการเสริม สามารถรับแรงกระทำทางด้นข้างแบบวัฏจักรได้เพิ่มขึ้น จากผนังอิฐก่อโบราณที่ไม่ได้เสริมวัสดุ GFRP และผนังอิฐก่อโบราณที่เสริมวัสดุ GFRP 2 ด้านๆ ร้อยละ 20 ของพื้นที่ผนัง แบบกากบาท มีระยะการเคลื่อนตัวมากกว่าผนังที่เสริมวัสดุ GFRP ในรูปแบบอื่นๆ สามารถกระจายพลังงานได้ดีกว่าทุกแบบ จึงมีความเหมาะสมในการต้านทานแรงกระทำทางด้นข้างแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อโบราณ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทำงานวิจัยครั้งนี้จำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมตัวแปรที่สำคัญเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ทดสอบจริงโดยมีข้อควรระวังในการทำงานวิจัยที่มีผลต่อการศึกษาวิจัยดังต่อไปนี้

5.2.1 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเสริมวัสดุ GFRP ในรูปแบบการเสริมเดียวกัน แต่ปริมาณต่อพื้นที่ผนังแตกต่างกัน เพื่อหาปริมาณของการเสริม GFRP ที่เหมาะสม

5.2.2 การทดลองแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร ควรมีแรงกระทำในแนวตั้งร่วมด้วย

5.2.3 ควรศึกษาข้อมูลโบราณสถานจริงเพิ่มเติม เช่น ลักษณะการก่ออิฐ การพังของผนังก่อแต่ละแห่ง และอื่นๆ เพื่อนำไปออกแบบ พัฒนาการเสริมกำลังให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, **มาตรฐานอาคารวัสดุก่อ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ,** 2535. หน้า 1-38
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐก่อสร้างสามัญ** มอก.77 – 2517, 2517.
- [3] สิทธิชัย แสงอาทิตย์, **การทดสอบและพัฒนาโครงสร้างอิฐก่อ (Testing and Development of Brick Masonry Structure)**, รายงานการวิจัย สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พฤษภาคม 2542.
- [4] ชชาติชาย ร่มศักดิ์, **การศึกษาวิวัฒนาการองค์ประกอบและการใช้ประโยชน์ของดินเพื่อการตั้งถิ่นฐานในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา**, สำนักงานโบราณคดีและพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ ที่ 3, พระนครศรีอยุธยา, 2539. หน้า 1-210
- [5] สุดชาย พานสุวรรณ, **การวิเคราะห์โบราณสถานก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม**, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543.
- [6] สมชาติ จึงสิริอารักษ์, **การอนุรักษ์อาคารโครงสร้างและวัสดุของโบราณสถาน**, มหาวิทยาลัย ศิลปากร, กรุงเทพฯ, 2540. หน้า 1-103
- [7] ธรรมชาติ กุลประภา, **“การใช้พลาสติกเสริมเส้นใยแบบต่อเนื่อง (FRP)”**, การอบรมของสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, รุ่นที่ 2, 29 กรกฎาคม 2552, ห้องประชุม 3 ชั้น 3 อาคาร วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2552. หน้า 12-26
- [8] ผศ.ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์, **“การเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย”**, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 1-4
- [9] ธรรมชาติ กุลประภา และคณะ, **“ข้อควรระวังในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Plastic Composite)”**, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 13, 14-16 พฤษภาคม 2551, โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา, 2551. หน้า 1-6.

- [10] Miha Tomazevic, "Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6", **Materials and Structures (2009)**, No. 42, Published online, 23 September 2008. pp 889-907.
- [11] Gero Marzahn1, Improving the Shear Bond Behaviour of Masonry (Online), 1996.
Available:http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer01/l01_17.pdf (20 September 2009).
- [12] Dr. ir. M.R.A. van Vliet, "Shear tests on masonry panels; Literature survey and proposal for experiments", **TNO Building and Construction Research**, October 21, 2004. pp 1-36.
- [13] M.A. Haroun, A.S. Mosallam and K.H. Allam, **Cyclic in-Plane Shear of Concrete Masonry Walls Strengthened by FRP Laminates** (Online), Available: <http://www.quakewrap.com/frp%20papers/CyclicInPlaneShearofConcreteMasonryWallsStrengthenedbyFRPLaminates.pdf> (20 September 2009).
- [14] Hernán Santa Maria, Pablo Alcaino and Carl Luders, "EXPERIMENTAL RESPONSE OF MASONRY WALLS EXTERNALLY REINFORCED WITH CARBON FIBER FABRICS", **U.S. National Conference on Earthquake Engineering**, Proceedings of the 8th, April 18-22, 2006, San Francisco, California, USA, 2006 Paper No. 1402.
- [15] H. MAHMOOD, A. P. RUSSELL and J. M. INGHAM, **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 September 2009).
- [16] Mohamed ELGAWADY, Pierino LESTUZZI and Marc BADOUX, "Dynamic Versus Static Cyclic Tests of Masonry Walls Before and After Retrofitting With GFRP", **World Conference on Earthquake Engineering**, 13th, August 1-6, 2004, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 2913.



ภาคผนวก ก

ภาพการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง



ภาพที่ ก.1 เตรียมผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ ก.2 เตรียมผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ ก.3 เตรียมผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างทดสอบ



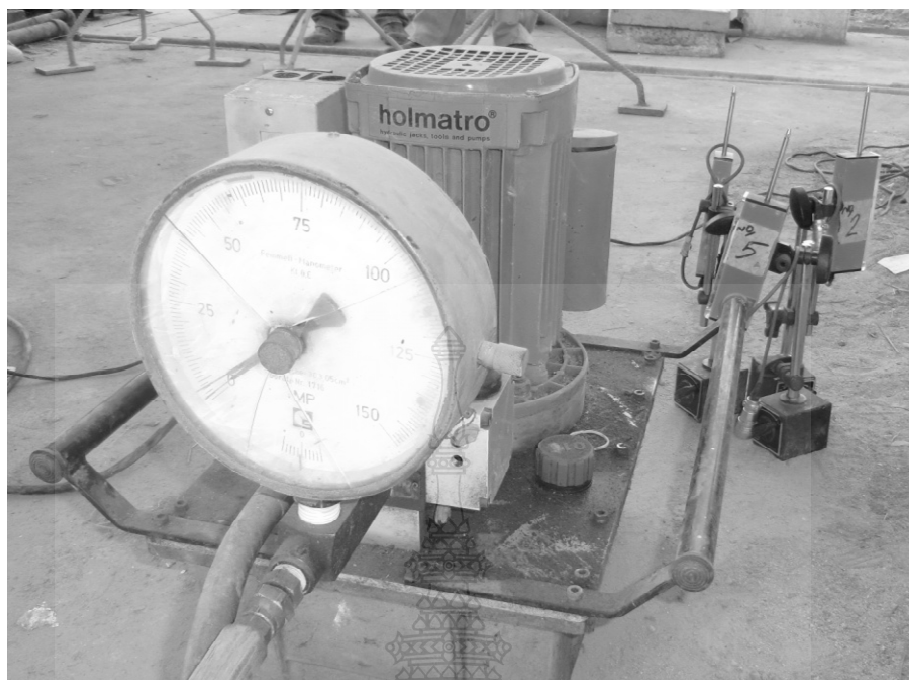
ภาพที่ ก.4 ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างก่ออยู่บนฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 0.9x2.0x0.30 m.



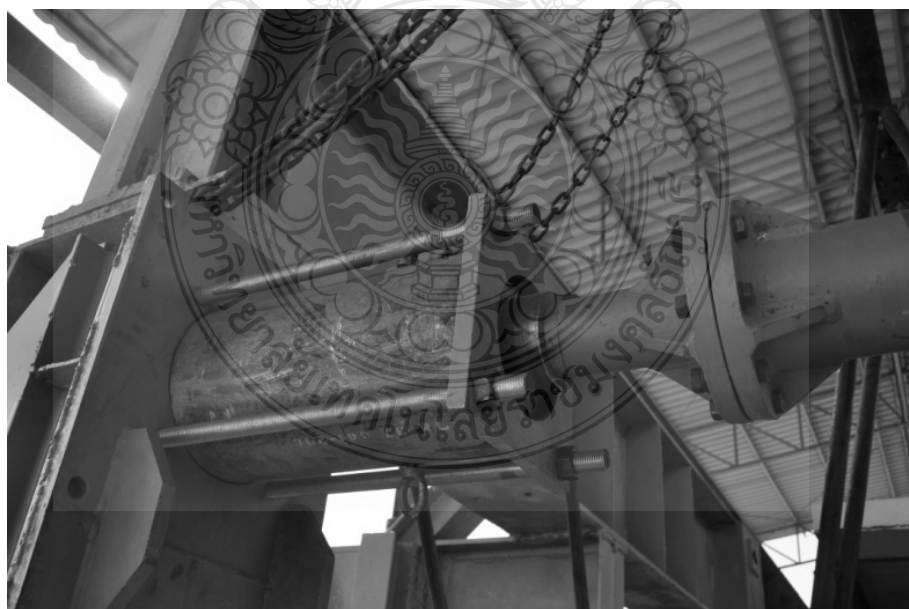
ภาพที่ ก.5 ปูนขาวหมักแบบโบราณ



ภาพที่ ก.6 ผนังอิฐก่อตัวอย่างสำหรับทดสอบ



ภาพที่ ก.7 เครื่องบังคับ Hydraulic Jack



ภาพที่ ก.8 Hydraulic Jack ขนาด 100 ตัน



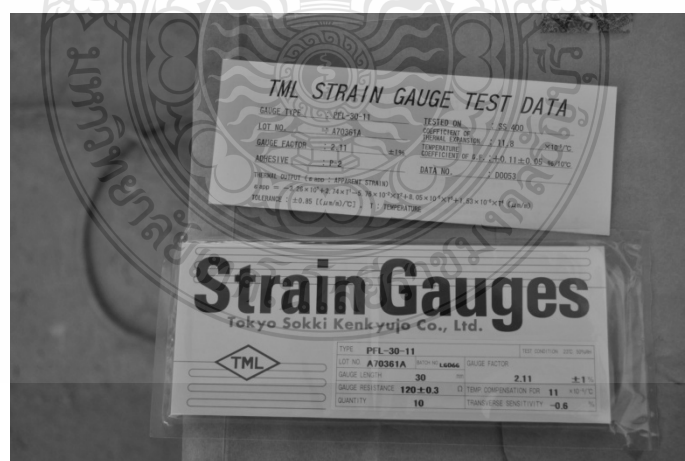
ภาพที่ ก.9 Load Cell ขนาด 100 ตัน



ภาพที่ ก.10 เครื่องแปลงข้อมูล (Data Logger)



ภาพที่ ก.11 LVDT (Linear Variable Displacement Transducers)



ภาพที่ ก.12 Electric Strain Gages



ภาพที่ ก.13 Crack Width Indicator



ภาพที่ ก.14 ผนังอิฐก่อตัวอย่างทดสอบ อายุ 3 ปี



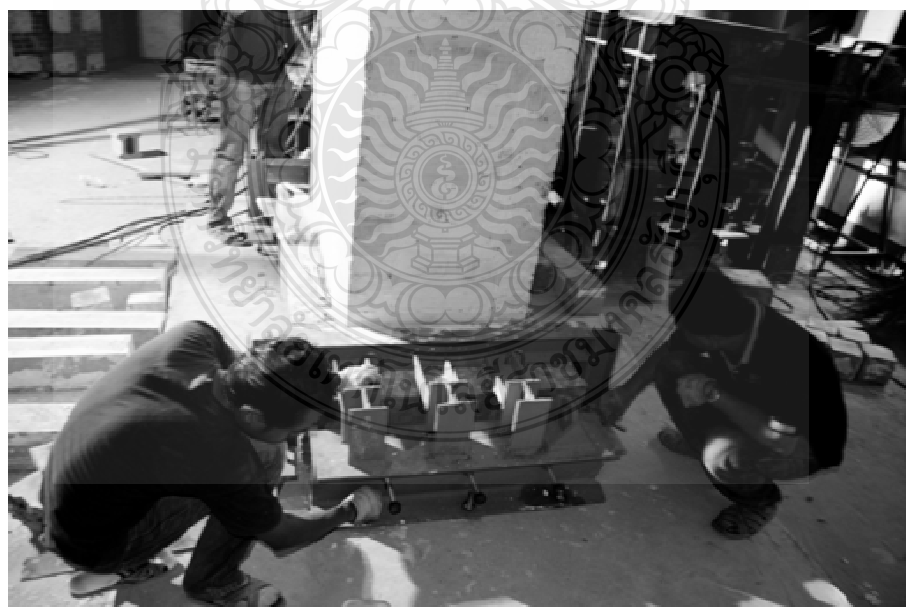
ภาพที่ ก.15 เทคานทับหลังคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ ก.16 ผนังอิฐก่อตัวอย่างพร้อมทดสอบ



ภาพที่ ก.17 จัดวางตำแหน่งเพื่อยึดฐานคอนกรีตเสริมเข้ากับพื้น โดยมีคานเหล็กรัดหัวท้าย



ภาพที่ ก.18 ยึดฐานคอนกรีตเสริมโดยคานเหล็กรัดหัวท้าย



ภาพที่ ก.19 ยึดฐานไฮดรอลิกส์แจ๊คเข้าเฟรมห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ ก.20 ยึดฐานไฮดรอลิกส์แจ๊คเข้ากับคาน ค.ส.ล. ด้านบนผนังอิฐก่อทดสอบ



ภาพที่ ก.21 ชุดให้แรงกระทำทางด้านข้าง ไฮดรอลิกส์แจ๊คต่อกับ Load Cell



ภาพที่ ก.22 จัดแต่งพื้นผิวผนังตัวอย่างเพื่อติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์



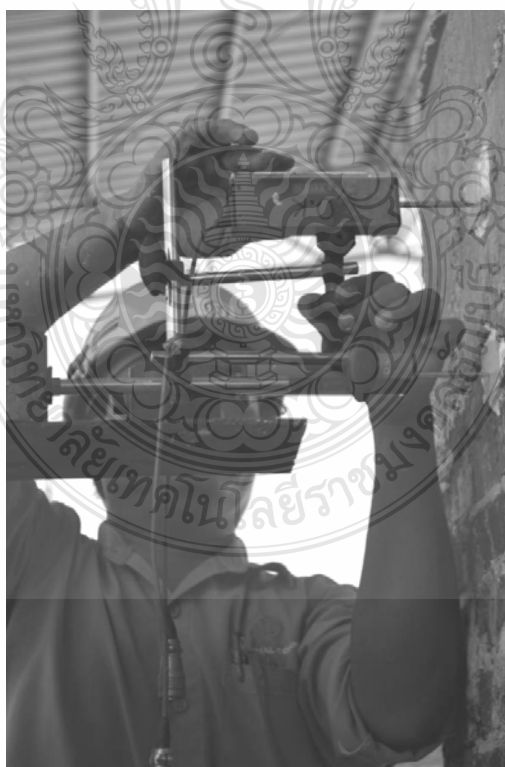
ภาพที่ ก.23 การติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์



ภาพที่ ก.24 การติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ (ต่อ)



ภาพที่ ก.25 การติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ (ต่อ)



ภาพที่ ก.26 การติดตั้ง LVDT



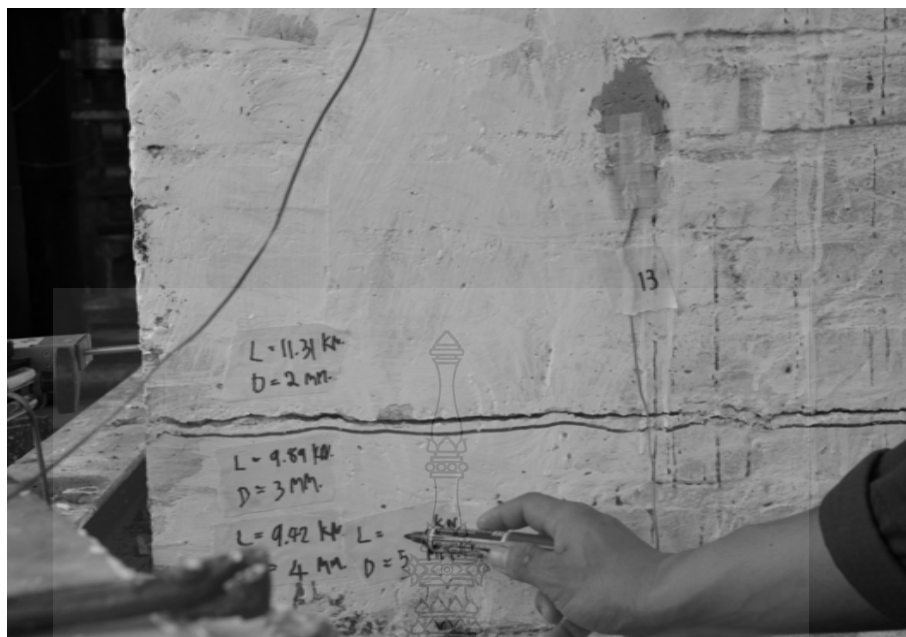
ภาพที่ ก.27 ติดตั้ง Electric Strain Gages



ภาพที่ ก.28 เตรียมผนัง AMW01 เพื่อทำการทดสอบ



ภาพที่ ก.29 ติดตั้งอุปกรณ์ เตรียมการทดสอบผนัง AMW01



ภาพที่ ก.30 ทำการ Mark และบันทึก ความกว้างและความยาวของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นขณะ
ดำเนินการทดสอบผนัง AMW01



ภาพที่ ก.31 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นขณะดำเนินการทดสอบผนังตัวอย่าง AMW01



ภาพที่ ก.32 ผนัง AMW01 หลังการทดสอบ เกิดรอยร้าวรอบผนังบริเวณสูงจากฐานคอนกรีตเสริมเหล็กประมาณ 20 ซม.



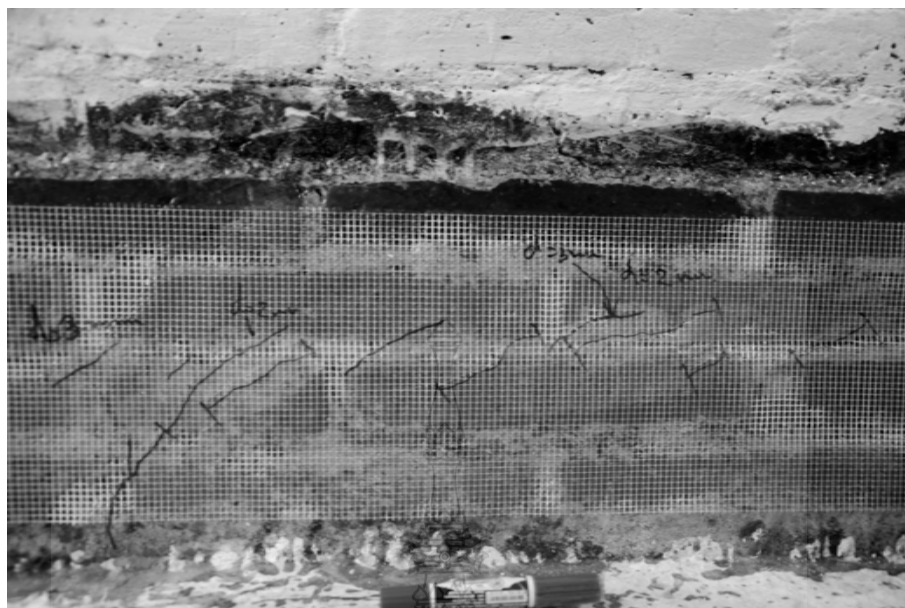
ภาพที่ ก.33 ผนัง AMW01 หลังการทดสอบ เกิดรอยร้าวรอบผนังบริเวณสูงจากฐานคอนกรีตเสริมเหล็กประมาณ 20 ซม. (ต่อ)



ภาพที่ ก.34 เตรียมผนัง AMW01_GFRP.A ซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วย GFRP



ภาพที่ ก.35 ติดตั้งอุปกรณ์ เตรียมการทดสอบผนัง AMW01_GFRP.A



ภาพที่ ก.36 ทำการทดสอบผนัง AMW01_GFRP.A ทางด้านข้างเข้าไปชำรุดมาขณะทำการทดสอบ
สังเกตความกว้างและความยาวของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น



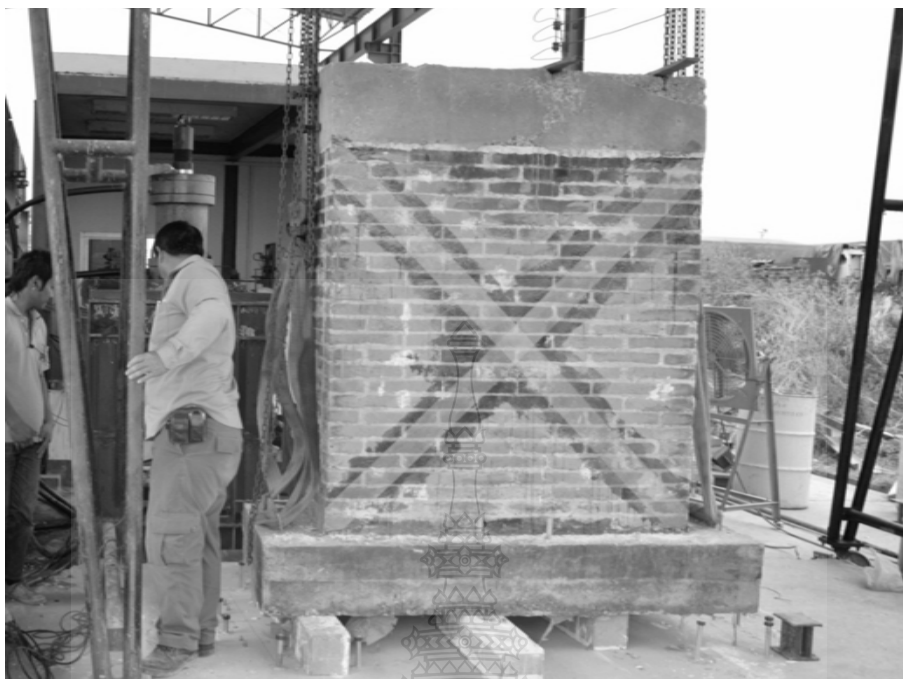
ภาพที่ ก.37 AMW01_GFRP.A ทางด้านข้างเข้าไปชำรุดมาขณะทำการทดสอบสังเกตความกว้างและ
ความยาวของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น (ต่อ)



ภาพที่ ก.38 จากการทดสอบผนัง AMW01_GFRP.A บริเวณที่ซ่อมแซมรอยแตกร้าว GFRP เกิดการ
ฉีกขาดและหลุดร่อน



ภาพที่ ก.39 จากการทดสอบผนัง AMW01_GFRP.A บริเวณที่ซ่อมแซมรอยแตกร้าว GFRP เกิดการ
ฉีกขาดและหลุดร่อน (ต่อ)



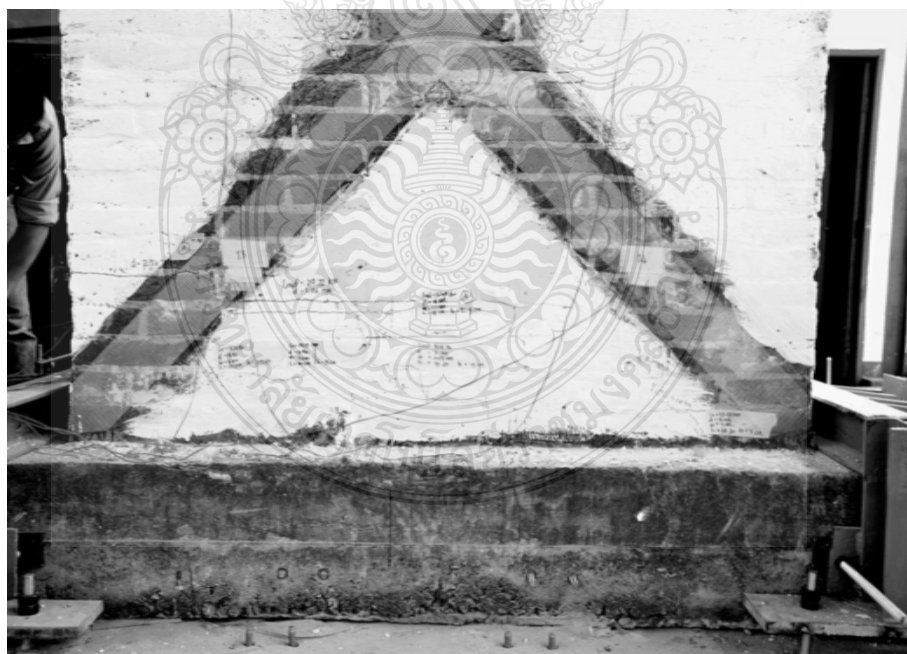
ภาพที่ ก.40 เตรียมผนัง AMW03_GFRP.C



ภาพที่ ก.41 ติดตั้งอุปกรณ์ เตรียมการทดสอบผนัง AMW03_GFRP.C



ภาพที่ ก.42 ทำการทดสอบผนัง AMW03_GFRP.C ขณะทำการทดสอบสังเกตความกว้างและความยาวของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น



ภาพที่ ก.43 ทำการทดสอบผนัง AMW03_GFRP.C ขณะทำการทดสอบสังเกตความกว้างและความยาวของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น



ภาพที่ ก.44 ผนัง AMW03_GFRP.C หลังการทดสอบ เกิดรอยร้าวรอบผนังบริเวณสูงจากฐานคอนกรีตเสริมเหล็กประมาณ 30 ซม.



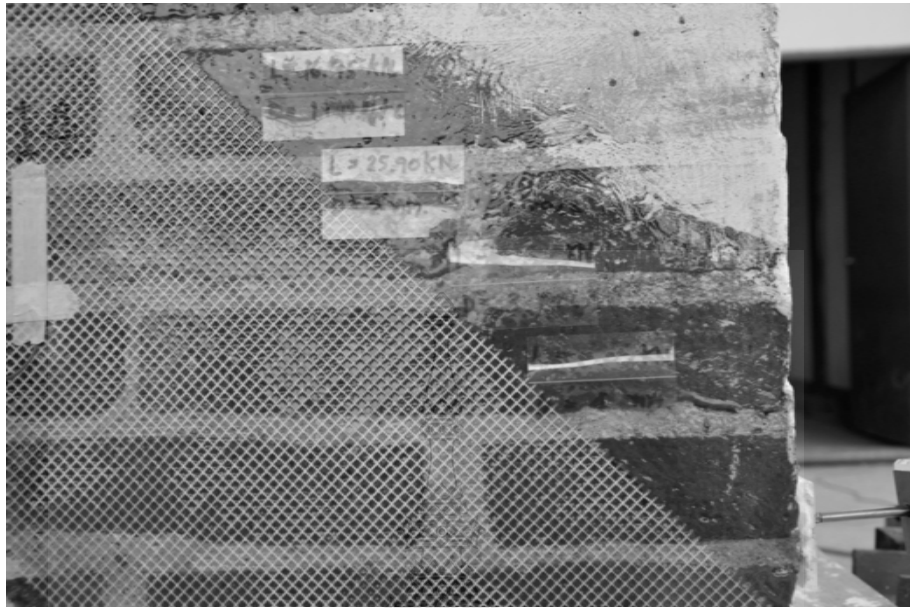
ภาพที่ ก.45 ผนัง AMW 03_GFRP.C หลังการทดสอบ เกิดรอยร้าวรอบผนังบริเวณสูงจากฐานคอนกรีตเสริมเหล็กประมาณ 30 ซม.



ภาพที่ ก.46 เตรียมผนัง AMW04_GFRP.D



ภาพที่ ก.47 ติดตั้งอุปกรณ์เตรียมการทดสอบผนัง AMW04_GFRP.D

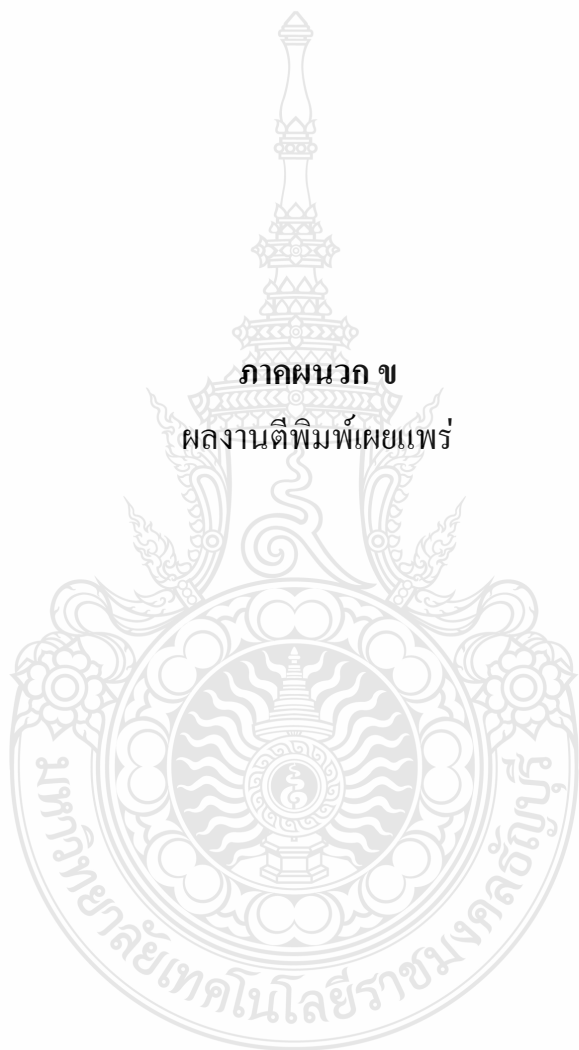


ภาพที่ ก.48 ทำการทดสอบผนัง AMW04_GFRP.D สังเกตความกว้างและความยาวของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น



ภาพที่ ก.49 ทำการทดสอบผนัง AMW04_GFRP.D สังเกตความกว้างและความยาวของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น

ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบุรีรัมย์ >>>>>

ที่ ร 50 / 2556

17 พฤษภาคม 2556

เรื่อง ตอบรับตีพิมพ์บทความลงในวารสาร

เรียน นายชินโชติ บรรจงปรุ

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง "การศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Fiber-Reinforced Polymer (FRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวิฤจักร" เพื่อขอตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบุรีรัมย์ ทางกองบรรณาธิการ ได้พิจารณาแล้ว เห็นควรให้ตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบุรีรัมย์ ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม) 2556 ต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต แสงสวัสดิ์)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบุรีรัมย์

**การศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Fiber-Reinforced Polymer (FRP)
ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร**
**Study on the Behavior of Ancient Masonry Wall Retrofitted using Fiber-Reinforced Polymer (FRP)
Under Lateral Cyclic Load**

จินโชติ บรรจงปรุ¹ และดร.หมิง จิ่ง²

บทคัดย่อ

โบราณสถานในประเทศไทยเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีอารยธรรมมาช้านาน ส่วนใหญ่จะใช้อิฐเป็นวัสดุก่อสร้างหลักด้วยลักษณะของโครงสร้างเป็นผนังอิฐก่อและไม่ได้คำนึงถึงเรื่องของการรับแรงดันด้านข้างหรือแรงสั่นสะเทือน การต้านทานแรงคดสั้นสะเทือนทางด้านข้างจึงไม่สามารถที่จะต้านทานได้ดีพอ ทำให้เกิดความชำรุดเสียหายได้ง่าย อันอาจนำไปสู่การวิบัติได้ ในที่สุด การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงสั่นสะเทือนทางด้านข้างของผนังอิฐก่อโบราณ โดยเสริม Fiber-Reinforced Polymer (FRP) เพื่อกำหนดความสามารถในการรับแรงดันทางด้านข้าง หรือแรงสั่นสะเทือนในผนังอิฐก่อโบราณได้ เพื่อเป็นข้อมูลในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถาน หรือในงานที่จะต้องก่อสร้างขึ้นมาใหม่เพื่อเพิ่มเติมจากของเก่าที่มีอยู่ให้มีความสมบูรณ์ โดยทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง จำนวน 4 ตัวอย่าง ขนาด 1.50x1.50x0.60 ม แบ่งออกเป็นผนังตัวอย่างที่ไม่เสริมวัสดุ FRP จำนวน 1 ตัวอย่าง ผนังตัวอย่างเมื่อเกิดการวิบัติ และซ่อมแซมด้วย FRP จำนวน 1 ตัวอย่าง ผนังตัวอย่างเสริมด้วย FRP ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิวผนัง ในแนวกากบาท 1 ด้าน จำนวน 1 ตัวอย่าง ผนังตัวอย่างเสริมด้วย FRP ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิวผนัง เป็นแถบตรงแนวตั้งและแนวนอน 1 ด้าน จำนวน 1 ตัวอย่าง โดยให้แรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา จนผนังตัวอย่างไม่สามารถรับแรงกระทำได้อีก ผลการทดสอบดังกล่าวพบว่า ผนังตัวอย่างที่ไม่เสริมวัสดุ FRP สามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด 16.00 กิโลนิวตัน ผนังตัวอย่างเมื่อเกิดการวิบัติ และซ่อมแซมด้วย FRP สามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด 25.00 กิโลนิวตัน ผนังตัวอย่างเสริมด้วย FRP ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิวผนัง ในแนวกากบาท 1 ด้าน สามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด 50.87 กิโลนิวตัน ผนังตัวอย่างเสริมด้วย FRP ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิวผนัง เป็นแถบตรงแนวตั้งและแนวนอน 1 ด้าน สามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด 22.61 กิโลนิวตัน จึงสรุปได้ว่า ผนังตัวอย่างเสริมด้วย FRP ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิวผนัง ในแนวกากบาท 1 ด้าน สามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด จากผลการวิจัยนี้ทำให้ได้แนวทางในการพัฒนาการรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาเสริมด้วย FRP ต่อไป

คำสำคัญ: ผนังอิฐก่อโบราณ, เส้น โยแก้ว, แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร

Abstract

Thai ancient architecture has been constructed for a long time. Principally, The architectures were made from wall constructed by bricks. They were constructed without calculated with lateral load, and impact load. It was ready to fall down because it could not resist to pressure of side impact to the wall. The studied of side impact of a wall constructed by brick of historic ancient by using Fiber-Reinforced Polymer (FRP) will specified the ability of resistant for compressive pressure to the impact on the side of the wall. It is the important data to restore historic ancient, and in case of innovate to add more

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

perfection of the architect. There are four ancient walls sample testing, size 1.50x1.50x0.60 m. the first wall without FRP reinforce, the second wall after failure fixed with FRP reinforce, the third wall reinforce 40% of the wall's surface with diagonal FRP's sheets. The fourth wall reinforce 40% of the wall's surface with vertical and horizontal FRP's strips. Which all of them under lateral cyclic load until the walls fall down. The test results showed that the wall without FRP reinforce has resist to the wall's side maximum load to 16.00 kN. And after the wall failure were fixed with FRP reinforce has resist to the wall's side maximum load to 25.00 kN. The third wall reinforce 40% of the wall surface with diagonal FRP's strips has resist of the wall side maximum load to 50.87 kN. The fourth wall reinforced 40% of the wall's surface with vertical and horizontal FRP's strips has resist of the wall side maximum load to 22.61 kN. Then can summarize that the ancient masonry wall specimen reinforced 40% of the wall surface with diagonal FRP's strips has resist of the wall side maximum lateral cyclic load. From this research result make the guidelines in the future development of Retrofitted using FRP under lateral cyclic load.

Keywords: ancient masonry wall, glass fiber reinforced polymer, lateral cyclic load

1. บทนำ

โบราณสถานในประเทศไทยเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีอายุยาวนาน และเป็นสิ่งสำคัญในการบ่งบอกถึงประเพณี วัฒนธรรม ตลอดจนความรู้ ความชำนาญ ในการใช้เทคโนโลยีในงานก่อสร้างในแต่ละยุคได้เป็นอย่างดี โบราณสถานในสมัยก่อนส่วนใหญ่จะใช้อิฐเป็นวัสดุก่อสร้างหลัก ซึ่งอิฐทำมาจาก ดินเหนียว และวัสดุอื่นๆ เช่น ทราย นำมาขึ้นรูปและผ่านกระบวนการเผา ทำให้อิฐมีความแข็งแรง ทนทานพอที่จะใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างโบราณสถานได้ ด้วยลักษณะของโครงสร้างโบราณสถานเป็น โครงสร้างผนังอิฐก่อ และไม่ได้นำมาถึงเรื่องของการรับแรงดันด้านข้างหรือแรงสั่นสะเทือน อันเนื่องมาจากความรู้และวิทยาการในงานก่อสร้างในสมัยนั้น การต้านทานแรงสั่นสะเทือนทางด้านข้างจึงไม่สามารถที่จะต้านทานได้ดีพอ ทำให้เกิดความชำรุดเสียหายได้ง่าย อันอาจจะนำไปสู่การวิบัติได้ในที่สุด การบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ จึงเป็นสิ่งที่สำคัญ และมีความจำเป็นต้องอาศัยความรู้และข้อมูลทางวิศวกรรม เพื่อเสริมความมั่นคงแข็งแรงของผนังอิฐก่อ ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของโบราณสถาน

วัสดุเสริมแรง Fiber-Reinforced Polymer (FRP) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ทนทาน

มีความยืดหยุ่น ทนทานต่อสภาพอากาศ การผุกร่อนต่อฤทธิ์สารเคมี กรด ด่าง ได้ดี ไม่เป็นสนิม อายุการใช้งานยาวนาน และโดยเฉพาะคุณสมบัติเด่นที่มีความแข็งแรงสามารถทนแรงดึงได้สูง วัสดุ FRP มีลักษณะเป็นแผ่นสามารถใช้ได้ในลักษณะงานซ่อมแซมเพื่อลดขนาดรอยแตกร้าว (crack size) ซึ่งอาจจะก่อผลเสียหายให้กับโครงสร้าง หรือทำให้โครงสร้างกลับคืนสู่สภาพเดิม และประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างใหม่เพื่อเสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงสั่นสะเทือนทางด้านข้างของผนังอิฐก่อโบราณ โดยเสริม Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) จะสามารถกำหนดความสามารถในการรับแรงดันทางด้านข้าง หรือแรงสั่นสะเทือนในผนังอิฐก่อโบราณได้ ซึ่งจะเป็ข้อมูลและเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านงานก่อสร้างที่สำคัญ และเป็นทางเลือกหนึ่งในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานซึ่งส่วนใหญ่โครงสร้างเป็นผนังอิฐก่อนั้น ให้ความมั่นคงแข็งแรงลดความเสียหายกับโครงสร้างโบราณสถาน หรือในงานที่จะต้องก่อสร้างขึ้นมาใหม่ เพื่อเพิ่มเติมจากของเก่าที่มีอยู่ให้มีความสมบูรณ์ และสามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนทางด้านข้างหรือแรงแผ่นดินไหวได้ดีขึ้นด้วย

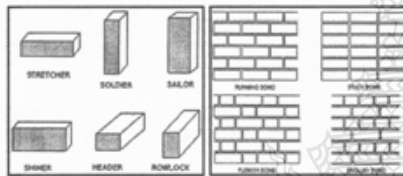
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รูปแบบการวางอิฐ และการเรียงอิฐ

การวางอิฐแบ่งออกเป็น 6 แบบ คือ Stretcher, Header, Rowlock, Shiner, Soldier, Sailor

การเรียงอิฐสามารถเรียงได้ 4 แบบ คือ Running bond, Stack bond, Flemish bond, English bond

จากการสำรวจผนังอิฐโบราณของโบราณสถานในสมัยอยุธยา ส่วนใหญ่จะวางอิฐแบบ Stretcher และเรียงอิฐแบบ English bond ดังนั้นผนังอิฐก่อโบราณทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้จึงใช้รูปแบบการวางอิฐแบบ Stretche และเรียงอิฐแบบ English bond



รูปแบบการวางอิฐ รูปแบบการเรียงอิฐ รูปที่ 1 รูปแบบการวางอิฐ และการเรียงอิฐ

2.2 คุณลักษณะที่ต้องการของอิฐทดแทนอิฐโบราณ

อิฐที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นอิฐใหม่ สำหรับบูรณะโบราณสถานอายุประมาณหนึ่งปี ซึ่งในปัจจุบันมีแหล่งทำอิฐอยู่ที่บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จากการทดสอบมีกำลังอัดเฉลี่ย 52.72 กก./ซม.² และค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่น 30,190 กก./ซม.² ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของสุคชาย (2543) โดยทดสอบอิฐโบราณที่หลุดร่วงจากโบราณสถานที่สามารถประมาณอายุก่อสร้างได้ อิฐโบราณช่วงอายุ 50-200 ปี มีกำลังอัดเฉลี่ย 46.11 กก./ซม.² และค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่น 36,744 กก./ซม.² และจากแหล่งผลิตอิฐทดแทนอิฐโบราณดังกล่าวยังมีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐโบราณส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

ชาติชาย (2539) ผลการศึกษาองค์ประกอบของอิฐในปัจจุบันที่ยังมีการผลิตอยู่ที่บ้านลุมพินี บริเวณ

ริมคลองสระบัว มีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี และชนิดทางจุลทรรศน์ที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำอิฐและชนิดดิน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้มีความคล้ายคลึงกัน และมีความต่อเนื่องถ่ายทอดกันมาตั้งแต่สมัยอยุธยา

สุคชาย (2543) ได้ดำเนินการทดสอบหาความสามารถในการรับกำลังอัดของอิฐสมัยต่างๆ ของตัวอย่างอิฐโบราณที่หลุดร่วงจากโบราณสถานที่สามารถประมาณอายุได้ตั้งแต่ 50 - 410 ปี เปรียบเทียบกับกำลังแรงอัดของอิฐที่มีการผลิตในปัจจุบัน อายุประมาณ 1 ปี สำหรับใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถานภายในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา ผลการวิจัยพบว่ามีความสามารถในการรับกำลังอัด และ โมดูลัสความยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน

2.3 มอร์ตาร์ที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน

สมชาติ(2540) ปูนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดสำหรับโบราณสถานก็คือ ปูนแบบโบราณ ซึ่งหมักจากปูนขาว มีความแข็งแรงพอประมาณ มีความพรุนและความยืดหยุ่นค่อนข้างสูงพอเหมาะสำหรับกำแพงอิฐโบราณสถาน การเตรียมปูนหมักแบบโบราณ มีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) การเตรียมปูนขาวเพื่อใช้ทำปูนหมัก เมาหินปูนด้วยความร้อนสูง เพื่อไล่คาร์บอนไดออกไซด์ หินปูนจะแตกออกเป็นก้อนสีขาว เรียกว่า ปูนดิบ
- 2) การหมักปูนดิบ คือการทำให้ปูนดิบดูดน้ำ แล้วกลายสภาพเป็นปูนเหนียว นำปูนดิบไปแช่ในบ่อหมักปูน ให้น้ำสูงกว่าปูน 2.5 เซนติเมตร เมื่อใส่ปูนดิบลงไปนั้นน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาปูนแตกตัวอย่างรุนแรง น้ำและปูนร้อนจัดจนอุณหภูมิขึ้นสูงถึงจุดเดือด ให้อุ่นปูนอยู่เรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะหยุด เมื่อปฏิกิริยาหยุดและน้ำในบ่อหมักแห้งจะได้ปูนขาวเหนียว นำปูนขาวเหนียวขึ้นจากบ่อหมัก ล้างน้ำร้อนผ่านตะแกรงขนาดตา 5 มิลลิเมตร เก็บปูนขาวเหนียวนี้ไว้ได้น้ำ 60 วันขึ้นไป
- 3) การผสมปูนกับทราย นำปูนหมักผสมกับ

ทรายและปูนซีเมนต์ขาวโดยปริมาตรคั้งนี้ ปูนซีเมนต์ขาว 1 ส่วน, ปูนหมักร้อนแล้ว 2 ส่วน, ทรายหยาบ 9 ส่วน ผสมน้ำพอให้ปูนทรายเข้ากันดี จึงนำไปใช้ก่ออิฐ

2.4 วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Polymer Composite หรือ FRP Composite) [5]

วัสดุคอมโพสิต (composite material) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป เช่นวัสดุคอมโพสิตประเภทพลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic หรือ FRP) กับคอนกรีตเสริมเหล็ก จะพบว่าเส้นใยทำหน้าที่เปรียบเสมือนเหล็กเสริมและพลาสติกทำหน้าที่เปรียบเสมือนคอนกรีต ปัจจุบันพลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic หรือ FRP) โดยเฉพาะแบบอีพ็อกซี (epoxy) เสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) หรือเส้นใยเคฟลาร์ (kevlar fiber) หรือเส้นใยแก้ว (glass fiber) ได้ถูกนำมาใช้งานวิศวกรรมโยธาในหลายด้าน เช่น ใช้แทนเหล็กเสริม ใช้ในการเสริมกำลัง (strengthening) และซ่อมแซม (repair) โครงสร้าง และใช้เป็นวัสดุก่อสร้างองค์อาคาร และ โครงสร้างต่างๆ

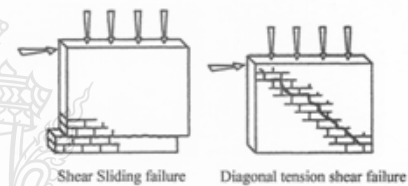
2.5 พฤติกรรมของผนังอิฐก่อ (Masonry Wall) รับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา

Miha Tomazevic (2008) เมื่อผนังอิฐก่อถูกแรงกระทำรวมกันทั้งทางด้านแนวตั้ง และแนวนอน พฤติกรรมของผนังอิฐก่อนั้น จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของผนัง (height/length ratio), คุณสมบัติ และกำลังของอิฐก่อ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress) ในผนังอิฐก่อ กับน้ำหนักที่กระทำ และกำลังอัดของอิฐก่อ เช่นเดียวกันผนังอิฐก่อเมื่อรับแรงค้ำข้าง พฤติกรรมของผนังอิฐก่อจะขึ้นอยู่กับทิศทาง และขนาดของแรงกระทำด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาผนังอิฐก่อรับแรงกระทำทางด้านข้าง และตัวแปรต่างๆ ดังกล่าวที่มีผลต่อพฤติกรรมของผนังอิฐก่อแล้ว อาจจะทำให้ผนังอิฐก่อวิบัติจนไม่สามารถต้านแรงกระทำได้ใน 2 กรณี ดังต่อไปนี้

1) Shear Sliding failure จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงเค้นอัดในแนวตั้ง (Vertical compressive stresses) เกิดขึ้นในผนังมีขนาดค่าและมอร์ค่าที่ใช้ในการก่ออิฐไม่มีคุณภาพ ดังรูปที่ 1 ลักษณะการวิบัติเช่นนี้ นานๆ ครั้งจึงจะเกิดขึ้น ซึ่งจะพบบ่อยในส่วนล่างของผนัง

2) Diagonal tension shear failure จะเกิดรอยแตกบนผนังอิฐก่อจากด้านล่างของผนังขึ้นไปทางด้านบนผนังในแนวทแยง ดังรูปที่ 1 ลักษณะการวิบัติเช่นนี้จะขึ้นอยู่กับ คุณภาพของอิฐก่อ และมอร์ค่า ลักษณะรอยแตกในแนวทแยงนี้อาจแบ่งได้อีกคือ

- 2.1) รอยแตกตามรอยต่อของอิฐก่อ
- 2.2) รอยแตกผ่าอิฐก่อ
- 2.3) มีทั้งรอยแตกตามรอยต่อ และผ่าอิฐก่อ



รูปที่ 2 การวิบัติของผนังอิฐก่อเมื่อรับแรงกระทำแนวตั้งและแนวนอน

3. วิธีคำนวณงานวิจัย

3.1 รูปแบบการทดสอบของผนังอิฐก่อโบราณ

การทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง จำนวน 4 ตัวอย่าง มีรูปแบบการเสริม FRP ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รูปแบบของผนังตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

ผนังทดสอบ	รูปแบบการเสริม FRP
AMW01	ไม่เสริมวัสดุ FRP
AMW01_FRP.A	ซ่อมแซมด้วย FRP เนื่องจากวิบัติ
AMW04_FRP.D	เสริมด้วย FRP ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิวผนัง แนวกาบาทท 1 ด้าน
AMW05_FRP.E	เสริมด้วย FRP ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิวผนัง เป็นแถบตาราง แนวตั้งและแนวนอน 1 ด้าน

3.2 การเตรียมผนังอิฐก่อโบราณทดสอบ

ขนาดของผนังอิฐก่อทดสอบในอัตราส่วนความสูงต่อความยาว (height to length) 1 : 1 จะทำให้ลักษณะพฤติกรรมแรงเฉือนในผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา มีความชัดเจน โดยมีรายละเอียดในการเตรียมผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ดังนี้

1) ก่อผนังอิฐโบราณตัวอย่างแต่ละผนัง ขนาด 1.50x1.50x0.60 ม. ดังแสดงในรูปที่ 3

2) ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ก่ออยู่บนฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.90x2.00x0.30 ม. ที่ยึดแน่นด้วยเหล็กเส้นตีเกลียว และขันแน่นด้วย Bolt โดยการเจาะฝังด้วย Chemical Bolt ลงในพื้นที่ห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 7

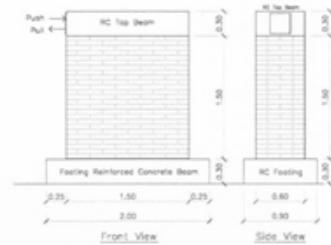
3) เตรียมปูนก่อโบราณ สมชาติ (2540) [2] โดยนำปูนขาวที่หมักในน้ำแล้ว 60 วัน ขึ้นไป จากแหล่งผลิตบ้านลุมพดี มาผสมกับปูนซีเมนต์ขาวและทราย อัตราส่วน 2 : 1 : 9 ผลการทดสอบมีกำลังอัดประลัย 64.80 กก./ซม.² และค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่น 14,530 กก./ซม.²

4) ความหนาของอิฐก่อแต่ละชั้นมีความหนา 6 ซม. โดยเป็นความหนาปูนก่อ 1 ซม. และความหนาอิฐก่อ 5 ซม.

5) ด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบมีคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.60x0.30x1.50 ม.

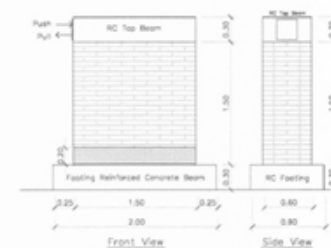
6) ใช้ฐานไฮดรอลิกสี่แฉก (Hydraulic jack) บนโครงเหล็กทดสอบ (Load Frame) และยึดติดกับโหลดเซลล์ (Load Cell) เพื่อเป็นแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Lateral Loading) และยึดโหลดเซลล์ (Load Cell) ดังกล่าวเข้ากับตัวผนังอิฐก่อทดสอบด้วยเหล็กแผ่น ประกับเข้ากับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมี Bolt ที่ฝังไว้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นตัวถ่ายแรงดังแสดงในรูปที่ 7

9) ติดตั้ง Electric Strain Gages และ LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 7



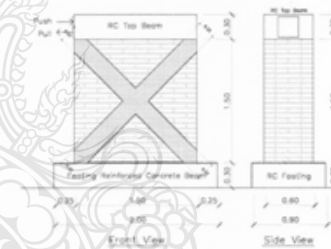
Test No.1 AMW01

รูปที่ 3 ผนังตัวอย่าง AMW01



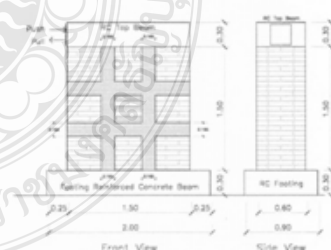
Test No.2 AMW01_FRP.A

รูปที่ 4 ผนังตัวอย่าง AMW01_FRP.A



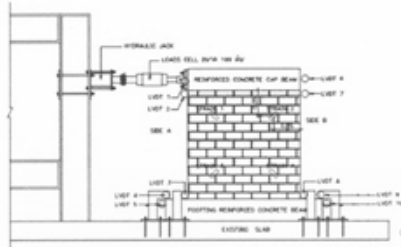
Test No.4 AMW04_FRP.D

รูปที่ 5 ผนังตัวอย่าง AMW04_FRP.D



Test No.5 AMW05_FRP.E

รูปที่ 6 ผนังตัวอย่าง AMW05_FRP.E



รูปที่ 7 ผนังอิฐก่อโบราณสำหรับการทดสอบ Test setup

10) ติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ (FRP) ชนิดเส้นใยแก้ว Glass Fiber (GFRP) แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) บนผนังอิฐก่อโบราณดังรูปที่ 4,5 และ 6 โดยจัดผิวผนังอิฐก่อโบราณตำแหน่งที่จะติดตั้ง FRP ให้เรียบ เช็ดทำความสะอาดผิวด้วยผ้าแห้ง ดังรูปที่ 8 ทารชินที่ขยวแรกบนพื้นผิวผนังที่ขัดเรียบ ทิ้งไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 สัปดาห์ ทารชินรอบที่สอง ปลดทิ้งไว้ 5 นาที แล้วติดตั้งแผ่น FRP ทารชินทับหน้า ดังรูปที่ 9 ทิ้งไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 สัปดาห์ จึงสามารถทำการทดสอบได้



รูปที่ 8 ขัดพื้นผิวผนังอิฐก่อตัวอย่างเพื่อติด FRP

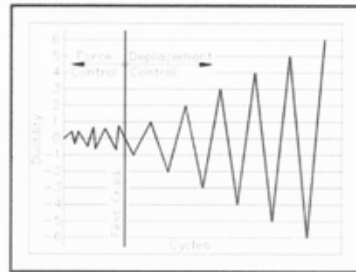


รูปที่ 9 การติดตั้งแผ่น FRP

3.3. การดำเนินการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ

การดำเนินการทดสอบ โดยให้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading) กับผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ทดสอบในอาคารปฏิบัติการของศูนย์อุตสาหกรรมอิตาเลียน ไทย อ่าเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี มีรายละเอียดดังนี้ [4]

- 1) การให้แรงกระทำ (load) ในช่วงเริ่มต้น จะใช้วิธีการควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) โดยการให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 kN ครั้งละครึ่งรอบจนครบหนึ่งรอบ (ดัน-ดึง) ของรอบการทดสอบที่ 1 และในรอบการทดสอบที่ 2 เพิ่มแรงเป็น 4 kN ต่อครั้ง ละครึ่งรอบจนครบ 1 รอบ (ดัน-ดึง) ทำเช่นเดียวกันนี้ในรอบการทดสอบต่อไป (ดัน-ดึง) จนผนังอิฐก่อทดสอบเกิดรอยแตกร้าว (First Cracking) ดังแสดงในรูปที่ 10
- 2) หลังจากผนังอิฐก่อตัวอย่างเกิดรอยแตกร้าว (First Cracking) ให้เปลี่ยนการให้แรงกระทำ (load) เป็นการควบคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ก ครั้งละ 1 มม. ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยทุก ๆ ครึ่งรอบ (ดัน หรือ ดึง) ให้หยุดเพื่อทำการตรวจความเสียหายของผนังอิฐก่อทดสอบ และในกรณีของการเสริมเส้นใยไฟเบอร์ (FRP) ก็ให้ตรวจความเสียหาย (debonding) ของเส้นใย (fiber sheet) ด้วย ทนเช่นเดียวกันนี้ทุกๆ ระยะการเคลื่อนที่จนกว่าผนังจะเกิดการวิบัติ และไม่สามารถรับแรงต่อไปได้อีก
- 3) การวัดระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ก จะควบคุมผ่าน LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) ที่ตำแหน่งคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบ
- 4) หลังจากผนังอิฐก่อตัวอย่าง เกิดรอยแตกร้าว (First Cracking) ด้วยวิธีการควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) ทำการวัดค่าระยะการเคลื่อนที่ไว้ด้วย ซึ่งจะเป็นระยะการเคลื่อนที่เริ่มต้นหลังจากผนังอิฐก่อเริ่มแตกร้าว (First Crack Displacement)
- 5) การยึดหัวตัวของผนังอิฐก่อทดสอบ และ FRP วัดได้จาก Electric Strain Gages บนผนังอิฐก่อ

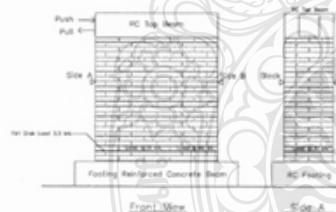


รูปที่ 10 Loading sequence for static cyclic loading

4. ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ผนังอิฐก่อโบราณทดสอบ AMW01

การควบคุมด้วยแรง ผนังมี First Crack ที่แรงกระทำ 3.30 kN, Displacement 0.09 มม., ความคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ Displacement 2.05 มม. ได้แรงกระทำสูงสุด 16.00 kN, เมื่อ Displacement 3.05 มม. แรงกระทำ 13.66 kN และผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้อีกไปได้อีก เกิดการวิบัติของผนัง โดยผนังจะเกิดการแตกร้าวจากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง บริเวณด้านล่างทั้ง 2 ด้านตามทิศทางของแรงที่กระทำ (Shear Sliding failure) ดังรูปที่ 11

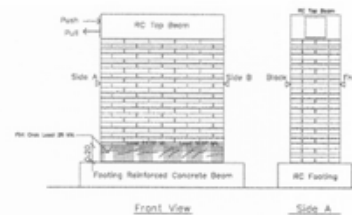


รูปที่ 11 รอยแตกร้าวของผนัง AMW01

4.2 ผนังอิฐก่อโบราณทดสอบ AMW01_FRP.A

การควบคุมด้วยแรง ผนังมี First Crack ที่แรงกระทำ 16.00 kN, Displacement 0.65 มม., ความคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ Displacement 4.00 มม. ได้แรงกระทำสูงสุด 25.00 kN, เมื่อ Displacement 7.00 มม. แรงกระทำ 18.84 kN และผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้อีกไปได้อีก

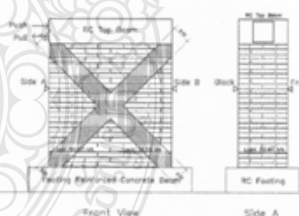
อีก เกิดการวิบัติของผนัง โดยผนังจะเกิดการแตกร้าวจากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง บริเวณด้านล่างทั้ง 2 ด้านตามทิศทางของแรงที่กระทำ (Shear Sliding failure) ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 รอยแตกร้าวของผนัง AMW01_FRP.A

4.3 ผนังอิฐก่อโบราณทดสอบ AMW04_FRP.D

การควบคุมด้วยแรง ผนังมี First Crack ที่แรงกระทำ 26.00 kN, Displacement 1.09 มม., ความคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ Displacement 2.96 มม. ได้แรงกระทำสูงสุด 50.87 kN, เมื่อ Displacement 3.97 มม. แรงกระทำ 28.26 kN และผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้อีกไปได้อีก เกิดการวิบัติของผนัง โดยผนังจะเกิดการแตกร้าวจากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง บริเวณด้านล่างทั้ง 2 ด้านตามทิศทางของแรงที่กระทำ (Shear Sliding failure) ดังรูปที่ 13

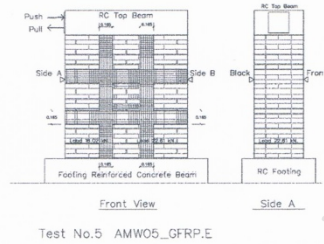


รูปที่ 13 รอยแตกร้าวของผนัง AMW04_FRP.D

4.4 ผนังอิฐก่อโบราณทดสอบ AMW05_FRP.E

การควบคุมด้วยแรง ผนังมี First Crack ที่แรงกระทำ 18.00 kN, Displacement 0.83 มม., ความคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ Displacement 1.09 มม. ได้แรงกระทำ

สูงสุด 22.61 kN, เมื่อ Displacement 3.14 มม. แรงกระทำ 19.31 kN และผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้อีกไปได้อีก เกิดการวิบัติของผนัง โดยผนังจะเกิดการแตกร้าวจากริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง บริเวณด้านล่างทั้ง 2 ด้านตามทิศทางของแรงที่กระทำ (Shear Sliding failure) ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 รอยแตกร้าวของผนัง AMW05_FRP.E

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของผนังอิฐก่อ

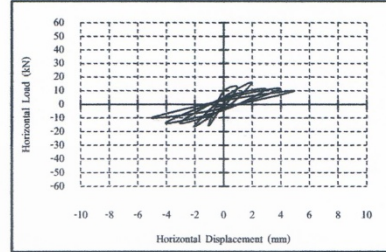
โบราณกับการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา

จากการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา จำนวน 4 ตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบแต่ละตัวอย่าง ดังนี้

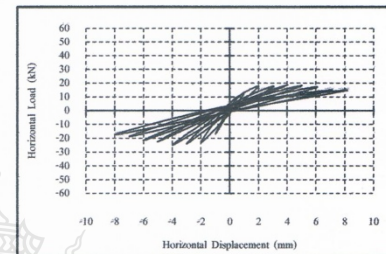
1) ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW01 ผลการทดสอบสามารถรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา Load Max 16.00 kN, Displacement 2.05 มม. จากรูปที่ 15 พบว่าเส้นวงรอบมีลักษณะแคบและสั้น จำนวนเส้นวงรอบน้อย ซึ่งทำให้ทราบว่าผนังอิฐก่อสามารถรับแรงกระทำได้น้อย และผนังสามารถเคลื่อนที่ได้น้อย

2) ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW01_FRP.A ผลการทดสอบสามารถรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา Load Max 25.00 kN, Displacement 4.00 มม. จากรูปที่ 16 พบว่าเส้นวงรอบมีลักษณะแคบและยาว จำนวนเส้นวงรอบมากขึ้น ซึ่งทำให้ทราบว่าผนังอิฐก่อสามารถรับแรงกระทำ และสามารถเคลื่อนที่ได้มากกว่าการทดสอบผนังอิฐก่อ AMW01

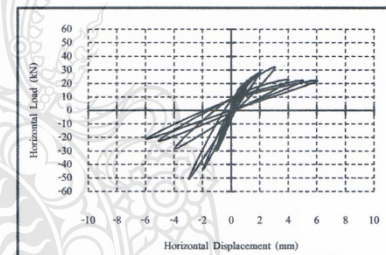
3) ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW04_FRP.D ผลการทดสอบสามารถรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา Load Max 50.87 kN, Displacement 3.97 มม. จากรูป



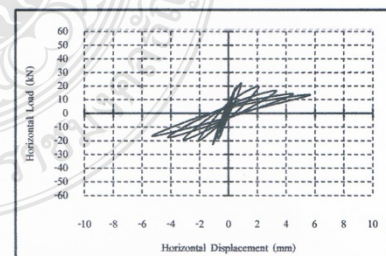
รูปที่ 15 Hysteric Curve of AMW 01



รูปที่ 16 Hysteric Curve of AMW01_FRP.A



รูปที่ 17 Hysteric Curve of AMW04_FRP.D



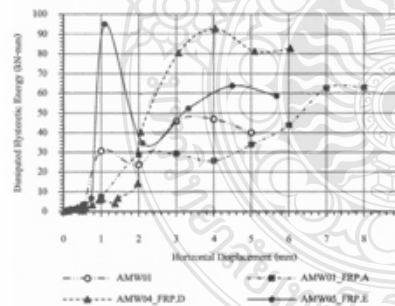
รูปที่ 18 Hysteric Curve of AMW05_FRP.E

ที่ 17 พบว่าเส้นวงรอบมีลักษณะแคบและยาว จำนวนเส้นวงรอบมากขึ้น ซึ่งทำให้ทราบว่าผนังอิฐก่อสามารถรับแรงกระทำและเคลื่อนที่ได้เพิ่มขึ้น ประมาณ 4 เท่าของผนังอิฐก่อ AMW01 เนื่องจากการเสริมกำลังในตำแหน่งที่รับแรงหรือโมเมนต์สูงสุด

4) ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW05_FRP.E ผลการทดสอบสามารถรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา Load Max 22.61 kN, Displacement 1.09 มม. จากรูปที่ 18 พบว่าเส้นวงรอบมีลักษณะแคบและสั้น จำนวนเส้นวงรอบน้อย ซึ่งทำให้ทราบว่าผนังอิฐก่อสามารถรับแรงกระทำ และเคลื่อนที่ได้น้อยกว่าการเสริมกำลังด้วย FRP ในรูปแบบอื่น

4.6 การกระจายพลังงาน (Energy Dissipation)

การเปรียบเทียบผลการกระจายพลังงานดังรูปที่ 19 ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างทดสอบพบว่าผนังอิฐก่อโบราณที่เสริม FRP ร้อยละ 40 ในแนวทแยงมุมหนึ่งด้าน มีการกระจายพลังงานได้ดีที่สุด เนื่องจากการเสริม FRP อยู่ในตำแหน่งการเกิดโมเมนต์ที่ฐานด้านล่างของผนังอิฐก่อทดสอบ การวิบัติเนื่องจากโมเมนต์จะเกิดเป็นแรงดึง ดังนั้นการเสริม FRP ดังกล่าวซึ่งอยู่ในตำแหน่งรับแรงดึง จึงสามารถช่วยในการกระจายพลังงานได้ดีกว่าการเสริม FRP ในรูปแบบอื่นๆ



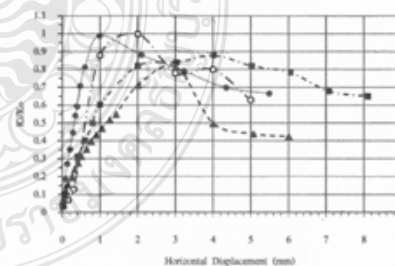
รูปที่ 19 Dissipated Hysteretic Energy

4.7 ความสามารถในการเสียรูป (Ductility)

ความสามารถในการเสียรูป (Ductility) ผลที่ได้คือความสามารถในการเสียรูปจากการรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะการเคลื่อนที่ของผนังเมื่อรับกำลังสูงสุด (Ultimate Load) กับระยะการเคลื่อนที่ของผนังเมื่อเกิดการวิบัติ (Failure) ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากผนังอิฐก่อโบราณรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาได้สูงสุด และการรับแรงเริ่มลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดสอบมีค่า Ductility ดังนี้ AMW01 33.88, AMW01_FRP.A 10.77, AMW04_FRP.D 3.64 และ AMW05_FRP.E 3.78

4.8 ค่า Stiffness

ความต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างของผนังอิฐก่อโบราณทดสอบดังรูปที่ 20 คือการรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นทั้งค่าบวกและค่าลบของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละเส้นวง โดยไม่นับเครื่องหมาย ผลที่ได้คือความแข็งแรงที่ด้านแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา K_i คือค่าเฉลี่ยของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละเส้นวง K_o คือค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในการทดสอบนั้นๆ K_i/K_o คือการเปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นต่อแรงสูงสุดและลักษณะการเคลื่อนที่ของผนังอิฐก่อโบราณทดสอบที่เกิดขึ้นของแต่ละรอบการเคลื่อนที่ การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างของผนังอิฐก่อโบราณ พบว่าการเสริม FRP บนผิวผนังอิฐก่อโบราณสามารถช่วยต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาได้



รูปที่ 20 Stiffness ของผนังอิฐก่อโบราณทดสอบ

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบการรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างซึ่งมีลักษณะ และรูปแบบการเสริมแรง หรือซ่อมแซมแตกต่างกัน ทั้ง 4 ตัวอย่างดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น พบว่าพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างจะวิบัติในลักษณะเป็นแรงเฉือนแตกร้าวตลอดแนวปูนกั้นจนกระทั่งปูนกั้นขาดออกจากกัน (Shear Sliding failure) บริเวณฐานล่างใกล้กับฐาน ค.ส.ล. ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างที่เสริมแรง ด้วย FRP หรือซ่อมแซมหลังการวิบัติ ด้วย FRP จะมีความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างเพิ่มขึ้น ด้านที่ไม่ได้เสริม FRP จะเกิดรอยแตกร้าวก่อน ด้านที่เสริม FRP แสดงว่าวัสดุ FRP สามารถยึดเกาะกับผนังจนเป็นเนื้อเดียวกันและสามารถรับแรงกระทำได้ในที่สุด รูปแบบการเสริม FRP ในแนวทาบสามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้มากที่สุด ซึ่งมากกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีการเสริมกำลังในตำแหน่งที่รับแรงกระทำหรือโมเมนต์สูงสุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุชาติ พานสุวรรณ, การวิเคราะห์โบราณสถานก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2543.
- [2] สมชาติ จึงศิริวัฒน์, การอนุรักษ์อาคารโครงสร้างและวัสดุของโบราณสถาน, มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ, 2540. หน้า 1-103
- [3] Miha Tomazevic, "Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6", *Materials and Structures* (2009), No. 42, Published online, 23 September 2008, pp 889-907.
- [4] Hernán Santa Maria, Pablo Alcaino and Carl Luders, "EXPERIMENTAL RESPONSE OF MASONRY WALLS EXTERNALLY

REINFORCED WITH CARBON FIBER FABRICS", *U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Proceedings of the 8th, April 18-22, 2006, San Francisco, California, USA, 2006 Paper No. 1402.*

- [5] ธรรมชาติ กุลประภา, "การใช้พลาสติกเสริมเส้นใยแบบต่อเนื่อง (FRP)", การอบรมของสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, รุ่นที่ 2, 29 กรกฎาคม 2552, ห้องประชุม 3 ชั้น 3 อาคารวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2552. หน้า 12-26
- [6] ชาติชาย ร่มศักดิ์, การศึกษาวิวัฒนาการองค์ประกอบและการใช้ประโยชน์ของดินเพื่อการตั้งถิ่นฐานในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา, สำนักงานโบราณคดีและพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติที่ 3, พระนครศรีอยุธยา, 2539. หน้า 1-210

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายชิน โชติ บรรจงปรุ
วัน เดือน ปีเกิด	13 กุมภาพันธ์ 2517
ที่อยู่	2626/1 ถนนมุขมนตรี ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
การศึกษา	
2540	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา
2544	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2541	นักวิชาการฝึกอาชีพ 3 ศูนย์พัฒนาฝีมือแรงงานจังหวัดสุรินทร์ กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม
พ.ศ.2541-2547	นักวิชาการฝึกอาชีพ 3-5 สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงานภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม
พ.ศ.2548-2550	นักวิชาการฝึกอาชีพ 6 สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงานภาค 5 นครราชสีมา กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงาน
พ.ศ.2551-ปัจจุบัน	นักวิชาการพัฒนาฝีมือแรงงานชำนาญการ สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงานภาค 5 นครราชสีมา กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงาน