

การศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Fiber-Reinforced Polymer (FRP) ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร

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

ชินโชติ บรรจงปรุ¹ และหมิง จิ่ง²

บทคัดย่อ

โบราณสถานในประเทศไทยเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีอารยะธรรมมาช้านาน ส่วนใหญ่จะใช้อิฐเป็นวัสดุก่อสร้างหลักด้วยลักษณะของโครงสร้างเป็นผนังอิฐก่อและไม่ได้คำนึงถึงเรื่องของการรับแรงดันด้านข้างหรือแรงสั่นสะเทือนการต้านทานแรงคดสั้นสะเทือนทางด้านข้างจึงไม่สามารถที่จะต้านทานได้ดีพอ ทำให้เกิดความชำรุดเสียหายได้ง่าย อันอาจนำไปสู่การวิบัติได้ในที่สุด การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงสั่นสะเทือนทางด้านข้างของผนังอิฐก่อโบราณ โดยเสริม Fiber-Reinforced Polymer (FRP) เพื่อกำหนดความสามารถในการรับแรงดันทางด้านข้าง หรือแรงสั่นสะเทือนในผนังอิฐก่อโบราณได้ เพื่อเป็นข้อมูลในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานหรือในงานที่จะต้องก่อสร้างขึ้นมาใหม่เพื่อเพิ่มเติมจากของเก่าที่มีอยู่ให้มีความสมบูรณ์โดยทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง 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 ของพื้นที่ผิวผนังเป็นแถบตารางแนวตั้งและแนวนอน 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 เป็นแถบตารางแนวตั้งและแนวนอน 1 ด้าน สามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด 22.61 กิโลนิวตัน จึงสรุปได้ว่า ผนังตัวอย่างเสริมด้วย FRP ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิวผนัง ในแนวกากบาท 1 ด้าน สามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด จากผลการวิจัยนี้ทำให้ได้แนวทางในการพัฒนาการรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาเสริมด้วย FRP ต่อไป

คำสำคัญ: ผนังอิฐก่อโบราณ, เส้นใยแก้ว, 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

¹นักศึกษานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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 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

โบราณสถานในประเทศไทยเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีอารยธรรมมาช้านาน และเป็นสิ่งสำคัญในการบอกถึงประเพณี วัฒนธรรม ตลอดจนความรู้ ความชำนาญในการใช้เทคโนโลยีในงานก่อสร้างในแต่ละยุคได้เป็นอย่างดีโบราณสถานในสมัยก่อนส่วนใหญ่จะใช้อิฐเป็นวัสดุก่อสร้างหลัก ซึ่งอิฐทำมาจาก ดินเหนียว และวัสดุอื่นๆ เช่น ทราย นำมาขึ้นรูปและผ่านกระบวนการเผา ทำให้อิฐมีความแข็งแรงทนทานพอที่จะใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างโบราณสถานได้ด้วยลักษณะของโครงสร้างโบราณสถานเป็นโครงสร้างผนังอิฐก่อ และไม่ได้คำนึงถึงเรื่องของการรับแรงดันด้านข้างหรือแรงสั่นสะเทือนอันเนื่องจากความรู้และวิทยาการในงานก่อสร้างในสมัยนั้นการต้านทานแรงดัดสันสะเทือนทางด้านข้างจึงไม่สามารถที่จะต้านทานได้ดีพอ ทำให้เกิดความชำรุดเสียหายได้ง่าย อันอาจนำไปสู่การวิบัติได้ที่สุดในที่สุด การบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ จึงเป็นสิ่งที่สำคัญ และมีความจำเป็นต้องอาศัยความรู้และข้อมูลทางวิศวกรรม เพื่อเสริมความมั่นคงแข็งแรง

ของผนังอิฐก่อซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของโบราณสถาน

วัสดุเสริมแรง Fiber-Reinforced Polymer (FRP) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ทนทาน มีความยืดหยุ่น ทนทานต่อสภาพอากาศ การผุกร่อนต่อฤทธิ์สารเคมี กรด ต่างได้ดี ไม่เป็นสนิมอายุการใช้งานยาวนานและ โดยเฉพาะคุณสมบัติเด่นที่มีความแข็งแรงสามารถทนแรงดึงได้สูงวัสดุ FRP มีลักษณะเป็นแผ่นสามารถใช้ได้ในลักษณะงานซ่อมแซมเพื่อลดขนาดรอยแตกร้าว (crack size) ซึ่งอาจจะก่อผลเสียหายให้กับโครงสร้างหรือทำให้โครงสร้างกลับคืนสู่สภาพเดิม และประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างใหม่เพื่อเสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงสั่นสะเทือนทางด้านข้างของผนังอิฐก่อโบราณ โดยเสริม Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) จะสามารถกำหนดความสามารถในการรับแรงดันทางด้านข้าง หรือแรงสั่นสะเทือนในผนังอิฐก่อโบราณได้ ซึ่งจะเป็นข้อมูลและเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านงานก่อสร้างที่สำคัญ และเป็นทางเลือกหนึ่งในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถาน ซึ่งส่วนใหญ่โครงสร้างเป็น

ผนังอิฐก่อนนั้นให้มีความมั่นคงแข็งแรงลดความเสียหายกับโครงสร้างโบราณสถานหรือในงานที่จะต้องก่อสร้างขึ้นมาใหม่เพื่อเพิ่มเติมจากของเก่าที่มีอยู่ให้มีความสมบูรณ์ และสามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนทางด้านข้างหรือแรงแผ่นดินไหวได้ดียิ่งขึ้นด้วย

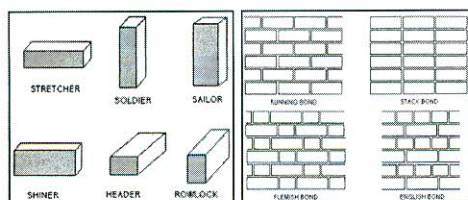
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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 Stretcher และเรียงอิฐแบบ English bond



รูปแบบการวางอิฐ รูปแบบการเรียงอิฐ
รูปที่ 1 รูปแบบการวางอิฐ และการเรียงอิฐ

2.2 คุณลักษณะที่ต้องการของอิฐทดแทนอิฐโบราณ

อิฐที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นอิฐใหม่สำหรับบูรณะโบราณสถานอายุประมาณหนึ่งปี ซึ่งในปัจจุบันมีแหล่งทำอิฐอยู่ที่บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จากการทดสอบมีกำลังอัดเฉลี่ย 52.72 กก./ซม.² และค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่น 30,190 กก./ซม.² ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของสุดชาย (2543) โดยทดสอบอิฐโบราณที่หลุดร่วงจากโบราณสถานที่สามารถประมาณอายุก่อสร้างได้ อิฐโบราณช่วงอายุ 50-200 ปี มีกำลังอัดเฉลี่ย 46.11 กก./ซม.² และค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่น 36,744 กก./ซม.² และจากแหล่งผลิตอิฐ

ทดแทนอิฐโบราณดังกล่าวยังมีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐโบราณส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ ชาติชาย (2539) ผลการศึกษาองค์ประกอบของอิฐในปัจจุบันที่ยังมีการผลิตอยู่ที่บ้านลุมพินีบริเวณริมคลองสระบัว มีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยาซึ่งมีลักษณะทางกายภาพทางเคมีและชนิดทางจุลทรรศน์ที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำอิฐและชนิดดิน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้มีความคล้ายคลึงกันและมีความต่อเนื่องถ่ายทอดกันมาตั้งแต่สมัยอยุธยา

สุดชาย (2543) ได้ดำเนินการทดสอบหาความสามารถในการรับกำลังอัดของอิฐสมัยต่างๆ ของตัวอย่างอิฐโบราณที่หลุดร่วงจากโบราณสถานที่สามารถประมาณอายุได้ตั้งแต่ 50 - 410 ปี เปรียบเทียบกับกำลังแรงอัดของอิฐที่มีการผลิตในปัจจุบัน อายุประมาณ 1 ปีสำหรับใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน ภายในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพินี อำเภอพระนครศรีอยุธยา ผลการวิจัยพบว่ามีความสามารถในการรับกำลังอัด และโมดูลัสความยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน

2.3 มอร์ตาร์ที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน

สมชาติ(2540) ปูนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดสำหรับโบราณสถานก็คือ ปูนแบบโบราณ ซึ่งหมักจากปูนขาวมีความแข็งแรงพอประมาณ มีความพรุนและความยืดหยุ่นค่อนข้างสูงพอเหมาะสำหรับกำแพงอิฐโบราณสถาน การเตรียมปูนหมักแบบโบราณ มีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) การเตรียมปูนขาวเพื่อใช้ทำปูนหมัก เผาหินปูนด้วยความร้อนสูง เพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์ หินปูนจะแตกออกเป็นก้อนสีขาว เรียกว่า ปูนดิบ
- 2) การหมักปูนดิบคือการทำให้ปูนดิบดูดน้ำแล้วกลายสภาพเป็นปูนเหนียว นำปูนดิบไปแช่ในบ่อหมักปูนให้น้ำสูงกว่าปูน 2.5 เซนติเมตร เมื่อใส่ปูนดิบลงไปให้น้ำ จะเกิดปฏิกิริยาปูนแตกตัวอย่างรุนแรง น้ำและปูนร้อนจัดจนอุณหภูมิขึ้นสูงถึงจุดเดือด ให้กวนปูนอยู่เรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะหยุดเมื่อปฏิกิริยาหยุดและนำในบ่อหมักแห้งจน

ได้ปูนขาวเหนียว นำปูนขาวเหนียวขึ้นจากบ่อหมัก ล้างน้ำ ร้อนผ่านตะแกรงขนาดตา 5 มิลลิเมตร เก็บปูนขาวเหนียว นี้ไว้ได้น้ำ 60 วันขึ้นไป

3) การผสมปูนกับทราย น้ำปูนหมักผสมกับทราย และปูนซีเมนต์ขาวโดยปริมาตรดังนี้ปูนซีเมนต์ขาว 1 ส่วน, ปูนหมักร้อนแล้ว 2 ส่วน, ทรายหยาบ 9 ส่วน ผสมน้ำพอให้ ปูนทรายเข้ากันดี จึงนำไปใช้ก่ออิฐ

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

วัสดุคอมโพสิต (composite material) เป็นวัสดุที่ประกอบกันมากกว่า 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 และโครงสร้างต่างๆ

2.5 พฤติกรรมของผนังอิฐก่อ (Masonry Wall) รับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา

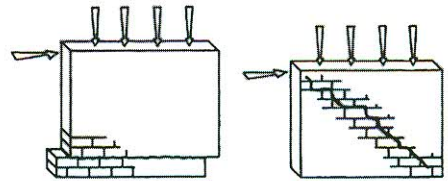
Miha Tomazevic (2008) เมื่อผนังอิฐก่อถูกแรงกระทำรวมกันทั้งทางด้านแนวตั้ง และแนวราบพฤติกรรมของผนังอิฐก่อนั้น จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของผนัง (height/length ratio), คุณสมบัติ และกำลังของอิฐก่อ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress) ในผนังอิฐก่อ กับน้ำหนักที่กระทำและกำลังอัดของอิฐก่อ เช่นเดียวกับผนังอิฐก่อเมื่อรับแรงด้านข้างพฤติกรรมของผนังอิฐก่อจะขึ้นอยู่กับทิศทางและขนาดของแรงกระทำด้วยเช่นกันเมื่อพิจารณาผนังอิฐก่อรับ

แรงกระทำทางด้านข้างและตัวแปรต่างๆ ดังกล่าวที่มีผลต่อพฤติกรรมของผนังอิฐก่อแล้ว อาจจะทำให้ผนังอิฐก่อวิบัติจนไม่สามารถต้านแรงกระทำได้ใน 2 กรณี ด้วยกันคือ

1) Shear Sliding failure จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดดันอัดในแนวตั้ง (Vertical compressive stresses) เกิดขึ้นในผนังมีขนาดต่ำและมอร์ต้าที่ใช้ในการก่ออิฐไม่มีคุณภาพ ดังรูปที่ 1 ลักษณะการวิบัติเช่นนี้ นานๆ ครั้งจึงจะเกิดขึ้น ซึ่งจะพบบ่อยในส่วนล่างของผนัง

2) Diagonal tension shear failure จะเกิดรอยแตกบนผนังอิฐก่อจากด้านล่างของผนังขึ้นไปทางด้านบนผนังในแนวทแยง ดังรูปที่ 1 ลักษณะการวิบัติเช่นนี้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของอิฐก่อ และมอร์ต้าร์ ลักษณะรอยแตกในแนวทแยงนี้อาจแบ่งได้อีกคือ

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



Shear Sliding failure Diagonal tension shear failure

รูปที่ 2 การวิบัติของผนังอิฐก่อเมื่อรับแรงกระทำแนวตั้งและแนวราบ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

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 แนวกากบาท 1 ด้าน
AMW05_FRP.E	เสริมด้วย FRP ร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิวผนัง เป็นแถบตารางแนวตั้งและแนวนอน 1 ด้าน

3.2 การเตรียมผนังอิฐก่อโบราณทดสอบ

ขนาดของผนังอิฐก่อทดสอบในอัตราส่วนความสูงต่อความยาว (height to length) 1 : 1 จะทำให้ลักษณะพฤติกรรมแรงเฉือนในผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา มีความชัดเจนโดยมีรายละเอียดในการเตรียมผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ดังนี้

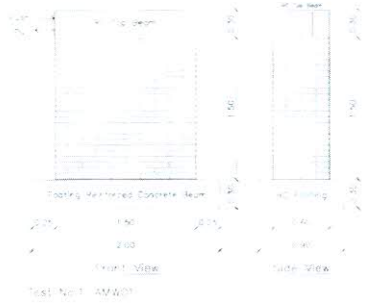
- 1) ก่อผนังอิฐโบราณตัวอย่างแต่ละผนัง ขนาด 1.50x1.50x0.60 ม. ดังแสดงในรูปที่ 3
- 2) ผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ก่ออยู่บนฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.90x2.00x0.30 ม. ที่ยึดแน่นด้วยเหล็กเส้นตีเกลียว และขันแน่นด้วย Bolt โดยการเจาะฝังด้วย Chemical Bolt ลงในพื้นที่ห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 7
- 3) เตรียมปูนก่อโบราณ สมชาติ (2540) [2] โดยนำปูนขาวที่หมักในน้ำแล้ว 60 วันขึ้นไป จากแหล่งผลิตบ้านลุมพินี มาผสมกับปูนซีเมนต์ขาวและทราย อัตราส่วน 2 : 1 : 9 ผลการทดสอบมีกำลังอัดประลัย 64.80 กก./ซม.² และค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่น 14,530 กก./ซม.²

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

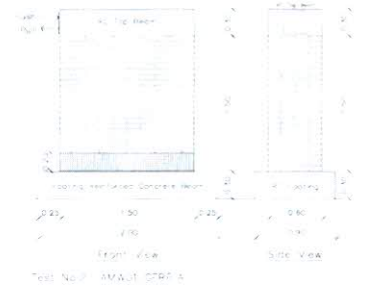
5) ด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบมีคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.60x0.30x1.50 ม.

6) ยึดฐานไฮดรอลิกส์แจ็ก (Hydraulic jack) บนโครงเหล็กทดสอบ (Load Frame) และยึดต่อกับโหลดเซลล์ (Load Cell) เพื่อเป็นแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Lateral Loading) และยึดโหลดเซลล์ (Load Cell) ดังกล่าวเข้ากับตัวผนังอิฐก่อทดสอบด้วยเหล็กแผ่นประกบเข้ากับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมี Bolt ที่ฝังไว้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นตัวถ่ายแรงดังแสดงในรูปที่ 7

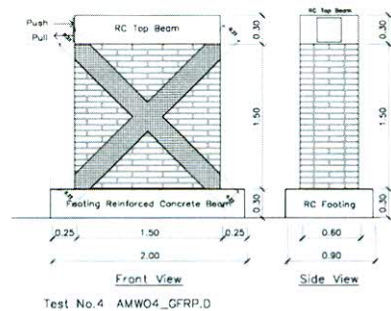
9) ติดตั้ง Electric Strain Gages และ LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 7



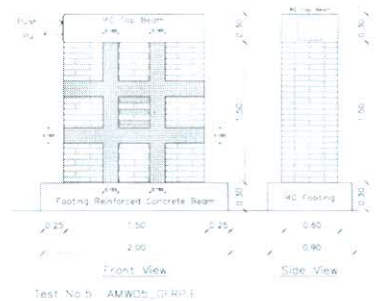
รูปที่ 3 ผนังตัวอย่าง AMW01



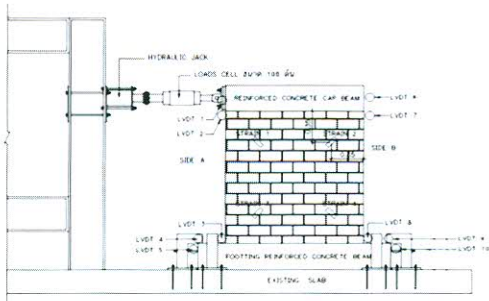
รูปที่ 4 ผนังตัวอย่าง AMW01_FRP.A



รูปที่ 5 ผนังตัวอย่าง AMW04_GFRP.D



รูปที่ 6 ผนังตัวอย่าง AMW05_GFRP.E



รูปที่ 7 ผนังอิฐก่อโบราณสำหรับการทดสอบ Test setup

10) ติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ (FRP) ชนิดเส้นใยแก้ว Glass Fiber (GFRP) แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) บนผนังอิฐก่อโบราณดังรูปที่ 4,5 และ 6 โดยขัดผิวผนังอิฐก่อโบราณตำแหน่งที่จะติดตั้ง FRP ให้เรียบ เช็ดทำความสะอาดผิวด้วยผ้าแห้ง ดังรูปที่ 8 ทารชินเทียวแรก บนพื้นผิวผนังที่ขัดเรียบ ทิ้งไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 สัปดาห์ ทารชินรอบที่สอง ปล่อยให้แห้ง 5 นาที แล้วติดตั้งแผ่น FRP ทารชินทับหน้า ดังรูปที่ 9 ทิ้งไว้ให้แห้ง อย่างน้อย 1 สัปดาห์ จึงสามารถทำการทดสอบได้



รูปที่ 8 ขัดพื้นผิวผนังอิฐก่อตัวอย่างเพื่อติด FRP



รูปที่ 9 การติดตั้งแผ่น FRP

3.3. การดำเนินการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณ

การดำเนินการทดสอบ โดยให้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Lateral Loading) กับผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ทดสอบในอาคารปฏิบัติการของศูนย์อุตสาหกรรมอิตาเลียนไทยอำเภอวิหารแดงจังหวัดสระบุรี มีรายละเอียดดังนี้ [4]

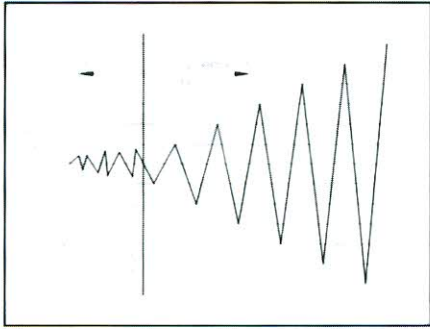
1) การให้แรงกระทำ (load) ในช่วงเริ่มต้น จะใช้วิธีการควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) โดยการให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 kN ครั้งละครั้งรอบจนครบหนึ่งรอบ (ดัน-ดึง) ของรอบการทดสอบที่ 1 และในรอบการทดสอบที่ 2 เพิ่มแรงเป็น 4 kN ต่อครั้งๆ ละครั้งรอบจนครบ 1 รอบ (ดัน-ดึง) ทำเช่นเดียวกันนี้ในรอบการทดสอบต่อไป (ดัน-ดึง) จนผนังอิฐก่อทดสอบเกิดรอยแตกร้าว (First Cracking) ดังแสดงในรูปที่ 10

2) หลังจากผนังอิฐก่อตัวอย่างเกิดรอยแตกร้าว (First Cracking) ให้เปลี่ยนการให้แรงกระทำ (load) เป็นการควบคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ก ครั้งละ 1 มม. ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยทุกๆ ครั้งรอบ (ดัน หรือดึง) ให้หยุดเพื่อทำการตรวจความเสียหายของผนังอิฐก่อทดสอบ และในกรณีของการเสริมเส้นใยไฟเบอร์ (FRP) ก็ให้ตรวจความเสียหาย (debonding) ของเส้นใย (fibersheet) ด้วยทำเช่นเดียวกันนี้ทุกๆ ระยะการเคลื่อนที่จนกว่าผนังจะเกิดการวิบัติและไม่สามารถรับแรงต่อไปได้อีก

3) การวัดระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Controlled) ของไฮดรอลิกส์แจ็ก จะควบคุมผ่าน LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) ที่ตำแหน่งคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้านบนของผนังอิฐก่อทดสอบ

4) หลังจากผนังอิฐก่อตัวอย่าง เกิดรอยแตกร้าว (First Cracking) ด้วยการวิธควบคุมด้วยแรง (Force Controlled) ทำการวัดค่าระยะการเคลื่อนที่ไว้ด้วย ซึ่งจะเป็นระยะการเคลื่อนที่เริ่มต้นหลังจากผนังอิฐก่อเริ่มแตกร้าว (First Crack Displacement)

5) การยึดหดตัวของผนังอิฐก่อทดสอบ 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 และผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้ต่อไปได้อีก เกิดการวิบัติของผนัง โดยผนังจะเกิดการแตกร้าวจากกริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง บริเวณด้านล่างทั้ง 2 ด้านตามทิศทางของแรงที่กระทำ (Shear Sliding failure) ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 รอยแตกร้าวของผนัง AMW01

4.2 ผนังอิฐก่อโบราณทดสอบ AMW01_FRP.A

การควบคุมด้วยแรงผนังมี 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 และผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้ต่อไปได้อีก เกิดการวิบัติ

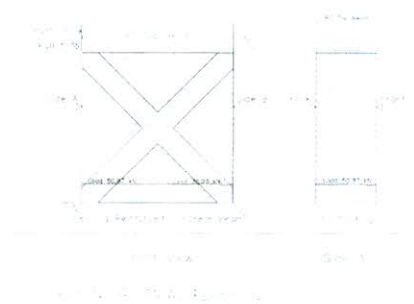
ของผนัง โดยผนังจะเกิดการแตกร้าวจากกริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง บริเวณด้านล่างทั้ง 2 ด้านตามทิศทางของแรงที่กระทำ (Shear Sliding failure) ดังรูปที่ 12



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 kNและผนังไม่สามารถรับแรงกระทำได้ต่อไปได้อีก เกิดการวิบัติของผนัง โดยผนังจะเกิดการแตกร้าวจากกริมผนังด้านนอกเข้าสู่ภายในผนัง บริเวณด้านล่างทั้ง 2 ด้านตามทิศทางของแรงที่กระทำ (Shear Sliding failure) ดังรูปที่ 13

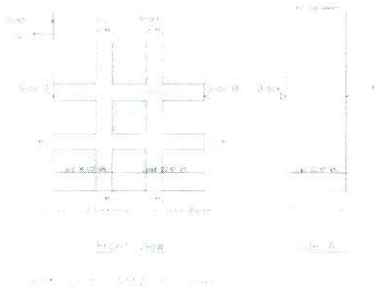


รูปที่ 13 รอยแตกร้าวของผนัง AMW04_FRP.D

4.4 ผนังอิฐก่อโบราณทดสอบ AMW05_FRP.E

การควบคุมด้วยแรงผนังมี First Crack ที่แรงกระทำ 18.00 kN, Displacement 0.83 มม., ความคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่ Displacement 1.09 มม.ได้แรงกระทำสูงสุด 22.61

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



รูปที่ 14 รอยแตกร้าวของผนัง AMW05_FRP.E

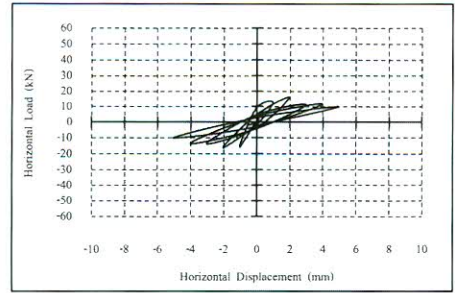
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของผนังอิฐก่อโบราณกับการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา

จากการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 4 ตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบแต่ละตัวอย่าง ดังนี้

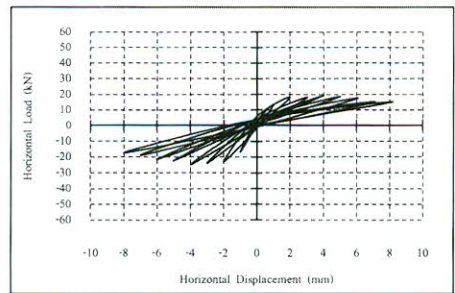
1) ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW01 ผลการทดสอบสามารถรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา Load Max 16.00 kN, Displacement 2.05 มม. จากรูปที่ 15 พบว่าเส้นวงรอบมีลักษณะแคบและสั้น จำนวนเส้นวงรอบน้อย ซึ่งทำให้ทราบว่าผนังอิฐก่อสามารถรับแรงกระทำได้น้อยและผนังสามารถเคลื่อนที่ได้น้อย

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

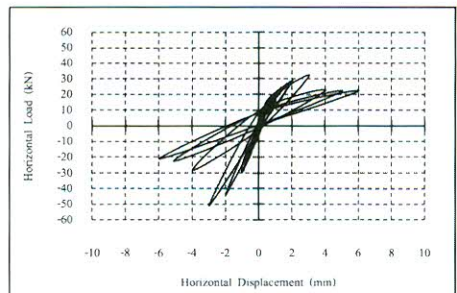
3) ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW04_FRP.D ผลการทดสอบสามารถรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา Load Max 50.87 kN, Displacement 3.97 มม. จากรูป



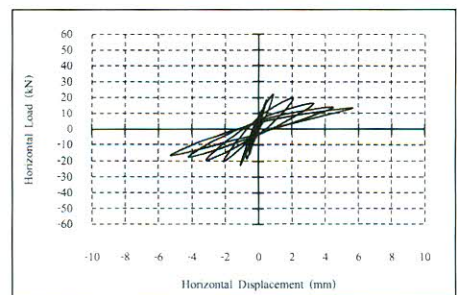
รูปที่ 15 Hysteric Curve of AMW 01



รูปที่ 16 Hysteric Curve of AMW01_FRP.A



รูปที่ 17 Hysteric Curve of AMW04_FRP.D



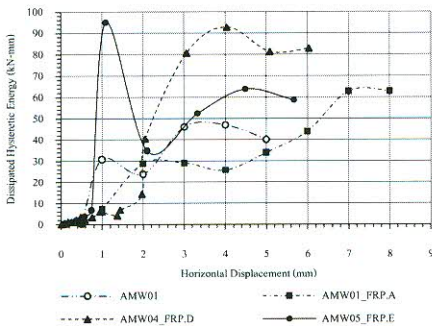
รูปที่ 18 Hysteric Curve of AMW05_FRP.E

ที่ 17 พบว่าเส้นวงรอบมีลักษณะแคบและยาว จำนวนเส้นวงรอบมากขึ้น ซึ่งทำให้ทราบว่าผนังอิฐก่อสามารถรับแรงกระทำและเคลื่อนที่ได้เพิ่มขึ้น ประมาณ 4 เท่า ของผนังอิฐก่อ AMW01 เนื่องจากการเสริมกำลังในตำแหน่งที่รับแรงหรือโมเมนต์สูงสุด

4) ผนังตัวอย่างทดสอบ AMW05_FRP.E ผลการทดสอบสามารถรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา Load Max 22.61 kN, Displacement 1.09 มม. จากรูปที่ 18 พบว่าเส้นวงรอบมีลักษณะแคบและสั้น จำนวนเส้นวงรอบน้อยซึ่งทำให้ทราบว่าผนังอิฐก่อสามารถรับแรงกระทำและเคลื่อนที่ได้น้อยกว่าการเสริมกำลังด้วยFRPในรูปแบบอื่น

4.6 การกระจายพลังงาน (Energy Dissipation)

การเปรียบเทียบผลการกระจายพลังงานดังรูปที่ 19 ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างทดสอบพบว่าผนังอิฐก่อโบราณที่เสริม FRP ร้อยละ 40 ในแนวกากบาทหนึ่งด้าน มีการกระจายพลังงานได้ดีที่สุด เนื่องจากการเสริม FRP อยู่ในตำแหน่งการเกิดโมเมนต์ที่ฐานด้านล่างของผนังอิฐก่อทดสอบ การวิบัติเนื่องจากโมเมนต์จะเกิดเป็นแรงดึง ดังนั้นการเสริม FRP ดังกล่าวซึ่งอยู่ในตำแหน่งรับแรงดึง จึงสามารถช่วยในการกระจายพลังงานได้ดีกว่าการเสริมFRPในรูปแบบอื่นๆ



รูปที่ 19 Dissipated Hysteretic Energy

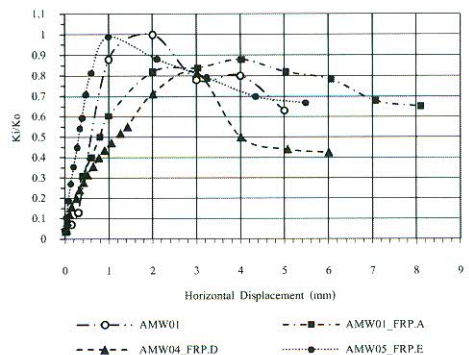
4.7 ความสามารถในการเสียรูป (Ductility)

ความสามารถในการเสียรูป (Ductility) ผลที่ได้คือความสามารถในการเสียรูปจากการรับแรงกระทำแบบ

ซ้ำไปซ้ำมา 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 และAMW05_FRP.E 3.78

4.8 ค่า Stiffness

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



รูปที่ 20 Stiffness ของผนังอิฐก่อโบราณทดสอบ

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบการรับแรงกระทำด้านข้างแบบเข้าไปข้างหน้า ของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่าง ซึ่งมีลักษณะและรูปแบบการเสริมแรง หรือซ่อมแซมแตกต่างกัน ทั้ง 4 ตัวอย่างดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น พบว่า พฤติกรรมของผนังอิฐก่อโบราณตัวอย่างจะวิบัติในลักษณะเป็นแรงเฉือนแตก ร้าวตลอดแนวปูนก่อ จนกระทั่งปูนก่อขาดออกจากกัน (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 ซึ่งมากกว่ารูปแบบอื่นๆเนื่องจากการเสริมกำลังในตำแหน่งที่รับแรงกระทำหรือโมเมนต์สูงสุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุขชาย พานสุวรรณ, การวิเคราะห์โบราณสถานก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543.
- [2] สมชาติ จิงสิริอารักษ์, 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] ชรรษชาติ กุลประภา, "การใช้พลาสติกเสริมเส้นใยแบบต่อเนื่อง (FRP)", การอบรมของสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, รุ่นที่ 2, 29 กรกฎาคม 2552, ห้องประชุม 3 ชั้น 3 อาคารวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2552. หน้า 12-26
- [6] ชชาติชาย ร่มศักดิ์, การศึกษาวิวัฒนาการองค์ประกอบและการใช้ประโยชน์ของดินเพื่อการตั้งถิ่นฐานในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา, สำนักงานโบราณคดีและพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติที่ 3, พระนครศรีอยุธยา, 2539. หน้า 1-210