หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง

4.1 ขอบเขตของการวิเคราะห์

การวิเคราะห์โครงสร้างของมณฑปอิฐก่อในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย ใช้วิธีการไฟไนท์ เอลลิเมนต์ ในระบบสามมิติ (Three-dimentional finite element method) ทั้งนี้ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาสภาพการกระจายของหน่วยแรง และการพิจารณาการทรุดตัวของโครงสร้าง โดยพิจารณากรณีต่าง ๆ ดังนี้

1. โครงสร้างภายใต้น้ำหนักตัวเอง
2. โครงสร้างภายใต้น้ำหนักเยื้องศูนย์ เนื่องจากน้ำซึมขังในโครงสร้าง
3. อุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวรอบนอกกับภายในโครงสร้าง
4. การทรุดตัวของดินฐานราก
5. การทรุดตัวของวัสดุก่อสร้าง

4.2 วิธีดำเนินการวิเคราะห์

4.2.1 การเตรียมข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ ผู้วิจัยได้ใช้แบบแปลนโครงสร้างของมณฑปที่วัดต่าง ๆ ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย ซึ่งกรมศิลปากรได้สำรวจและจัดทำขึ้น มาศึกษาเปรียบเทียบ จากการเปรียบเทียบรูปร่างและขนาดของมณฑปต่าง ๆ เช่น ที่วัดศรีชุม วัดตระพังทองหลาง วัดตึก เป็นต้น พบว่า รูปทรงของมณฑปมีลักษณะเหมือนกัน กล่าวคือ มีผังเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผนังก่อปิดทึบ มีทางเข้าเพียงทางเดียว มุมผนังมักมีการย่อมุม และจากการศึกษาด้านขนาดและสัดส่วนต่าง ๆ พบว่า มณฑปวัดศรีชุม มีเสถียรภาพทางโครงสร้างต่ำที่สุด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกรูปแบบของมณฑปวัดศรีชุมมาศึกษา โดยจำลองแบบแปลน โครงสร้างเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ โดยแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อย ๆ เรียกว่า ไฟไนท์เอลลิเมนท์ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.2 ก และ 4.2 ข

ส่วนคุณสมบัติทางกลของไฟไนท์เอลลิเมนท์เหล่านี้ ได้จากการทดสอบพฤติกรรมของวัสดุอิฐก่อที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งกระทำในห้องปฏิบัติการแล้วนำมาสรุปเป็นค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.9

4.2.2 การเลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลลิเมนท์ ผู้วิจัยใช้โปรแกรมที่พัฒนามาจากโปรแกรม SAP IV ซึ่งสามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่มีไฟไนท์เอลลิเมนท์ 2 ชนิดร่วมกัน ได้แก่ เอลลิเมนท์ชนิดโครงถัก (Truss Element) และเอลลิเมนท์ชนิดมวลต่อเนื่อง 3 มิติ (Solid 3-D Element) ที่เรียกว่า บริก 8 (Brick 8)

4.2.3 การใช้ไฟไนท์ เอลลิเมนท์ แทนโครงสร้างของทั้งสองประเภท ทำให้สามารถศึกษาพฤติกรรมร่วมระหว่างโครงสร้างและฐานรากได้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้จัดทำขึ้นเป็นภาษา FORTRAN 77 เพื่อใช้กับเครื่องคำนวณ PRIME 9750 CPU ขนาด 4 MB ของศูนย์คอมพิวเตอร์วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้เวลาในการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ (CPU Time) ประมาณ 20 นาที ต่อหนึ่งตัวอย่าง

4.2.4 การวิเคราะห์โครงสร้าง กระทำเพื่อศึกษาสภาพการกระจายของหน่วยแรงและการทรุดตัวของโครงสร้าง ในกรณีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ก. โครงสร้างภายใต้น้ำหนักตัวเอง ในกรณีที่โครงสร้างมีสมมาตร ทำให้ลดจำนวนไฟไนท์ เอลลิเมนท์ ที่ใช้ลง

ข. โครงสร้างภายใต้น้ำหนักเยื้องศูนย์ ในการศึกษาครั้งนี้มีสมมติฐานเบื้องต้นว่า หากผิวปูนที่ใช้ฉาบเกิดการหลุดล่อนไป ทำให้น้ำฝนซึมเข้าไปภายใน และขังอยู่ภายในโครงสร้างเป็นบางส่วน เกิดเป็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักตัวเองในส่วนนั้น ที่สำคัญเป็นน้ำหนักส่วนที่ทำให้เกิดการเยื้องศูนย์จากศูนย์ถ่วงของโครงสร้าง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้โครงสร้างซึ่งแม้ว่าจะมีความสามารถในตัวเองก็ตาม เกิดการบิดเบี้ยว เสียรูปทรง และทำให้เกิดการพังทลายได้ในที่สุด

ในระหว่างการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้สมมุติให้ผนังของมณฑปครึ่งซีก มีน้ำฝนซึมขังอยู่ในอิฐ

ค. อุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวรอบนอก กับภายในโครงสร้าง เมื่อแสงแดดทำให้อุณหภูมิของพื้นผิวรอบนอกสูงขึ้น ก็จะเกิดการยืดตัวออก ในขณะที่ส่วนลึกเข้าไป เช่น ที่ส่วนในและฐานราก ยังไม่ร้อนพอทำให้เกิดการขยายตัวที่สัมพันธ์กัน ทำให้มีแรงภายในเกิดขึ้น อันอาจเป็นเหตุให้โครงสร้างของโบราณสถาน เสียหายได้

ในระหว่างการทดลอง ผู้วิจัยได้กำหนดให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

ง. การทรุดตัวของดินที่เป็นฐานราก แม้ดินบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย ผิวดินชั้นบนเป็นดินแข็ง มีกำลังรับน้ำหนักสูง อัตราการทรุดตัวน้อย แต่ก็คงมีเลน (Silt) ปะปนอยู่บ้าง ซึ่งเมื่อฝนตก มีน้ำขัง จะทำให้เกิดอ่อนตัวลง นอกจากนี้ บริเวณรอบฐานโครงสร้างถูกน้ำฝนชะให้หลุดหายไปได้ ดังนั้น ถ้าหากว่าตั้งสมมุติฐานไว้ว่า ดินขอบใต้ฐานโครงสร้างทั้งหมดทรุดตัวลงเล็กน้อย จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพการกระจายของหน่วยแรงในโครงสร้างชั้นบน อันอาจเป็นสาเหตุให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้

จ. การทรุดตัวของวัสดุอิฐก่อ กรณีที่อิฐก่อส่วนใดส่วนหนึ่งเกิดการผุกร่อนและยุบตัวลง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพการกระจายของหน่วยแรงในโครงสร้างส่วนอื่นได้ ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกให้เกิดการทรุดตัวบริเวณกึ่งกลางกำแพงด้านหลัง และที่ใกล้ประตู กับการทรุดตัวที่ขอบของฐานรากพร้อมกัน

4.3 ผลการวิเคราะห์

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างของมณฑปอิฐก่อวัดศรีชุม เปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักของอิฐก่อได้ผลดังต่อไปนี้

4.3.1 กรณีโครงสร้างภายใต้น้ำหนักตัวเอง ได้แสดงผลการเปลี่ยนรูปทรงของโครงสร้าง ในรูปที่ 4.3 ก 1 ถึง 4.3 ก 4 และผลการทรุดตัวของดินฐานราก และการกระจายของหน่วยแรงภายในไว้ในรูปที่ 4.4 ก 1 ถึง 4.4 ก 6 พอสรุปผลได้ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของมณฑป พบว่า ผนังมณฑปเกิดการเอียงในลักษณะยุบเข้า ตำแหน่งที่ยุบเข้ามากที่สุดอยู่ในส่วนของผนังที่สูงจากฐานชั้นที่ 3 เล็กน้อย การโก่งตัวในลักษณะนี้เป็นผลเนื่องมาจากส่วนฐานที่ไม่สมมาตร ผลของการยุบตัวและเอียงของผนังมณฑปมีผลทำให้เกิดหน่วยแรงอัดที่ผนังด้านนอกมากกว่าผนังด้านใน

ผนังมณฑปด้านหน้า ส่วนที่เป็นประตูทางเข้า ผนังมณฑปจะเอียงเข้าหาประตูมากกว่าบริเวณอื่น

หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นที่ชั้นฐานของมณฑปบริเวณที่มีการย่อมุมหน่วยแรงอัดสูงสุดมีค่า 4 กก./ซม.^{2} อีกบริเวณหนึ่งที่มีหน่วยแรงอัดสูง อยู่ในส่วนของผนังด้านนอกใกล้กับฐานชั้นที่ 3 มีค่า 3 กก./ซม.^{2}

I 17372158X

หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นที่ฐานชั้นที่ 3 ตำแหน่งใกล้ประตู มีค่า 0.7 กก./ซม.^{2} และบริเวณฐานด้านในของผนัง มีค่าหน่วยแรงเฉือน 0.6 กก./ซม.^{2}

การทรุดตัวที่ฐานรากเกิดขึ้นมากที่สุดบริเวณใกล้ประตู และบริเวณใกล้กับกึ่งกลางของผนังมณฑป การทรุดตัวสูงสุดมีค่า 2.2 มม. และ 1.9 มม. ตามลำดับ ซึ่งผลต่างของการทรุดตัวของดินฐานรากที่กึ่งกลางผนังกับที่มุม มีค่าประมาณ 0.5 มม.

จะเห็นได้ว่ารูปแบบทางโครงสร้างของมณฑป มีเสถียรภาพที่ไม่ดี มีโอกาสที่เกิดการเอียงของผนัง ทำให้เกิดการแตกร้าวและพังทลายลงได้ ถึงแม้หน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือนที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าต่ำกว่ากำลังรับน้ำหนักของอิฐก่อที่ได้จากการทดลองอยู่มากก็ตาม

4.3.2 กรณีของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักตัวเอง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ผิวมณฑป 10°c ได้แสดงผลการวิเคราะห์ไว้ในรูปที่ 4.3 ข 1 ถึง 4.3 ข 4 และรูปที่ 4.4 ข 1 ถึง 4.4 ข 6 สรุปผลได้ดังนี้

การเปลี่ยนรูปทรงของมณฑป เนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอิฐก่อมีค่า 7.02×10^{-6} ซม./°c ซึ่งมีค่าน้อย อุณหภูมิที่ต่างกัน 10°c การขยายตัวของอิฐก่อที่เกิดขึ้นจึงไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปทรงของโครงสร้าง

หน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือน ที่เกิดขึ้น มีค่าไม่แตกต่างจากกรณีของน้ำหนักตัวเอง

สรุปได้ว่า กรณีที่อุณหภูมิที่ผิวนอกของมณฑปเพิ่มขึ้น 10°c จะไม่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนรูปทรง และหน่วยแรงภายในของโครงสร้าง

4.3.3 กรณีของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักเยื้องศูนย์อันเนื่องมาจากน้ำฝนซึมขังอยู่ในอิฐ ได้แสดงผลการวิเคราะห์ไว้ในรูปที่ 4.3 ค. 1 ถึง 4.3 ค 4 และ 4.4 ค 1 ถึง 4.4 ค 6 ซึ่งผลการวิจัยนี้ไม่ได้คิดผลของการบวมของอิฐ (Swelling) เนื่องจากความชื้น สรุปผลได้ดังนี้

การเปลี่ยนรูปทรง น้ำหนักน้ำที่เพิ่มขึ้นด้านนอกจะเพิ่มการเยื้องศูนย์มากยิ่งขึ้น การยุบเอียงของผนังมณฑปจึงมีมากขึ้น นอกจากนั้นการเอียงตัวของผนังมณฑปบริเวณประตูก็มากขึ้นด้วย

หน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือนสูงสุด เกิดบริเวณตำแหน่งเดียวกันกับกรณีโครงสร้างภายใต้น้ำหนักตัวเอง มีค่า 5 กก./ซม.^{2} และ 0.8 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ

การทรุดตัวของฐานราก มีค่าเพิ่มขึ้น โดยการทรุดตัวสูงสุดเกิดตำแหน่งใกล้ประตู มีค่า 2.4 มม.

สรุปได้ว่า กรณีที่มีน้ำซึมขังในผนัง จะมีผลกระทบต่อโครงสร้างในทางที่เลวลง ทำให้โครงสร้างเสียเสถียรภาพมากขึ้น และหน่วยแรงภายในมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4.3.4 กรณีของการทรุดตัวที่ขอบฐานราก 1 มม. อันเนื่องมาจากการกัดเซาะของน้ำ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.3 ง 1 ถึง 4.3 ง 4 และ 4.4 ง 1 ถึง 4.4 ง 6 พอสรุปผลได้ดังนี้

การเปลี่ยนรูปทรง เนื่องจากบริเวณขอบฐานรากมีการทรุดตัวน้อยกว่าภายในประมาณ 1.5 มม. ดังนั้นเมื่อขอบฐานรากทรุดตัวลง 1 มม. ทำให้การทรุดตัวของโครงสร้างดีขึ้น กล่าวคือ เกิดลักษณะการทรุดตัวที่เท่ากัน ทำให้ไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้าง

หน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือน มีค่าเหมือนกับกรณีน้ำหนักตัวเอง

สรุปได้ว่ากรณีที่เกิดการทรุดตัวที่ขอบของฐานราก 1 มม. จะเป็นผลดีต่อโครงสร้างส่วนบน แต่ถ้าการทรุดตัวเกิดขึ้นมากกว่านี้ จะเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นที่ฐานชั้นล่าง จะเกิดรอยแตกร้าวขึ้นที่ฐาน ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อโครงสร้างส่วนบนภายหลัง

4.3.5 กรณีของการทรุดตัวเนื่องจากการผุกร่อนของวัสดุ ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นกับส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงสร้างก็ได้ ผู้วิจัยได้เลือกให้เกิดการทรุดตัวที่ส่วนของฐานใกล้ประตู และด้านหลังบริเวณกึ่งกลางมณฑป 1 มม. ผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 จ 1 ถึง 4.3 จ 4 และ 4.4 จ 1 ถึง 4.4 จ 6 พอสรุปผลได้ดังนี้

การเปลี่ยนรูปทรงของผนังมณฑปด้านมีประตู จะเกิดการเอียงเข้าหาประตูเห็นได้ชัด

การทรุดตัวสูงสุดเกิดบริเวณประตู มีค่า 2.75 มม. เมื่อเทียบกับบริเวณใกล้เคียง พบว่า ในระยะทางประมาณ 3 เมตร การทรุดตัวของผนังจะต่างกันมากถึง 1 มม. ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการแตกร้าวของผนังในแนวดิ่งได้

หน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นไม่ต่างจากกรณีน้ำหนักตัวเอง

สรุปได้ว่า การผุกร่อนของเนื้อวัสดุก็เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการเสียเสถียรภาพของโครงสร้างได้ โดยทำให้เกิดการแตกร้าวอันเนื่องมาจากการทรุดตัวที่ต่างกันของผนังมณฑป