การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของกำแพงที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ
วิชา โครงงานทางวิศวกรรมโยธา
A study on behavior of 3D printing wall subjected to axial loading
for Submission to the Civil Engineering Project

สุธี ขยัน ติชอ อุไร และ รศ.ดร.วิทิต ปานสุข

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของกำแพงที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ การเก็บข้อมูลการศึกษาจะเก็บจากโครงสร้างกำแพงที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ จำนวน 1 ชิ้นงาน ที่มีความกว้าง 12 เซนติเมตร ความยาว 132 เซนติเมตร และความสูง 77 เซนติเมตร โดยมีคานที่ด้านบนและด้านล่างของตัวกำแพงเพื่อใช้เป็นตัวค้ำยันกำแพง ซึ่งมีความกว้าง 20 เซนติเมตร ความยาว 140 เซนติเมตร และความสูง 20 เซนติเมตร เมื่อเพิ่มแรงกระทำในแนวแกนให้กับกำแพง จะสังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่เกิดบนเนื้อคอนกรีต โดยรอยแตกร้าวรอยแรกที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดในแนวแกนเท่ากับ 25 ตัน และมีจำนวนมากขึ้นเมื่อมีแรงกดในแนวแกนสูงขึ้น นำมาซึ่งการสร้างแบบจำลองโครงสร้างของกำแพงขึ้นมาและศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของแบบจำลองโครงสร้างโดยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะทำการเก็บค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองโครงสร้าง เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการทดสอบจริง โดยตำแหน่งที่เก็บข้อมูลค่าความเครียดจากการทดสอบจริงและการเก็บข้อมูลค่าความเครียดจากแบบจำลองโครงสร้างจะต้องเป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันหรือเป็นตำแหน่งเดียวกัน เมื่อนำผลข้อมูลค่าความเครียดที่ได้จากแบบจำลองโครงสร้างมาเทียบกับผลค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลจากการทดสอบจริง พบว่าค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อมีแรงกดในแนวแกนที่กระทำต่อโครงสร้างเท่ากัน อนุมานได้ว่าแบบจำลองโครงสร้างมีความถูกต้องตามแบบโครงสร้างจริง และสามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมาวิเคราะห์พฤติกรรมต่อไปได้

Abstract

The objective of this research is to study the axial load behavior of walls constructed by 3 D printing method. Data collection is collected from a wall structure constructed by 3D printing method with a width of 12 centimeters, 132 centimeters in length and 77 centimeters in height, with beams at the top and bottom of the wall to be used as a wall support Which has a width of 20 centimeters, a length of 140 centimeters and a height of 20 centimeters. When adding axial force to the wall will notice cracks that occur on the concrete. The first crack occurred when the axial force was equal to 2 5 tons and increased when the axial pressure was higher. Bring the structural model of the wall and study the axial load behavior of the structural model by analyzing the finite element method. Which will collect the strain occurring in the structural model. In order to compare with the stress values collected from the actual test where the stress data collected from the actual test and the stress data from the structural models must be in the same position or in the same position. When the strain data obtained from the structural model is compared with the strain data collected from the actual test, it is found that the values are similar when the axial forces acting on the structure are equal. It can be concluded that the structural model is accurate according to the actual structure model. And can use structural models to analyze behavior.

1. คำนำ

ในอดีตที่ผ่านมาอุตสาหกรรมการก่อสร้างด้วยคอนกรีต มีพัฒนาการมาโดยตลอด เริ่มจาก เครื่องโม่ ตลอดจนคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete) ซึ่งในปัจจุบัน ได้มีการคิดค้นนวัตกรรมและพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นมาใหม่ในทุก ๆ วันเพื่ออำนวยความสะดวกในการทำงานด้านการก่อสร้าง อาทิ เครื่องพิมพ์คอนกรีตสามมิติ (3D Printing) โดยที่ผ่านมามีผลการทดลองและงานวิจัยทางทฤษฎีมากมายที่เกี่ยวข้องกับการพิมพ์สามมิติที่ใช้วัสดุขนาดเล็กและวัสดุพลาสติกโพลิเมอร์(Polymer) แต่สำหรับงานโยธานั้นยังคงเป็นเรื่องใหม่และงานวิจัยหรือทฤษฎีที่รองรับนั้นยังคงไม่เป็นมาตรฐานสำหรับการพิมพ์โครงสร้างด้วยวัสดุคอนกรีต ดังนั้นจึงนำมาซึ่งการศึกษานี้

ปัจจุบันการออกแบบทางด้านสถาปัตยกรรมมีความก้าวหน้ามากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากเทคโนโลยีและนวัตกรรมที่พัฒนาอย่างก้าวกระโดด ส่งผลให้การออกแบบอาคารมีรูปร่างที่เป็นอิสระ (Free form) และมีความแปลกใหม่มากยิ่งขึ้น สำหรับแรงงานคนที่มีอยู่ในงานก่อสร้างปัจจุบันก็กำลังจะถูกแทนที่ด้วยเครื่องจักร ข้อดีของโครงสร้างคอนกรีตที่สร้างได้จากเครื่องพิมพ์สามมิติจะมีความหลากหลายในการออกแบบเชิงสถาปัตยกรรม อีกทั้งสามารถสร้างโครงสร้างที่มีความซับซ้อนได้ง่าย รวดเร็ว และสามารถช่วยลดจำนวนแรงงานในการก่อสร้าง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์คอนกรีตสามมิติจะมีบทบาทในการทำงานด้านโยธามากยิ่งขึ้น แต่ข้อมูลงานวิจัยสำหรับเครื่องพิมพ์คอนกรีตสามมิตินั้นมีอยู่ไม่มาก ดังนั้นเราจึงต้องทำการศึกษาข้อมูลของโครงสร้างที่สร้างด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติเพื่อที่จะนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ และพัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยีในการทำงานด้านโยธาต่อไป ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของกำแพงที่สร้างด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติ

การทดสอบเพื่อให้ได้ผลวิเคราะห์ของโครงสร้างคอนกรีตที่รับแรงกระทำแบบต่าง ๆ โดยทั่วไปจะเสียค่าใช้จ่ายมากและใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่ยาวนาน ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical analysis) จึงมีความจำเป็นที่จะนำมาใช้เพื่อขยายผลการศึกษาถึงพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตที่มีรูปแบบและลักษณะของแรงกระทำต่าง ๆ กันซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายและเวลาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการทดสอบจริง อย่างไรก็ตามข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดสอบจริงนั้นเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้เนื่องจากเป็นข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขว่าเชื่อถือได้หรือไม่ เมื่อตรวจสอบแล้วพบว่าการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนี้มีความน่าเชื่อถือ จึงจะนำเอาวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขไปปรับใช้ต่อไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (ANSYS) ช่วยในการจำลองชิ้นส่วนกำแพงรับแรงที่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติและทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงในแนวแกน โดยนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงในรูปแบบต่าง ๆ ของกำแพง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงของกำแพงที่สร้างโดยการพิมพ์สามมิติ

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ คือ ระบบการขึ้นรูปโครงสร้างหรือสิ่งก่อสร้างคอนกรีตที่ถูกพัฒนามาจากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ซึ่งจะทำงานโดยสั่งการเครื่องพิมพ์สามมิติผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งโครงสร้างที่ถูกออกแบบและขึ้นรูปสามมิติด้วยชุดโปรแกรม เช่น Autocad, Revit และ BIM เป็นต้น จะถูกนำออกมาแบ่งระนาบการพิมพ์ออกเป็นชั้น ๆ (Layer) หลังจากนั้นจึงจะถูกนำมาขึ้นรูป(Print) จนได้เป็นชิ้นงานสำเร็จเมื่อพิมพ์ครบทุกชั้น โดยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ

2.1 Extrusion Deposition

เป็นวิธีการพิมพ์โดยใช้หัวพิมพ์ฉีดคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นวัสดุครีมเหลวที่สามารถเซ็ตตัวได้ขณะที่พิมพ์ออกมาที่แท่นพิมพ์หรือที่หน้างานจริง การพิมพ์โครงสร้างสามมิติด้วยวิธีนี้อาศัยการซ้อนทับของคอนกรีตทีละชั้นจนรวมกันออกมาเป็นโครงสร้างที่ต้องการ โดยเครื่องพิมพ์สามมิติจะพิมพ์โครงสร้างออกมาตามรูปแบบที่ได้ออกแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งขนาดของโครงสร้างจะสามารถกำหนดได้ตามความต้องการใช้งานของผู้ใช้แล้วทำการออกแบบโดยระบบคอมพิวเตอร์ทั้งหมด ขนาดของเครื่องพิมพ์มีความหลากหลายสามารถพิมพ์ได้ตั้งแต่ชิ้นงานขนาดเล็กไปจนถึงอาคารขนาดใหญ่แต่ลักษณะคุณภาพของพื้นผิวที่พิมพ์ขึ้นรูปจะมีความละเอียดไม่มากนัก โดยพื้นผิวของชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ของคอนกรีตซ้อนทับกัน ดังนั้นวิธีการพิมพ์นี้จึงไม่เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความละเอียด

2.2 คุณสมบัติของคอนกรีตที่นำมาใช้ในการพิมพ์

ความมั่นคงของรูปทรง (Shape stability) ความมั่นคงของรูปทรงเป็นคุณสมบัติหลักที่คอนกรีตจะต้องมีในการที่จะนำมาใช้ในการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งความมั่นคงของรูปทรงคือ ความสามารถในการต้านการเสียรูป (Deformation) ที่จะเกิดขึ้นของชั้นคอนกรีต ซึ่งความเสียรูปที่จะเกิดขึ้นในชั้นคอนกรีตนั้นมาจาก 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้ น้ำหนักของชั้นคอนกรีตนั้น ๆ (self-weight), น้ำหนักของชั้นคอนกรีตถัดไปที่วางกดทับ และแรงดันจากการขึ้นรูปของคอนกรีต (The extrusion pressure), ความแข็งแรงของคอนกรีต (Strength of concrete) ในงานวิจัยฉบับนี้จะมีความแข็งแรงด้านแรงกด (Compressive strength) ประมาณ 50 – 60 MPa, ระยะเวลาการก่อตัว (Setting time) คอนกรีตที่เราใช้ในงานวิจัยฉบับนี้มีระยะเวลาก่อตัวประมาณ 30 – 180 นาที, ความหนาแน่น (Density) ความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้คือ 2,200 kg/m^2

2.3 เกณฑ์ในการทดสอบคอนกรีต

ในการสร้างโรงสร้างโดยวิธีการพิมพ์ 3 มิตินั้นเราจะต้องมีเกณฑ์มาตราฐานในการเลือกส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่จะนำมาใช้ในการพิมพ์ 3 มิติจะต้องผ่านเกณฑ์ ดังนี้

เมื่อทำการฉีดคอนกรีตออกจากหัวเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชั้นคอนกรีต (Layer) ที่พิมพ์ออกมานั้นพื้นผิวจะต้องไม่มีข้อบกพร่องหรือส่วนที่เสียหายจากการพิมพ์ (Defect), ชั้นคอนกรีตที่พิมพ์ออกมาจะต้องมีความต่อเนื่องไม่ขาดตอนเนื่องจากความฝืดเครื่องของเนื้อคอนกรีต, ขอบของชั้นคอนกรีตจะต้องมองเห็นชัดเจนและมีลักษณะเป็นเหลี่ยม และขนาดของชั้นคอนกรีตจะต้องมีความคงที่ตลอดทั้งความยาวชั้น หรือตลอดทั้งชิ้นส่วนของโครงสร้าง

จากเกณฑ์ทั้ง 4 ข้อที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้จะใช้ในการตรวจสอบและเลือกว่าส่วนผสมคอนกรีตแบบใดที่จะเหมาะกับการนำมาใช้ในการทำโครงสร้างด้วยวิธีการพิมพ์แบบ 3 มิติ ซึ่งในการทดสอบเลือกส่วนผสมของคอนกรีตนั้นจะต้องทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้งเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแน่นอน

3. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบด้วยการใส่แรงกระทำในแนวแกนสู่กำแพงที่สร้างขึ้นจากเทคนิคการพิมพ์สามมิติจนกระทั่งเกิดการวิบัติเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของกำแพงของตัวชิ้นงาน และทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เริ่มที่การขึ้นรูปแบบจำลองสามมิติด้วยโปรแกรม Autocad แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS ซึ่งเป็นหนึ่งในโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของกำแพงที่สร้างขึ้นจากเทคนิคการพิมสามมิติเพื่อหาตัวแปรที่มีนัยสำคัญมารองรับผลจากการทดสอบและนำไปประยุต์ใช้ต่อไป

3.1 การทดสอบพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของกำแพงที่สร้างขึ้นจากเทคนิคการพิมสามมิติ

3.1.1 การเตรียมการทดสอบ

ก่อนการทดสอบจริง จำเป็นต้องมีการจัดเตรียมตัวชิ้นงานที่นำมาทอดสอบและติดตั้งอุปกรณ์ โดยอุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งมีดังนี้

เครื่องกดทดสอบ (Amsler's compression testing machine), อุปกรณ์ที่ใช้แปลงค่าของแรงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า (Load Cell), เครื่องวัดความเครียด (Strain gauge), ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (LVDT)

3.1.2 การติดตั้งอุปกรณ์

เริ่มต้นด้วยการติดตั้งเครื่องวัดความเครียด โดยทำการติดตั้งทั้งหมด 9 ชิ้น ในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ซึ่งจะติดตั้งเป็นกลุ่ม กลุ่มละ 2 ชิ้น ในทิศทางแกน y และ แกน z ดังรูปที่ 9 ตำแหน่งของแต่ละกลุ่มที่ทำการติดตั้ง คือ บริเวณปีกซ้าย-ขวา ตามแนวยาวของชิ้นงาน และบริเวณกึ่งกลาง ตามแนวตั้งของชิ้นงาน เพื่อบ่งชี้ว่าค่าที่ได้จากทางปีกซ้าย-ขวา เป็นไปตามแนวโน้มที่ควรจะเป็น สร้างความน่าเชื่อถือ และลดข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้น

เมื่อติดตั้งเครื่องวัดความเครียดเรียบร้อยแล้วแล้ว จะทำการติดตั้งคานเหล็กด้านบนชิ้นงาน เพื่อให้แรงกระทำที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ (Distribute Load) จากนั้นย้ายชิ้นงานมาไว้ที่เครื่องกดทดสอบและติดตั้งโหลดเซลล์ พร้อมกับติดตั้งทรานสดิวเซอร์ เพื่อตรวจสอบการเครื่องตัวในแนวแกนของชิ้นงานขณะทดสอบ โดยจะติดตั้งในแกน x และแกน Z ในส่วนสุดท้ายของการเตรียมการ จะทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่สามารถแสดงผลด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าเข้ากับคอมพิวเตอร์ได้แก่ โหลดเซลล์ เครื่องวัดความเครียด และทรานสดิวเซอร์ จากนั้นตรวจสอบความเรียบร้อยเพื่อเข้าสู่กระบวนการทดสอบ

3.1.3 การทดสอบ

การทดสอบ จะทดสอบโดยใส่แรงกระทำลงไปในแนวแกน z ด้วยอัตราประมาณ 4 ตันต่อนาที โดยควบคุมแรงกระทำผ่านหน้าปัด ดังรูปที่ 14 เมื่อเกิดรอยร้าวขึ้นจะทำการค้างแรงกระทำดังกล่าวเอาไว้ เพื่อทำการตรวจสอบและเก็บข้อมูลระหว่างการทดสอบ โดยจะกระทำเช่นนี้ไปจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการวิบัติหรือไม่สามารถใส่แรงกระทำเพิ่มได้อีกจึงถือเป็นการยุติการทดสอบและนำไปสู่การบันทึกและเก็บข้อมูลหลังการทดสอบต่อไป

3.1.3 การบันทึกและเก็บผลการทดสอบ

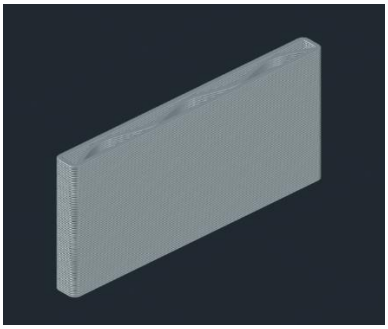
ก่อนการทดสอบจำเป็นต้องมีการจดบันทึกข้อมูลของชิ้นงาน อาทิเช่น ขนาด สภาพชิ้นงาน เป็นต้นอีกทั้งในส่วนของการเตรียมการทดสอบต้องจดบันทึกตำแหน่งที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดด้วย

ระหว่างการทดสอบจะทำการจดบันทึกโดยเน้นไปที่รอยร้าวที่เกิดขึ้น เช่น ความยาว, ความกว้างและตำแหน่ง ที่เกิดรอยร้าว เป็นต้น โดยเน้นย้ำเรื่องความปลอดภัยเนื่องจากเป็นการค้างแรงกระทำเอาไว้

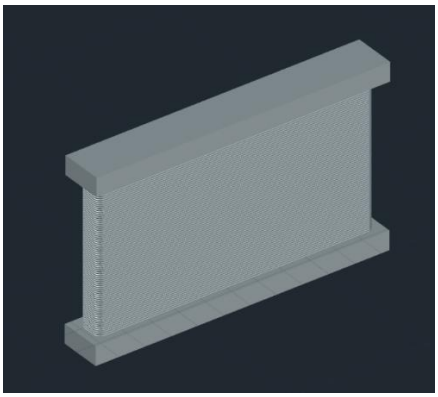
หลังการทดสอบจะเป็นการเก็บข้อมูลจากสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งมาที่คอมพิวเตอร์ ทั้งแรงกระทำ ค่าความเครียด และการเคลื่อนตัวของชิ้นงาน ดังรูปที่ 15 รวมถึงรอยร้าวทั้งหมดและลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการวิบัติเกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับข้อมูลหลังการทดสอบ

3.2 การขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Autocad

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองดังกล่าวถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม Autocad 3D ซึ่งจะทำการจำลองโครงสร้างออกมาทีละชั้น(Layer) โดยที่แต่ละชั้นมีความหนา 1 เซนติเมตร และความกว้าง 2.5 เซนติเมตร และทำการสร้างแบบจำลองที่มีลักษณะเป็นฟันปลาภายในกำแพงสำหรับกำแพงที่สร้างขึ้นจากเทคนิคการพิมพ์สามมิติแบบหน้าเรียบ จากนั้นนำมาวางซ้อนทับกันจนรวมออกมาเป็นแบบจำลองตามโครงสร้างจริงที่มีความสูงของกำแพง 77 เซนติเมตร ความกว้าง 12 เซนติเมตร และความยาว 132 เซนติเมตร



รูปที่ 1 แบบจำลองโครงสร้างของแต่ละชั้นของโครงสร้างกำแพง



รูปที่ 2 แบบจำลองของโครงสร้างกำแพง

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าด้านในของกำแพงจะมีโครงถัก ซึ่งเมื่อนำแต่ละชั้น (Layer) มาซ้อนทับรวมกันจะได้เป็นแบบจำลองโครงสร้าง โดยจะมีลักษณะตรงกับโครงสร้างกำแพงที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์สามมิติของจริง นั่นคือมีลักษณะเป็นการซ้อนทับกันของชั้นคอนกรีตจากนั้นจะทำการสร้างคานที่รองรับด้านบนและด้านล่างของกำแพงซึ่งแสดงให้เห็นตามรูปที่ 2 ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับชิ้นส่วนโครงสร้างของจริงเมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างกับกำแพงที่สร้างโดยการพิมพ์สามมิติ พบว่าโครงสร้างมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ และมีขนาดที่เท่ากัน

3.3 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ANSYS

โปรแกรมมีหลักการทำงานหลักๆ 6 ส่วน ดังรูปที่ 3 โดยจะทำเริ่มทำตั้งแต่ส่วนแรกไปยังส่วนสุดท้ายจึงจะถือว่าการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเสร็จสมบูรณ์

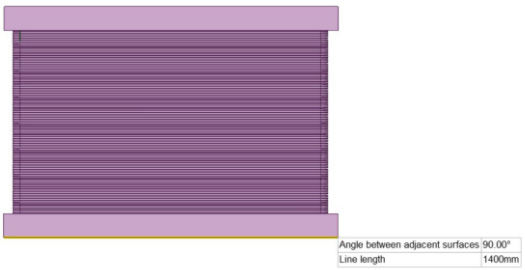
รูปที่ 3 การทำงานหลัก 6 ส่วน

3.3.1 ข้อมูลทางวิศวกรรม (Engineering Data)

เป็นส่วนของการกำหนดวัสดุและค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ดังรูปที่ 20 โดยการวิจัยนี้ใช้ Concrete ที่มีคุณสมบัติดังบทที่ 2

3.3.2 การขึ้นรูปทางเรขาคณิต (Geometry)

เนื่องจากเราสร้างแบบจำลองโครงสร้างไว้แล้วด้วยโปรแกรม Autocad ดังนั้นในส่วนนี้ จะทำการนำเข้าแบบจำลอง (import file) และทำการตรวจสอบขนาดแบบจำลอง ดังรูปที่ 4 ว่าตรงตามกำแพงที่สร้างโดยการพิมพ์สามมิติเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้น

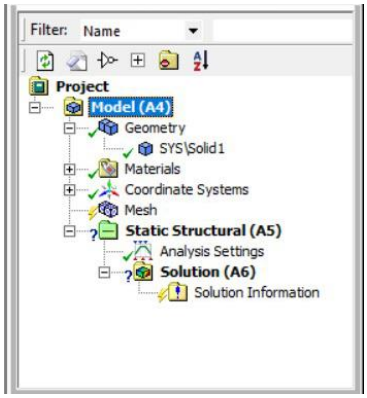


รูปที่ 4 ภาพการขึ้นรูปทางเรขาคณิต

3.3.2 โมเดล (Model)

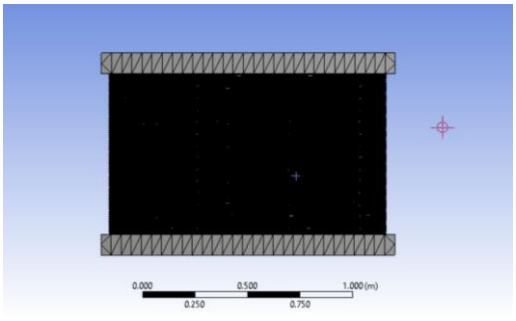
ภายหลังจากทำการขึ้นรูปทางเรขาคณิตเรียบเรียบแล้วก็จะดำเนินการในส่วนของโมเดล ดังรูปที่ 24 ทั้งนี้ ในการทำงานของ การตั้งค่า, การวิเคราะห์ผล และผลการวิเคราะห์ นั้นจะถูกรวมอยู่ในขั้นตอน โมเดล ซึ่งจะอธิบายในเนื้อหาถัดไป

เมื่อเข้ามาในส่วนของโมเดล จะมีหน้าจอแสดงผลดังรูปที่ 5 และทำการตั้งค่า ตั้งแต่คำสั่งด้านบนจนถึงด้านล่าง โดยเริ่มที่คำสั่ง Geometry เพื่อเข้าไปเลือกวัสดุของแบบจำลองโครงสร้าง ดังรูปที่ 26 ซึ่งข้อมูลวัสดุนั้นโปรแกรมจะเอามาจากส่วน ข้อมูลทางวิศวกรรม ที่อยู่ในส่วนก่อนหน้า



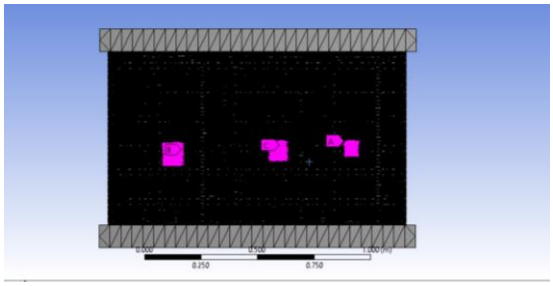
รูปที่ 5 ภาพคำสั่งในส่วนโมเดล

ลำดับต่อมาคือคำสั่ง Mesh เป็นการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง ซึ่งในการวิจัยนี้ ใช้ขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 5 เซนติเมตร จากนั้นทำการเปลี่ยนวัสดุ เมื่อทำการเปลี่ยนวัสดุเรียบร้อยแล้ว แบบจำลองโครงสร้างจะมีลักษณ์ดังภาพ รูปที่ 6



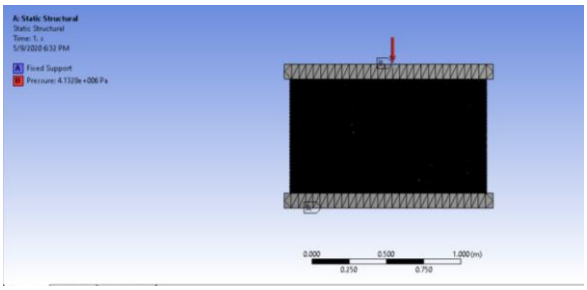
รูปที่ 6 ภาพแบบจำลองโครงสร้างเมื่อเปลี่ยนวัสดุอย่างสมบูรณ์

ในการวิเคราะห์ที่อยู่ในส่วนถัดไปนั้นต้องทำการกำหนดขอบเขตและบริเวณที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งการวิจัยนี้จะพิจารณาผลที่เกิดจากแบบจำลองโครงสร้างทั้งหมด และผลจากบริเวณที่มีสำคัญ โดยเน้นบริเวณที่มีการติดตั้งเครื่องวัดความเครียดกับทรานสดิวเซอร์ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 บริเวณที่มีการติดตั้งเครื่องวัดความเครียดและทรานสดิวเซอร์

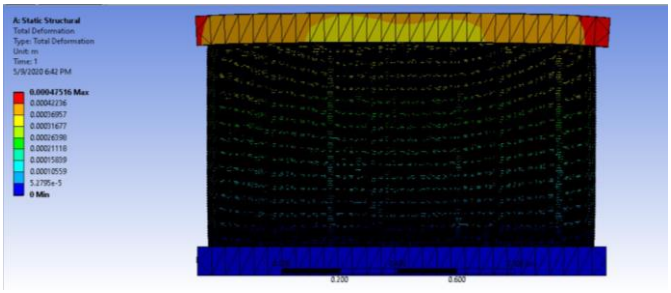
เมื่อกำหนดขอบเขตที่จะทำการวิเคราะห์แล้วจะทำการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ อันได้แก่ แรงกระทำ (Load) และจุดรองรับ (Support) โดยเงื่อนไขต่าง ๆ ต้องสอดคล้องกับการทดสอบจริง ซึ่งในการวิจัยนี้เลือกใช้ จุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed Support) และแรงกระทำเลือกใช้แรงดัน (Pressure) เนื่องจากแรงกระทำจะค่อย ๆ เพิ่มเสมือนการทดสอบจริง โดยแรงกระทำมีค่า 4,132,816.5 ปาสคาล เมื่อกำหนดเงื่อนไขเสร็จสิ้นจะเป็นไปตามรูปที่ 8



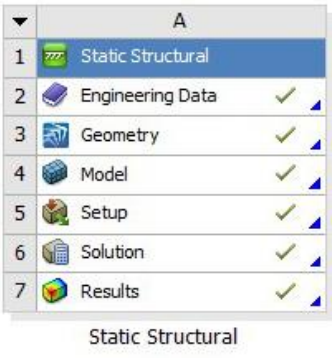
รูปที่ 8 การติดตั้งค้ำยันและแรงกระทำ

การวิเคราะห์ผลนั้น สามารถเลือกได้ว่าให้โปรแกรมวิเคราะห์ผลอะไรบ้าง ในการวิจัยนี้เลือกใช้ผลการวิเคราะห์ของ Total Deformation, Normal Strain, Normal Stress จากนั้นให้โปรแกรมทำการประมวลผล

เมื่อวิเคราะห์ผลเสร็จสิ้นแล้วจะแสดงผลแบบคร่าวๆ ในรูปของสีต่าง ๆ ซึ่งยังไม่มีตัวเลขระบุอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 9 ดังนั้นจึงต้องส่งออกผลดังกล่าวในหน้าจอ Report Preview ดังรูปที่ 38 และกลับมาตรวจสอบผลจากหน้าจอหลักว่าทุกส่วนของโปรแกรมทำงานได้อย่างสมบูรณ์สังเกตได้จากเครื่องหมายถูกต้อง ดังรูปที่ 39 จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และประยุกต์ใช้ในบทต่อไป



รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์

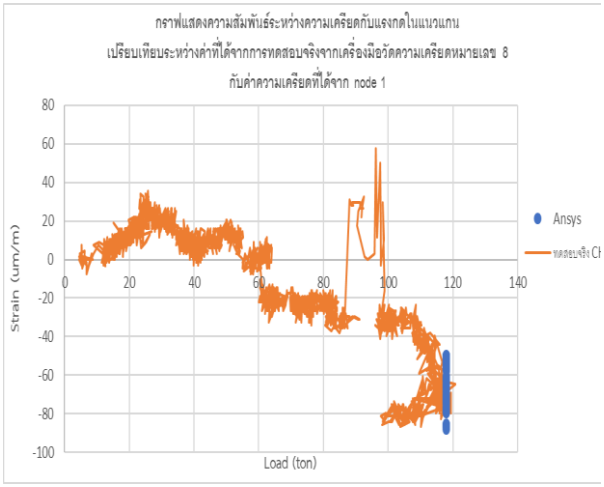


รูปที่ 10 หน้าจอการทำงานหลัก

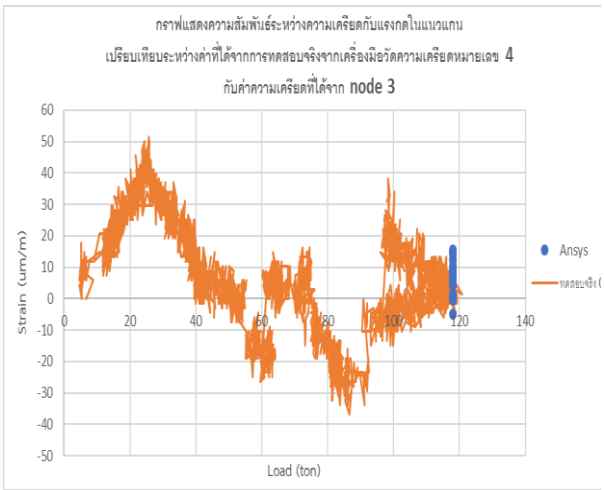
4. ผลการดำเนินงานวิจัย

หลังจากที่เราได้ทำการทดสอบโครงสร้างกำแพงที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ ตามขั้นตอนต่าง ๆ ในบทที่ 3 ที่ผ่านมานั้น ในบทที่ 4 นี้จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเครียดที่ได้มาจากการเก็บข้อโดยวิธีการทดสอบจริง กับค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้าง ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบค่าความเครียดทั้งค่าที่เก็บข้อมูลในแนวดิ่ง และแนวนอน ซึ่งจะมีผลการเปรียบเทียบดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1 การวัดค่าความเครียดในแนวนอน



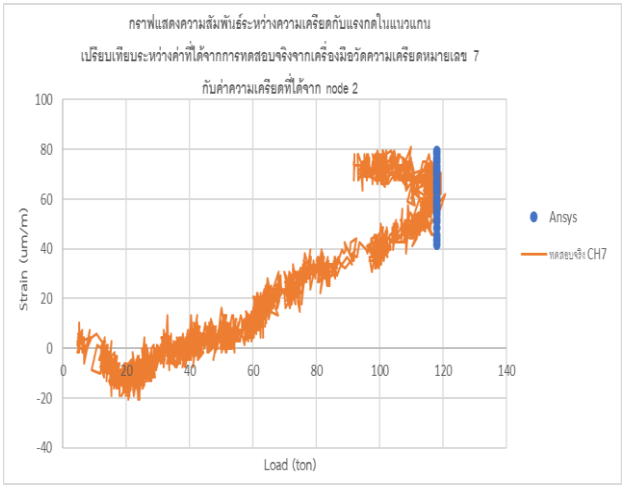
รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบความเครียดระหว่างเครื่องมือวัดความเครียดหมายเลข 8 กับค่าความเครียดที่ได้จาก node 1



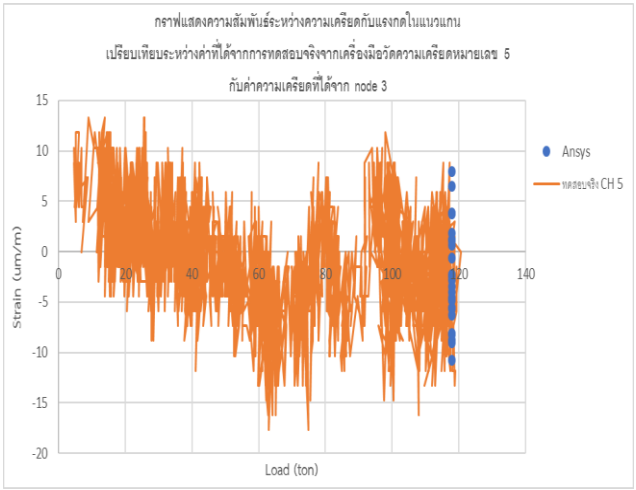
รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบความเครียดระหว่างเครื่องมือวัดความเครียดหมายเลข 4 กับค่าความเครียดที่ได้จาก node 3

จากรูปที่ 10 และ รูปที่ 11 จะแสดงให้เห็นตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการทดสอบจริง ซึ่งเป็นการวัดค่าความเครียดในแนวนอน กับค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม ANSYS ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลจากการทดสอบจริงกับค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างนั้นมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากัน

ตัวอย่างที่ 2 การวัดค่าความเครียดในแนวดิ่ง



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบความเครียดระหว่างเครื่องมือวัดความเครียดหมายเลข 7 กับค่าความเครียดที่ได้จาก node 2



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบความเครียดระหว่างเครื่องมือวัดความเครียดหมายเลข 5 กับค่าความเครียดที่ได้จาก node 3

จากรูปที่ 12 และ รูปที่ 13 จะแสดงให้เห็นตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการทดสอบจริง ซึ่งเป็นการวัดค่าความเครียดในแนวดิ่ง กับค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม ANSYS ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลจากการทดสอบจริงกับค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างนั้นมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากัน

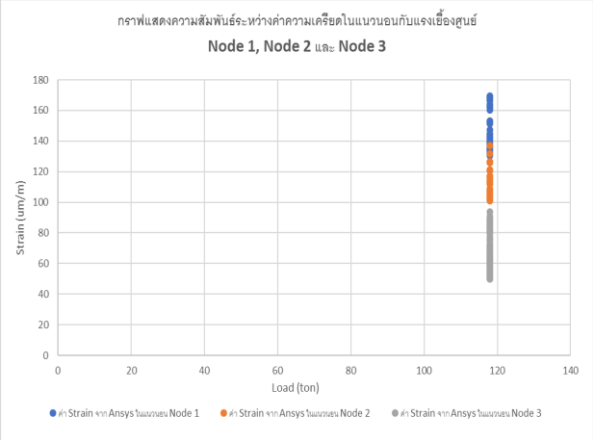
จากการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการทดสอบจริงกับค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างจะเห็นได้ว่าค่าความเครียดที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันทุก ๆ ตำแหน่งที่ทำการเก็บข้อมูล ยกเว้นตำแหน่งที่ติดเครื่องมือวัดความเครียดหมายเลขที่ 1 และ 6 ซึ่งเกิดข้อผิดพลาดของการเก็บข้อมูล ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบค่า

ความเครียดได้ ซึ่งจากการเปรียบเทียบค่าข้อมูลความเครียด เราจะสามารถกล่าวได้ว่าแบบจำลองโครงสร้างที่ได้จำลองขึ้นนั้นมีความถูกต้องของข้อมูลสามารถนำไปวิเคราะห์แทนโครงสร้างจริงได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงกดในแนวแกนของแบบจำลองโรงสร้างจะเห็นได้ว่า แบบจำลองโครงสร้างมีการเสียรูปในแนวแกนเพียงอย่างเดียว กล่าวคือเกิดการทรุดตัวของกำแพงซึ่งมีค่าการทรุดตัวมากที่สุดเท่ากับ 0.45394 มิลลิเมตร ซึ่งเกิดขึ้นที่ตำแหน่งด้านบนของคาน

4.1 การศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองโครงสร้าง

4.1.1 การรับแรงเยื้องศูนย์ (Eccentric load)

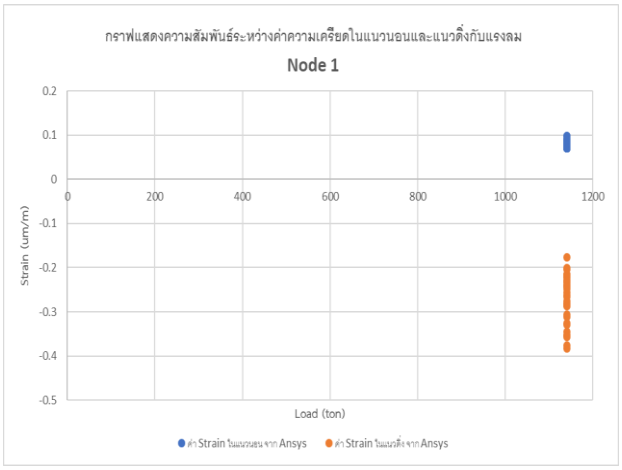
การรับแรงเยื้องศูนย์ (Eccentric load) ของแบบจำลองโครงสร้าง ซึ่งเราจะให้กำแพงรับแรงเยื้องศูนย์ขนาด 118 ตัน จะได้ว่าผลค่าความเครียดของแบบจำลองโครงสร้างที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดเยื้องศูนย์มากระทำนั้นจะมีค่าความเครียดสูงกว่ากรณีที่แบบจำลองโครงสร้างรับแรงในแนวแกน ซึ่งเราได้ตั้งข้อสมมติฐานไว้ว่าบริเวณตำแหน่ง node 1, node 4 และ node 5 จะเกิดรอยแตกร้าวของคอนกรีต โดยเราอ้างอิงจากค่าความเครียดที่เก็บได้ในบริเวณดังกล่าวมีค่าสูง และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากเครื่องมือวัดความเครียดหมายเลข 6 ที่ได้จากการทดสอบจริง ซึ่งในบริเวณดังกล่าวนั้นเกิดรอยร้าวของคอนกรีต เราจึงตั้งข้อสมมติฐานว่าบริเวณ node 1, node 4 และ node 5 ในแบบจำลองโครงสร้างจะเกิดรอยแตกร้าวของคอนกรีต และจะมีค่าการเสียรูปเกิดขึ้นสูงมาก โดยที่การเสียรูปมากที่สุดจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งด้านบนสุดของคาน โดยที่มีค่าการเสียรูปมากที่สุดเท่ากับ 4.6384 มิลลิเมตร



รูปที่ 14 ตัวอย่างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับแรงเยื้องศูนย์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้าง

4.1.2 การรับแรงลม (Lateral load)

การรับแรงลม (Lateral load) ของแบบจำลองโครงสร้าง แรงลมที่ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะใช้แรงลมมาตรฐานตามหลัก มยผ. (มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง) โดยหน่วยแรงลมออกแบบ สำหรับโครงสร้างหลักต้านแรงลม สำหรับความเร็วลมอ้างอิง 25 เมตร/วินาที โดยที่ความสูงจากพื้นดินของโครงสร้างมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 10 เมตร และเป็นสภาพภูมิประเทศแบบ A โดยจะมีหน่วยแรงลมมาตรฐานเท่ากับ 1140 นิวตัน/เมตร^2 โดยแรงดันลมจะกระทำผ่านคานของแบบจำลองโครงสร้างกำแพง ผลค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างที่รับแรงลมนั้น ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำมาก ดังนั้นเราจึงตั้งข้อสมมติฐานไว้ว่าคอนกรีตจะไม่เกิดรอยแตกร้าวขึ้น เนื่องจากแบบจำลองโครงสร้างเกิดความเครียดขึ้นน้อย



รูปที่ 15 ตัวอย่างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับแรงลมที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้าง

5. สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้เราจะสรุปผลการวิจัยทั้งหมดที่เราได้ทำการศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งจะเป็นการนำผลการศึกษาทั้งหมดที่ได้ทำมาตั้งแต่บทที่ 1 จนถึงบทที่ 4 ซึ่งจากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของกำแพงที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

กำแพงคอนกรีตที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ จะเกิดรอยแตกร้าว (Crack) ของคอนกรีตขึ้นในบริเวณที่คอนกรีตมีค่าความเครียด (Strain) ประมาณ 165 μm/m ถึง 176 μm/m โดยจะอ้างอิงจากตำแหน่งที่ติดเครื่องมือวัดความเครียดหมายเลข 6 ที่เกิดรอยแตกร้าวขึ้นเมื่อมีค่าความเครียด 165 μm/m ถึง 176 μm/m

กำแพงคอนกรีตที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ สามารถรับแรงกดในแนวแกนได้มากกว่า 118 ตัน

หลังจากที่เปรียบเทียบค่าความเครียด (Strain) ที่เก็บข้อมูลได้จากการทดสอบจริง โดยวิธีการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด (Strain gauge) ไว้ที่กำแพงจากนั้นจึงเก็บข้อมูลค่าความเครียดที่เกิดจากแรงกดในแนวแกนเทียบกับค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับผลค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากการทดสอบจริง จะสามารถบอกได้ว่าแบบจำลองโครงสร้างที่ได้จำลองขึ้นมีความถูกต้อง สามารถนำไปวิเคราะห์แทนโครงสร้างจริงได้

5.1 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการให้แรงในแบบจำลองโครงสร้าง

เมื่อเปลี่ยนแปลงรูปแบบการให้แรงในแบบจำลองโครงสร้าง จะส่งผลให้พฤติกรรมของแบบจำลองโครงสร้างเปลี่ยนแปลง ซึ่งรูปแบบการให้แรงและผลของพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลดังนี้

แรงเยื้องศูนย์ (Eccentric Load) พฤติกรรมของแบบจำลองโครงสร้างที่เกิดขึ้นเมื่อรับแรงเยื้องศูนย์ จะได้ผลว่า แบบจำลองโครงสร้างแบบจำลองโครงสร้างนั้นเกิดความเครียดขึ้นมากกว่ากรณีที่แบบจำลองโครงสร้างรับแรงในแนวแกน ซึ่งจากการเก็บข้อมูลค่าความเครียดจากแบบจำลองโครงสร้างในกรณีที่รับแรงเยื้องศูนย์จะมีทำให้เราสามารถคาดการณ์ได้ว่าแบบจำลองโครงสร้างจะเกิดรอยแตกร้าว (Crack) ของคอนกรีตขึ้นในบริเวณ Node 1, Node 4 และ Node 5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าความเครียดสูง อาจจะเกิดรอยแตกร้าวของคอนกรีต โดยอ้างอิงจากการเทียบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นนี้กับค่าความเครียดจากการทดสอบจริงที่เก็บข้อมูลได้จากเครื่องมือวัดความเครียดหมายเลข 6 ซึ่งเกิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตขึ้นจริง และแบบจำลองโครงสร้างนั้นเกิดการเสียรูปค่อนข้างสูง โดยจะมีค่าการเสียรูปมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 4.6384 มิลลิเมตร

แรงด้านข้าง (Lateral Load) แรงด้านข้างที่พิจารณาในงานวิจัยฉบับนี้คือแรงลม ซึ่งพฤติกรรมของแบบจำลองโรงสร้างที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงลมกระทำ จะได้ผลว่า ค่าความเครียดที่เก็บข้อมูลได้จากแบบจำลองโครงสร้างนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ เราจึงตั้งข้อคาดการณ์ว่าแบบจำลองโครงสร้างจะไม่เกิดรอยแตกร้าวขึ้น และการเสียรูปของแบบจำลองโครงสร้างมีค่าต่ำ โดยค่าการเสียรูปมากที่สุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 0.010202 มิลลิเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรเสริมเหล็กในโครงสร้างที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ เนื่องจากโครงสร้างที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์ 3 มิติที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมในงานวิจัยฉบับบนี้ไม่มีการเสริมเหล็กภายในโครงสร้าง และจากการทดลองจะเห็นได้ว่าโครงสร้างเกิดรอยแตกร้าว (Crack) อย่างเมื่อรับแรงกดในแนวแกน ดังนั้นในการพัฒนาโครงสร้างที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ เราควรใส่เหล็กเสริมเพิ่มเข้าไปในโครงสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรง

ในการศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองโครงสร้างในงานวิจัยฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม ANSYS ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม ANSYS นี้จะไม่สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะ (Buckling) ของโครงสร้างได้ ดังนั้นในการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างในชั้นถัดไปควรที่จะศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของโรงสร้างด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิทิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมทั้งกรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ ผศ.ดร.วัฒนชัย สมิทธากร และ รศ.ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์ ที่ให้ความรู้และข้อเสนอแนะ รวมถึงคำแนะนำต่าง ๆ เพื่อใช้ในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์

ผู้เขียนขอขอบคุณอย่างสุดซึ้งต่อรุ่นพี่ ได้แก่ นาย ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำงานและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนการทำงานเป็นอย่างดีตลอดมา พระคุณของท่านเหล่านี้ ผู้เขียนจะระลึกถึงจนกว่าชีวิตจะหาไม่

เอกสารอ้างอิง

[1] Jay G. sanjayan and Behzad Nematollahi, “3D Concrete printing for construction application” ,Faculty of science, Engineering and Technology, Swinburne University of Technology, Hawthorn, VIC, Australia, 2019 .

[2] R.A. Buswell, W.R. Leal de Silva, S.Z. Jones, J.Dirrenberger, “3D printing using concrete extrusion”, Thesis, Loughborough University, UK, 2017

[3] Tassilo Moritz, Saeed Maleksaeedi, “Powder bed binder jet/inkjet 3D printing”, The Danish Technology Institute, Denmark, 2018

[4] ธนัท ศักดานรเศรษฐ์, “แนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเลขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์:กรณีศึกษาการออกแบบศาลอเนกประสงค์”, ปริญญาโท,สถาปัตยกรรม,มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2558

[5] ธีร์ธวัช โกยแก้วพริ้ง, “การวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”, ปริญญาโท, วิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2560