

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาคอมโพสิตที่ใช้แบบหล่อจาก 3D Printing Compression Performance of 3D Printing Concrete Composite Columns

ศิริยาภรณ์ แท่นศิลา¹ นุตพงษ์ สุทธิพันธ์² และ รองศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการก่อสร้างเริ่มนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3D มาใช้มากขึ้น เนื่องจากมีศักยภาพในการเพิ่มความยืดหยุ่นในการออกแบบ ลดของเสียจากวัสดุ และลดระยะเวลาการก่อสร้าง การใช้การพิมพ์ 3D ในโครงสร้างคอนกรีตโดยเฉพาะในกระบวนการผลิตเสากำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในกระบวนการก่อสร้าง การศึกษาได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับสมรรถนะการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตคอมโพสิตที่ผลิตจากคอนกรีตพิมพ์ 3D (3DCP) และเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตหล่อในที่แบบดั้งเดิม วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนัก พฤติกรรมการยึดตัว และกลไกการล้มเหลวของเสาทั้งสองประเภท

การศึกษานี้ใช้วิธีการทดสอบ โดยเสาคอนกรีตคอมโพสิตพิมพ์ 3D และเสาคอนกรีตแบบดั้งเดิมจะถูกทดสอบภายใต้แรงอัดเพื่อประเมินสมรรถนะโครงสร้าง การทดสอบประกอบด้วยการวัดค่าความจุแรงสูงสุด แรงมาตรฐานของกรูด และพฤติกรรมการยึดตัวภายใต้แรงที่ใช้ นอกจากนี้การศึกษายังสำรวจการใช้การเสริมเหล็กภายในเสาคอนกรีตพิมพ์ 3D เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและเปรียบเทียบผลลัพธ์กับเสาคอนกรีตแบบดั้งเดิม

ผลการศึกษาพบว่าเสาคอนกรีตคอมโพสิตพิมพ์ 3D มีความแข็งแรงในการรับแรงอัดที่คล้ายคลึงหรือดีกว่าเสาคอนกรีตหล่อในที่แบบดั้งเดิม แม้ว่าจะมีความแตกต่างบางประการในพฤติกรรมการยึดตัวและความสามารถในการรับน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับวัสดุและการออกแบบ การศึกษานี้สรุปว่าเทคโนโลยีการพิมพ์ 3D มีศักยภาพอย่างมากในการสร้างเสาคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพและมีความมั่นคงทางโครงสร้างสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง โดยมีโอกาสในการปรับปรุงเพิ่มเติมผ่านการปรับแต่งกระบวนการพิมพ์และคุณสมบัติของวัสดุ

คำสำคัญ: การพิมพ์ 3D, เสาคอนกรีต, สมรรถนะการรับแรงอัด, การเสริมเหล็ก, เทคโนโลยีการก่อสร้าง

Abstract

The construction industry has increasingly adopted 3D printing technology due to its potential to enhance design flexibility, reduce material waste, and minimize construction time. The use of 3D printing in concrete structures, specifically in the manufacturing of columns, has garnered attention for its ability to improve the efficiency and precision of construction processes. This study investigates the compression performance of

composite columns made from 3D printed concrete (3DCP) and compares it with traditional cast-in-place concrete columns. The objective is to evaluate the load-bearing capacity, deflection behavior, and failure mechanisms of both types of columns.

The study employs an experimental approach where composite 3D printed concrete columns and conventional concrete columns are subjected to compressive testing to assess their structural performance. The testing includes measuring maximum load capacity, nominal force of grout, and deflection behavior under applied loads. Additionally, the study explores the use of steel reinforcement within the 3D printed columns to improve their performance and compares the results with those of standard concrete columns.

The results show that the composite 3D printed concrete columns exhibit similar or better compressive strength compared to traditional cast-in-place concrete, though some differences in deflection behavior and load capacity are observed depending on the material and design. The study concludes that 3D printing technology has significant potential for creating efficient and structurally sound concrete columns for use in construction, with the possibility of further improvements through optimization of the printing process and material properties.

Keywords: 3D Printing, Concrete Columns, Compression Performance, Reinforcement, Construction Technology

1 คำนำ

การใช้ 3D printing concrete ในการก่อสร้างได้รับความสนใจอย่างมากในวงการวิศวกรรมการก่อสร้าง โดยเฉพาะในการผลิตเสาและผนังที่มีความซับซ้อน ซึ่งสามารถช่วยลดเวลาและต้นทุนในการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบัน ผนังในประเทศไทยส่วนใหญ่ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยรับแรง ทำให้ต้องมีความหนาที่แปรผันตรงตาม minimum require ของเสา ซึ่งส่งผลให้ผนังมีความหนาที่มากเกินไปจนงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาสำเร็จรูป 3D printing อันจะสามารถนำไปสู่การลดความหนาของผนังโดยการแยกพิมพ์เสาออกจากพิมพ์

ผนังและพิมพ์เสาเป็นแบบสำเร็จรูป ด้วยการใช้เทคโนโลยี 3D printing concrete การลดความหนาของผนังยังสามารถลดแรงที่กระทำต่อฐานราก และช่วยให้การออกแบบฐานรากมีขนาดเล็กลง อีกทั้งคนที่รองรับอาคารสามารถออกแบบให้มีความแข็งแรงที่พอดีกับการรับแรงจากเสาและอื่น ๆ โดยไม่ต้องรับน้ำหนักจากผนังที่หนาเกินไป

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเสาสำเร็จรูป 3DCP งานวิจัยนี้มุ่งเปรียบเทียบ ความสามารถในการรับแรงอัด (Compression Capacity), การรับน้ำหนักสูงสุด (Maximum Load Capacity) และ พฤติกรรมการแอ่นตัว (Deflection Behavior) ระหว่างเสาสำเร็จรูป 3DCP และเสาคอนกรีตหล่อในที่ เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างด้านสมรรถนะและพฤติกรรมของวัสดุในโครงสร้าง ซึ่งจะช่วยระบุศักยภาพของเสาสำเร็จรูป 3DCP ในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงสูงสุด (Max Load) และแรงเกิดรอยแตกครั้งแรก (First Crack) ของเสาคอนกรีต 3DCP ที่มีความหนาต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโครงสร้างและความทนทาน, ศึกษาความเหมาะสมของความหนาเสา 3DCP เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบเสาคอนกรีตในระบบก่อสร้างด้วย 3D Printing, วิเคราะห์ผลกระทบของการวางเหล็กปลอกในเสา 3DCP ต่อความสามารถในการรับแรงและการเกิดรอยและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เปลือกโครงสร้าง 3DCP เพื่อเสริมความสามารถในการรับแรงและเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้าง

2 วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุซีเมนต์ที่นำมาใช้กับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (CPAC 3D Printing Solution, 2020)

Properties	Class I High Strength	Class II Moderate Strength	Class III Low Strength	Class IV/LW Lightweight Moderate Strength (2 Part)
Code	NN550	NN350	NN250	LW300
Compressive Strength, MPa	50-60	30-50	20-30	30-50
Density, kg/m ³	2,200	2,200	2,200	1,500

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตที่นำมาใช้ใน 3D Concrete Printing (CPAC 3D Printing Solution, 2020)

2.2 วิธีการทำงานของ FDM และกระบวนการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ (CPAC 3D Printing Solutions, 2020) [10]

2.2.1 วิธีการทำงานก่อนใช้เครื่องพิมพ์สามมิติรูปแบบ FDM Extrusion

1. Load ปูน 3D จากถุง big-bag (1 ton) ใส่ใน Silo (1.3-1.5 ton)
2. Feed ปูนจาก Silo ลงไปในเครื่องผสมปูน Duomix เพื่อ믹ซ์ปูนในเบื้องต้น (การตั้งคาร์ระดับน้ำ ปกติใช้น้ำ 300 ลิตร/ชม.)
3. ตรวจสอบความชื้นเหลวของเนื้อปูนโดยใช้ อุปกรณ์ modify vicat (ค่าที่เหมาะสม = 60 - 65)

4. ปลอypูนที่ผ่านตามความชื้นเหลวที่กำหนดลงไปในเครื่อง P-15 ที่จะทำหน้าที่ปั๊มปูนส่งไปยังเครื่องปรี้น

2.2.2 หลักการทำงานของ Print head

หัวพิมพ์ของ Extrusion FDM จะสามารถปรับขนาดความหนาของการพิมพ์ได้ จะมี Screw ที่เอาไว้กำหนดความหนาและในตัวเครื่องจักรจะสามารถปรับ Spindle คือการปรับการหมุนไหลลงของใบสกรู และปุม Feed เป็นการปรับความเร็วในการเดินเครื่องจักร



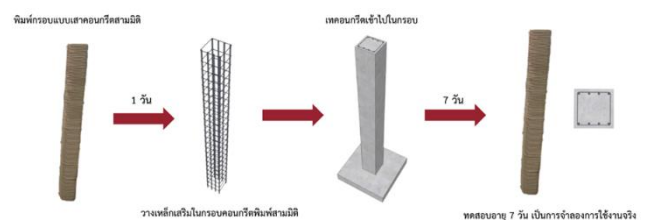
รูปที่ 1 Print head สำหรับการพิมพ์สามมิติ

หลักการทำงาน

1. เมื่อต้องการให้เส้นปรี้นใหญ่ขึ้น -> เพิ่ม Spindle/ลด Feed
2. เมื่อต้องการให้เส้นปรี้นเล็กลง -> ลด Spindle/เพิ่ม Feed

2.2.3 กระบวนการพิมพ์

1. พิมพ์กรอบแบบเสา 3d printing (พิมพ์เป็นกรอบคล้ายแบบหล่อ)
2. รออายุ 1 วัน
3. วางเหล็กเสริม
4. เทคอนกรีตเข้าไปในกรอบ 3d printing
5. ทดสอบที่อายุ 7 วัน (จำลองการใช้งานจริง)



รูปที่ 2 กระบวนการพิมพ์

2.2.4 การติดตั้งชุดการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เครื่องทดสอบแรงกด AMSLER 500T (Universal Testing Machine) ใช้สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ จุดประสงค์หลักเพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งวัสดุที่สามารถใช้ทดสอบ เช่น ยาง, พลาสติก, เหล็ก, โลหะ, คอนกรีต, ไม้ และอื่นๆ โดยใช้สำหรับการทดสอบต่างๆ เช่น การทดสอบแรงกด การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงเฉือน และการทดสอบอื่นๆ ที่ถูกกำหนดตามมาตรฐานของการทดสอบ

แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) คือ อุปกรณ์ใส่แรงอัดไปที่ตัวอย่างเพื่อให้สามารถค่อย ๆ เพิ่มแรงได้อย่างละเอียด

โหลดเซลล์ (Load Cell) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวโหลดเซลล์ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าสามารถนำสัญญาณทางไฟฟ้านี้แล้วทำการบันทึกค่าที่วัดได้ใน

เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่าน Data Logger เพื่อทำการวัดค่าและบันทึกค่าที่วัดได้ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ตามช่วงเวลาที่เรากำหนดไว้

Linear Variable Differential Transformer (LVDT) เป็นอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหรือการเคลื่อนที่ด้วยตัวทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำ

แบบเชิงเส้นหลักการทำงานจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ต่อเข้ากับ Data Logger เพื่อทำการวัดค่าและบันทึกค่าที่วัดได้ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ตามช่วงเวลาที่เรากำหนดไว้

Data Logger เป็นเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง บันทึกข้อมูลและแสดงผลโดยการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถแสดงผลข้อมูลขณะที่ทำการทดสอบได้ ใช้ร่วมกับ Load Cell เพื่อวัดค่าแรงอัดที่กระทำต่อคาน และ ใช้ร่วมกับ LVDT เพื่อวัดค่าการเคลื่อนที่ของคาน

2.3 การทดสอบ

2.3.1. การทดสอบส่วนที่ 1

มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าความหนาที่เหมาะสมของคอนกรีตพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing concrete หรือ 3DCP) โดยทดสอบในความหนา 2 ซม., 3 ซม., และ 4 ซม. เพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักสูงสุด (maximum load capacity) และกำลังรับน้ำหนักก่อนรอยร้าวแรก (First Crack Load) ของแต่ละความหนา จากนั้นเลือกค่าความหนาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบในขั้นถัดไป

กระบวนการทดสอบ

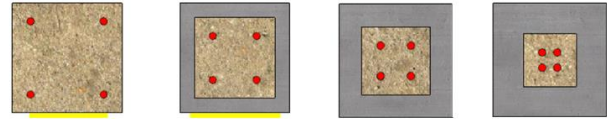
การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างเสาคอนกรีตหล่อในที่ต้นที่ 1

ตัวอย่างเสาคอนกรีตพิมพ์ 3 มิติ (3DCP) ต้นที่ 2,3,4 จะถูกผลิตในความหนา 2 ซม., 3 ซม., และ 4 ซม. ตามลำดับวางขึ้นพิมพ์ตามความหนาที่กำหนดโดยใช้หัวพิมพ์ (Extrusion Nozzle) และควบคุมความสม่ำเสมอของการพิมพ์

NO.	Name	Gross Dimension (cm)			% of vertical reinforce	Section Area (sq.cm)		Section Area (%)	
		กว้าง	ยาว	สูง		3D	Grouting	3D	Grouting
1	Reference (Grouting)					0	225	0	100%
2	2 cm_3DCP	15	15	150	140% (4-DB10)	104	121	46%	54%
3	3 cm_3DCP					144	81	64%	36%
4	4 cm_3DCP					176	49	78%	22%

ตารางที่ 2 ตารางแสดงข้อมูลตัวอย่างการทดสอบที่ 1



รูปที่ 3 ตัวอย่างการทดสอบที่ 1

การคำนวณค่าการรับน้ำหนักสูงสุด

$$A_g = 15\text{cm} \times 15\text{cm} = 225\text{cm}^2$$

$$A_{st} = 4 \times 4\pi (d^2) = 4 \times 4\pi (1^2) = 3.16\text{ cm}^2$$

$$A_c = A_g - A_{st} = 225 - 3.16 = 221.84\text{ cm}^2$$

$$P_{no} = 0.85f_c' A_c + A_{st} f_y$$

$$P_o = 0.85 \times 280 \times (225 - 3.16) + (4000 \times 3.16)$$

$$P_o = 65.4\text{ tons}$$

$$0.80\phi P_o = 0.80 \times 0.65 \times 65.4 = 34\text{ tons}$$

$$\phi P_n(\text{max}) = 0.80\phi P_{no} \text{ for tied columns } (\phi = 0.65)$$

การทดสอบกำลัง

ทดสอบด้วยเครื่อง AMSLER 500T Universal Testing Machine (UTM) เพื่อหาค่า Ultimate Load และ First Crack Load

บันทึกค่าการรับแรงอัดตามแนวแกนของ Composite 3D Concrete และคอนกรีตหล่อในที่

บันทึกค่ารับน้ำหนักสูงสุดของ Composite 3D Concrete และคอนกรีตหล่อในที่

บันทึกค่า Deflection ของ Composite 3D Concrete และคอนกรีตหล่อในที่

บันทึกลักษณะการวิบัติของเสา Composite 3D Concrete และคอนกรีตหล่อในที่

การวิเคราะห์ผล

First Crack Load จะช่วยบ่งบอกความทนทานในระยะเริ่มต้น

Ultimate Load จะใช้เพื่อประเมินความสามารถสูงสุดของวัสดุในสถานะที่แรงสูงสุดกระทำ

พฤติกรรมของเสาต่อแรงที่กระทำ จากนั้นเลือกค่าความหนาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบในขั้นถัดไป

2.3.2. การทดสอบส่วนที่ 2

การทดสอบนี้เน้นการศึกษา ระยะและปริมาณของเหล็กปลอก (Ties) ที่เหมาะสมในเสาคอนกรีต โดยใช้ผลลัพธ์จากการทดสอบครั้งที่ 1 ซึ่งได้ค่าความหนาของคอนกรีตพิมพ์ 3 มิติ (3DCP) ที่ดีที่สุด มาเป็นตัวตั้งต้นในกระบวนการทดสอบนี้ เสาต้นแบบในการทดสอบถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1. เสาหล่อในที่ (Cast-in-Place Columns): เสาต้นที่ 1 และ 2
2. เสาคอนกรีตพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing Columns): เสาต้นที่ 3, 4 และ 5

NO.	Name	Gross Dimension (cm)			% of Vertical Reinforce
		กว้าง	ยาว	สูง	
1	Precast	15	15	150	140% (4-DB10)
2	Precast + SR_End	15	15	150	140% (4-DB10)
3	Reference (3 cm_3DCP)	15	15	150	140% (4-DB10)
4	SR_End	15	15	150	140% (4-DB10)
5	SR_Along	15	15	150	140% (4-DB10)

ตารางที่ 3 ตารางแสดงข้อมูลตัวอย่างการทดสอบที่ 2

การวิเคราะห์ผล

ศึกษาความสามารถในการรับแรงสูงสุด (Max Load) และแรงเกิดรอยแตกครั้งแรก (First Crack) ของเสาคอนกรีต 3DCP ที่มีความหนาต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโครงสร้างและความทนทาน

ศึกษาความเหมาะสมของความหนาเสา 3DCP เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบเสาคอนกรีตในระบบก่อสร้างด้วยเทคโนโลยี 3D Printing

วิเคราะห์ผลกระทบของการวางเหล็กปลอกในเสา 3DCP ต่อความสามารถในการรับแรงและการเกิดรอย

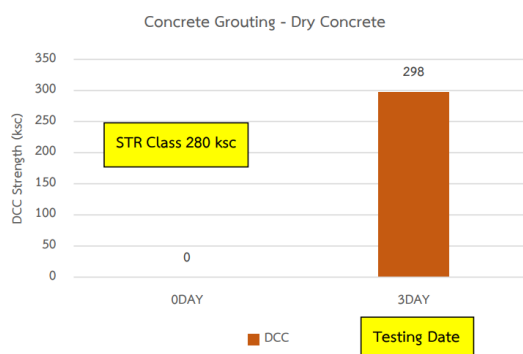
ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เปลือกโครงสร้าง 3DCP เพื่อเสริมความสามารถในการรับแรงและเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้าง

3 ผลการทดลอง

3.1 ผลการดำเนินการทดสอบส่วนที่ 1

NO.	Name	Gross Dimension (cm)			% of vertical reinforce	Section Area (sq.cm)	
		กว้าง	ยาว	สูง		3D	Grouting
1	Reference (Grouting)					0	225
2	2 cm_3DCP	15	15	150	140% (4-DB10)	104	121
3	3 cm_3DCP					144	81
4	4 cm_3DCP					176	49

ตารางที่ 4 ข้อมูลหน้าตัดเสาในส่วนที่ 1



รูปที่ 4 ผลการทดสอบ Concrete Grouting

จากสมการ $P_u = \phi P_n = \phi \times 0.80 \times \{0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}\}$ โดยที่ $\phi = 0.65$ เสาปลอกเดี่ยว

ตัวอย่างการคำนวณ

$$P_u = 0.65 \times 0.8 \times [0.85 \times 298 \times (A_g - A_{st}) + 4000 \times A_{st}]$$

Reference $A_g = 225 \text{ cm}^2$, $A_{st} = 3.16 \text{ cm}^2$, $P_u = 35.8 \text{ tons}$

2 cm_3DCP $A_g = 121 \text{ cm}^2$, $A_{st} = 3.16 \text{ cm}^2$, $P_u = 22.1 \text{ tons}$

3 cm_3DCP $A_g = 81 \text{ cm}^2$, $A_{st} = 3.16 \text{ cm}^2$, $P_u = 16.8 \text{ tons}$

4 cm_3DCP $A_g = 49 \text{ cm}^2$, $A_{st} = 3.16 \text{ cm}^2$, $P_u = 12.6 \text{ tons}$

การทดสอบ	Reference (เสาโครงสร้างปกติ)	2 cm_3DP	3 cm_3DP	4 cm_3DP
Nominal Force of Grout (ตัน)	0	22.1	16.8	12.6
First Crack (ตัน)	60	18	30	25
Max Load (ตัน)	66	47.6	45.6	35.1

ตารางที่ 5 ข้อมูลแรง Max load, First Crack และ Nominal Force Grout จากการทดสอบเสาในส่วนที่ 1



รูปที่ 5 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลแรง Max load, First Crack และ Nominal Force Grout จากการทดสอบเสาแต่ละชนิด

จากการศึกษานี้เมื่ออ้างอิงมาตรฐานวิศวกรรม ว.ส.ท. 1008-38 การเปรียบเทียบระหว่าง Max Load และ Nominal Force of Grout พบข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับประสิทธิภาพของโครงสร้าง 3DCP ที่มีความหนาต่างๆ โดย 3DCP ขนาด 4 ซม. มีอัตราส่วน Max Load ต่อ Nominal Force of Grout สูงที่สุดที่ 189% อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณา Max Load ของขนาด 4 ซม. พบว่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณไว้ล่วงหน้าหรือ Ultimate Load ก่อนเริ่มการทดสอบ ซึ่งทำให้ผลการทดสอบนี้ไม่สามารถผ่านเกณฑ์ Ultimate Load ที่กำหนดไว้ได้ เพราะการทดสอบ Max Load ที่ต่ำกว่า Ultimate Load Design อาจส่งผลกระทบในหลายด้าน

จากบทความข้างต้นด้านที่ 1 คือความปลอดภัยของโครงสร้าง เมื่อ Max Load ที่ทดสอบต่ำกว่า Ultimate Load Design นั้นอาจหมายความว่าโครงสร้างมีความสามารถในการรับแรงต่ำกว่าที่คำนวณและออกแบบไว้ล่วงหน้า การไม่สามารถผ่าน Ultimate Load ที่คำนวณไว้ล่วงหน้าอาจบ่งชี้ถึงการออกแบบที่ไม่สมบูรณ์หรือวัสดุที่ใช้ในการผลิตไม่สามารถทนต่อแรงที่คาดว่าจะเกิดขึ้นใน

สถานการณ์จริงได้ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อความปลอดภัยของโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างอาจเกิดความเสียหายหรือรอยแตกที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระหว่างการใช้งานจริง

ด้านที่ 2 คือความคงทนและอายุการใช้งาน การที่โครงสร้างมี Max Load ต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ อาจบ่งชี้ถึงการสูญเสียความแข็งแรงหรือความทนทานต่อการใช้งานในระยะยาว ในกรณีที่โครงสร้างต้องรับแรงภายนอกหรือแรงที่เพิ่มขึ้นในอนาคต เช่น ในการใช้งานจริงที่อาจมีการสะสมของแรงหรือแรงบิดที่มากกว่าค่าที่ทดสอบได้ หากไม่ได้รับการออกแบบให้สามารถรองรับแรงเหล่านี้ได้ โครงสร้างอาจเสียหายหรือสูญเสียความทนทานได้เร็วขึ้น ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหรือการซ่อมแซมที่สูงขึ้นในระยะยาว

ด้านที่ 3 คือผลกระทบต่อการประเมินความสามารถในการรับแรง การทดสอบ Max Load ที่ไม่สามารถผ่าน Ultimate Load Design อาจบ่งชี้ถึงการที่โครงสร้างไม่สามารถรองรับแรงสูงสุดที่คำนวณไว้ใน การออกแบบ ซึ่งอาจส่งผลต่อการประเมิน ความสามารถในการรับแรง ของวัสดุหรือโครงสร้างนั้น ๆ ในการออกแบบวิศวกรรม การประเมินความสามารถในการรับแรงสูงสุดนั้นสำคัญมาก เนื่องจากจะช่วยให้ทราบถึงความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นหากโครงสร้างต้องเผชิญกับภาระที่สูงขึ้นในระหว่างการใช้งาน การไม่สามารถทดสอบให้ถึงค่าที่คำนวณไว้ล่วงหน้าอาจทำให้ไม่สามารถประเมินและเตรียมการในการรับแรงสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นได้

ด้านสุดท้ายคือการไม่สามารถประกันประสิทธิภาพการทำงานตามที่คาดหวัง การที่โครงสร้างมี Max Load ต่ำกว่าที่คำนวณไว้ อาจหมายความว่าโครงสร้างไม่สามารถทำงานตามที่คาดหวังได้ในสภาวะที่รับภาระสูงสุด การออกแบบที่ไม่สามารถรองรับภาระที่คำนวณไว้ อาจทำให้โครงสร้างไม่สามารถใช้งานได้เต็มที่ ประสิทธิภาพ อาจเกิดการเสียรูปของโครงสร้าง หรือเกิดความล้มเหลวในระหว่างการใช้งาน ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการใช้งานจริงของโครงสร้าง

ดังนั้นปัจจัยการพิจารณาผลการทดสอบจาก 3DCP ขนาด 3 ซม. จึงมีความสำคัญซึ่งแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนระหว่าง Max Load และ Nominal Force of Grout อยู่ที่ 171% และ 3DCP ขนาด 3 ซม. นี้สามารถผ่านค่า Ultimate Load ที่ได้คำนวณและออกแบบไว้ก่อนการทดสอบได้ และพบว่า ค่า First Crack ของ 3DCP ขนาด 3 ซม. มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับขนาด 2 ซม. และ 4 ซม. ซึ่งบ่งชี้ถึงความทนทานต่อการเกิดรอยแตกที่ดี ดังนั้นในการวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้าง 3DCP นี้ จำเป็นต้องพิจารณาตามมาตรฐานวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง เช่น มาตรฐาน วสท. 1008-38 ซึ่งเป็นมาตรฐานการออกแบบและทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย

มาตรฐาน วสท. 1008-38 ได้กำหนดหลักการและแนวทางสำหรับการออกแบบและทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการรับแรงสูงสุด, การโก่งตัว, การวิบัติ, และความทนทานของวัสดุ จึงวิเคราะห์ได้ 4 ปัจจัย

ปัจจัยที่ 1 Ultimate Load Design Ultimate Load เป็นค่าภาระสูงสุดที่โครงสร้างจะสามารถทนได้ก่อนเกิดการเสียหายหรือพังทลาย โดยในการออกแบบตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 จะกำหนดให้ Ultimate Load ต้องผ่านการทดสอบที่กำหนดไว้

ล่วงหน้าเพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างมีความแข็งแรงพอในการรองรับภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งานจริง การที่ 3DCP ขนาด 3 ซม. สามารถผ่านค่า Ultimate Load ที่ออกแบบไว้ นั้น สะท้อนถึงความสามารถในการรองรับแรงสูงสุดและการใช้งานได้จริงในสภาวะที่คาดการณ์ไว้

ปัจจัยที่ 2 การทดสอบค่า First Crack ซึ่ง First Crack เป็นค่าที่ใช้เพื่อประเมินการเกิดรอยแตกแรกของวัสดุ ซึ่งเป็นสัญญาณแรกของการเริ่มต้นเกิดความเสียหาย การที่ 3DCP ขนาด 3 ซม. มีค่า First Crack สูงที่สุดเมื่อเทียบกับขนาด 2 ซม. และ 4 ซม. บ่งชี้ถึงความทนทานต่อการเกิดรอยแตก ที่ดีกว่า ซึ่งสำคัญต่อการประเมินความคงทนของโครงสร้างในระยะยาว และการใช้งานในสภาวะที่มีการรับภาระสูง

ปัจจัยที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่าง Max Load และ Nominal Force of Grout ตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 ยังให้ความสำคัญกับการ เปรียบเทียบระหว่าง Max Load และ Nominal Force of Grout เพื่อประเมินประสิทธิภาพการรับแรงของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง การที่ 3DCP ขนาด 3 ซม. มีอัตราส่วน Max Load ต่อ Nominal Force of Grout ที่ 171% ถือว่าเป็นค่าที่สูงและแสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพของวัสดุ ที่สามารถรับแรงได้ดีกว่า ซึ่งเป็นไปตามหลักการออกแบบที่คำนึงถึงประสิทธิภาพและความเสถียรของโครงสร้าง

ปัจจัยที่ 4 มาตรฐานการโก่งตัวและการวิบัติ ตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 กำหนดให้โครงสร้างคอนกรีตต้องสามารถทนต่อการโก่งตัว (Deflection) และการวิบัติ (Buckling) ตามค่าที่ออกแบบไว้ เพื่อให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและคงทนในระยะยาว การทดสอบค่า First Crack และ Max Load รวมถึงการพิจารณาการโก่งตัวและการวิบัติตามที่มาตรฐานกำหนด ช่วยให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้าง 3DCP ในด้านต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง เมื่อการอ้างอิงมาตรฐานวิศวกรรม วสท. 1008-38 [1] ในการทดสอบการวิบัติ (Buckling) ในการทดสอบนี้ ได้มีการติดตั้งเซ็นเซอร์ LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ทั้งในแนวนอนและตั้งฉากกับแรงที่กระทำ เพื่อวัดการ วิบัติ (Buckling) ของโครงสร้างตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 ซึ่งเป็นมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กของประเทศไทย โดยมาตรฐานนี้ได้กำหนดข้อกำหนดเกี่ยวกับการโก่งตัว (deflection) และการวิบัติ (buckling) ของโครงสร้างที่ต้องปฏิบัติตามเพื่อให้มั่นใจในความปลอดภัยและความทนทานของโครงสร้างที่ถูกออกแบบและใช้งาน

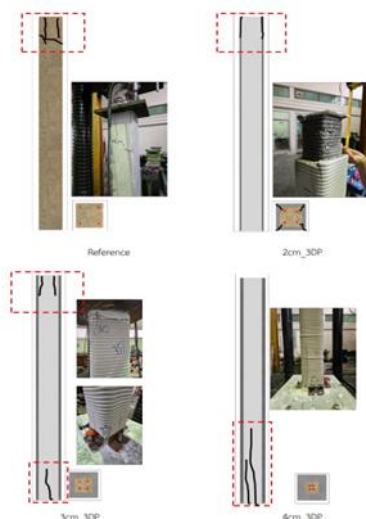
มาตรฐาน วสท. 1008-38 กำหนดว่าการโก่งตัว (deflection) ของโครงสร้างจะต้องไม่เกิน $L/200$ ของความสูง (L) ของโครงสร้าง เพื่อป้องกันการเสียรูปที่เกินขอบเขตที่ยอมรับได้ โดยค่าการโก่งตัวที่เกินไปอาจส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของโครงสร้างและอาจเกิดการเสียหายของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างนั้น ๆ ซึ่งทำให้โครงสร้างไม่สามารถทำงานได้ตามที่คาดหวัง

$L/200$ หมายถึงอัตราส่วนที่การโก่งตัวจะต้องไม่เกิน $1/200$ ของความสูง (L) ของโครงสร้างที่ได้รับการทดสอบ เพื่อให้โครงสร้างสามารถรับภาระได้อย่างปลอดภัยและไม่เกิดความเสียหายในระยะยาว

ตัวอย่างเช่น สำหรับเสาคอนกรีตที่มีความสูง 1.5 เมตร (1500 มม.) การโก่งตัวสูงสุดที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 จะเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร (0.0075 เมตร) ซึ่งเป็นค่าที่สามารถรับได้โดยไม่เกิดการวิบัติที่อันตรายต่อโครงสร้าง การติดตั้ง เซ็นเซอร์ LVDT เป็นการวัดการวิบัติ (buckling) หรือการโก่งตัวในแนวตั้งของโครงสร้าง ซึ่งถือเป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงในการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของโครงสร้างเซลล์ลาร์ (structural displacement) การวัดนี้เป็นส่วนสำคัญในการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างเพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างยังคงทนทานและปลอดภัยตลอดอายุการใช้งานของมัน LVDT เป็นเซ็นเซอร์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรม โดยสามารถวัดการเคลื่อนที่ได้ในระดับไมโครเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับการตรวจสอบการโก่งตัวที่มีความละเอียดสูง โดยการติดตั้ง LVDT ในแนวขนานและตั้งฉากกับแรงที่กระทำบนโครงสร้าง ช่วยให้สามารถจับการเคลื่อนที่ในทั้งสองทิศทาง เพื่อให้ได้ค่าการโก่งตัวหรือการวิบัติที่แม่นยำที่สุดในการทดสอบ

หากการโก่งตัวของโครงสร้างเกินค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน วสท. 1008-38 เช่น ในกรณี L/200 เกินไปจาก 7.5 มิลลิเมตร สำหรับเสาคอนกรีตที่มีความสูง 1.5 เมตร อาจทำให้โครงสร้างมีความเสี่ยงที่จะแตกหักหรือเกิดการเสียรูปที่ไม่สามารถแก้ไขได้ การโก่งตัวที่เกินขอบเขตนี้อาจส่งผลให้โครงสร้างไม่สามารถรองรับแรงที่กระทำต่อไปได้อย่างปลอดภัย ซึ่งอาจนำไปสู่การสูญเสียความทนทานของโครงสร้างในระยะยาว การทดสอบการโก่งตัวและการวิบัติของโครงสร้างตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 เป็นกระบวนการที่ช่วยให้มั่นใจได้ว่าโครงสร้างที่สร้างขึ้นจะสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพตามที่คาดหวัง โดยมาตรฐานนี้เป็นเครื่องมือที่ช่วยตรวจสอบว่าโครงสร้างสามารถทนต่อภาระได้และไม่เกิดความเสียหายจนทำให้โครงสร้างพังทลายหรือเสี่ยงต่อความปลอดภัย

จากผลการทดสอบพบว่า 3DCP ที่ทดสอบไม่เกิดการโก่งตัวที่กำหนดในมาตรฐาน วสท. 1008-38 ซึ่งทำให้สามารถยืนยันได้ว่าโครงสร้างมีความสมบูรณ์ทางโครงสร้าง ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ การทดสอบนี้ช่วยยืนยันว่าโครงสร้าง 3DCP มีประสิทธิภาพในการรับแรงและไม่เกิดการเสียรูปเกินขอบเขตที่ยอมรับได้



รูปที่ 6 ภาพ Failures ของเสาแต่ละชนิดหลังการทดสอบเสา

วิเคราะห์ลักษณะการวิบัติของเสา

เสา Reference เกิดการวิบัติของเสาคอนกรีตที่เกิดจากแรงกด (Compression) เกิดที่ด้านบนของเสาเมื่อใกล้ถึง Maximum Load โดยในขณะนั้น หลังจากนั้นเกิดแรงเฉือน (Shear) ระหว่างคอนกรีตภายในเสาและกระทำที่บริเวณหัวเสา ซึ่งส่งผลให้เสาไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไปเมื่อถึงจุดที่เสาไม่สามารถรับแรงสูงสุดที่กำหนดได้ การวิบัติที่เกิดขึ้นจากแรงเฉือน (Shear) นี้มักทำให้เสาแตกหักหรือเสียหายอย่างรุนแรงที่จุดที่รับแรงกด (Compression) สูงสุด

เสา 2cm_3DCP เกิดการวิบัติของเสาคอนกรีตที่เกิดจากแรงกด (Compression) เกิดที่ด้านบนของเสาเมื่อใกล้ถึง Maximum Load โดยในขณะนั้น หลังจากนั้นเกิดแรงที่มาจากคอนกรีตภายในเสาและกระทำที่บริเวณหัวเสา ซึ่งส่งผลให้เสาไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไปเมื่อถึงจุดที่เสาไม่สามารถรับแรงสูงสุดที่กำหนดได้ การวิบัติที่เกิดขึ้นจากแรงที่มาจากคอนกรีตภายในเสาทำให้เสาแตกหักหรือเสียหายอย่างรุนแรงที่จุดที่รับแรงกด (Compression) สูงสุด

เสา 3cm_3DCP เกิดการวิบัติของเสาคอนกรีตที่เกิดจากแรงกด (Compression) ที่กระจายไปด้านบนและด้านล่างของเสาเมื่อใกล้ถึง Maximum Load โดยในขณะนั้น หลังจากนั้นแรงกด (Compression) กระทำที่บริเวณหัวเสา ซึ่งส่งผลให้เสาไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไปเมื่อถึงจุดที่เสาไม่สามารถรับแรงสูงสุดที่กำหนดได้ การวิบัติที่เกิดขึ้นจากแรงที่มาจากคอนกรีตภายในเสาทำให้เสาแตกหักหรือเสียหายอย่างรุนแรงที่จุดที่รับแรงกด (Compression) สูงสุด

เสา 4cm_3DCP เกิดการวิบัติของเสาคอนกรีตที่เกิดจากแรงกด (Compression) ที่ด้านล่างของเสาเมื่อใกล้ถึง Maximum Load โดยในขณะนั้น หลังจากนั้นแรงกด (Compression) กระทำที่บริเวณหัวเสาซึ่งมีความยาวในลักษณะการวิบัติมากกว่าผลการทดสอบทั้งหมด ซึ่งส่งผลให้เสาไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไปเมื่อถึงจุดที่เสาไม่สามารถรับแรงสูงสุดที่กำหนดได้ การวิบัติที่เกิดขึ้นจากแรงที่มาจากคอนกรีตภายในเสาทำให้เสาแตกหักหรือเสียหายอย่างรุนแรงที่จุดที่รับแรงกด (Compression) สูงสุด

การวิบัติของเสาคอนกรีต 3DCP ขึ้นอยู่กับความหนาของเปลือกโดยเสา 3 ซม. แสดงประสิทธิภาพดีที่สุด ทั้งในด้านความสามารถรับแรงสูงสุด (Max Load) ที่ผ่านเกณฑ์ Ultimate Load Design และค่าการเกิดรอยแตกครั้งแรก (First Crack) ที่สูงสุด ซึ่งบ่งชี้ถึงความทนทานและความคงทนของโครงสร้าง นอกจากนี้ การทดสอบการโก่งตัวตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 พบว่าเสาทุกขนาดไม่เกินค่าที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีความสมบูรณ์และปลอดภัยโดยสรุป เปลือก 3DCP ขนาด 3 ซม. เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในงานออกแบบโครงสร้างตามมาตรฐานวิศวกรรมไทย

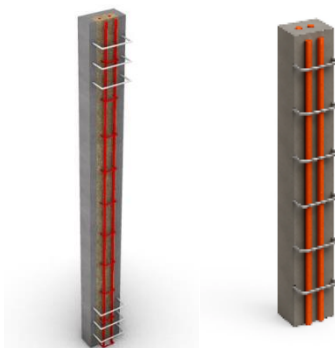
3.2 ผลการดำเนินการทดสอบส่วนที่ 2

NO.	Name	Gross_Dimension (cm)	% of vertical reinforcement	Section_Area (sq.cm) - 3D	Section_Area (sq.cm) - Grouting	Section_Area (%) - 3D	Section_Area (%) - Grouting
5	SR_Along	15 x 15 x 150	1.40% (4-D810)	144	81	64%	36%
6	SR_End			144	81	64%	36%

ตารางที่ 6 ข้อมูลแรง Max load, First Crack และ Nominal Force
Grout จากการทดสอบเสาในส่วนที่ 2



รูปที่ 7 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลแรง Max load, First Crack และ Nominal Force Grout จากการทดสอบเสาแต่ละชนิด



รูปที่ 8 ลักษณะการวางเหล็กปลอก

จากการวิเคราะห์ลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตและทดสอบการวางเหล็กปลอกใน 3DCP ภายใต้ความหนา 3 cm ในการทดสอบการวางเหล็กปลอก 2 วิธี คือการวางเหล็กปลอกตลอดแนวความยาวของเสาในระยะห่างเหล็กปลอกที่เท่ากัน และการวางเหล็กปลอกที่ด้านบนและด้านล่างของเสา โดยมีการควบคุมปริมาตรของเหล็กปลอกให้เท่ากัน

จากผลการทดสอบพบว่า การวางเหล็กปลอกที่ด้านบนและด้านล่างของเสา มีความสามารถในการรับแรง First Crack ที่มากกว่าการวางเหล็กปลอกตลอดแนวความยาวของเสาในระยะห่างเหล็กปลอกที่เท่ากันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กปลอกในตำแหน่งดังกล่าวสามารถป้องกันการเกิดร้าวแรก (First Crack) ได้ดีขึ้น โดยช่วยกระจายแรงที่กระทำให้เสามีความยืดหยุ่นและทนทานมากขึ้น อีกทั้งการวางเหล็กปลอกในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างยังสามารถรับแรง Max Load ได้สูงกว่าการวางเหล็กปลอกตลอดแนวความยาวของเสา โดยการกระจายเหล็กปลอกในตำแหน่งที่เหมาะสมนี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและลดความเสี่ยงจากการเกิดความเสียหายในช่วงที่เสาต้องรับแรงสูงสุด

วิเคราะห์ข้อดีของการวางเหล็กปลอกที่ด้านบนและด้านล่าง เมื่อการวางเหล็กปลอกในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงทั้งในระยะเริ่มต้น (First Crack) และแรงสูงสุด (Max Load) เนื่องจากการกระจายเหล็กปลอกในแนวตั้งนี้สามารถรับแรงได้ดีกว่าการวางเหล็กปลอกที่มีระยะห่างเท่ากันตลอดแนวความยาวของเสา และการวางเหล็กปลอกในตำแหน่งดังกล่าวยังมีผลในการลดความเสียหาย จากการแตกร้าว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการลดความเสี่ยงที่เสาจะเสียหายระหว่างการขนส่งและการก่อสร้าง โดยช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างคอนกรีตให้สามารถทนทานต่อสภาวะต่างๆ ได้ดีขึ้น

จากผลการทดสอบทั้งหมดสรุปได้ว่าการวางเหล็กปลอกที่ด้านบนและด้านล่างของเสา คอนกรีตในระบบ 3DCP ภายใต้ความหนา 3 cm ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรง First Crack และ Max Load แต่ยังเป็นวิธีที่ช่วยลดความเสียหายจากการแตกร้าวระหว่างการขนส่งและการก่อสร้าง ส่งผลให้โครงสร้างมีความสมบูรณ์และยืดหยุ่นสูงขึ้น ดังนั้น วิธีการนี้จึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการออกแบบเสา คอนกรีตสำหรับการใช้งานในระบบการก่อสร้างแบบ 3DCP

4 บทสรุป

4.1 ศึกษาความสามารถในการรับแรงสูงสุด (Max Load) และแรงเกิดรอยแตกครั้งแรก (First Crack) ของเสา คอนกรีต 3DCP ที่มีความหนาต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโครงสร้างและ ความทนทาน

จากการวิเคราะห์และคำนวณค่าแรง Ultimate Load ของเสา คอนกรีต พบว่าค่าที่คำนวณได้จากสูตรคือ 35.8 ตัน ซึ่งใช้เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงของเสา คอนกรีตแต่ละชนิด โดยมีผลการทดสอบดังนี้

เสา คอนกรีตหล่อในที่แบบอ้างอิง (Reference) มีความสามารถรับแรงสูงสุดที่ 66 ตัน ซึ่งสูงกว่าค่าที่คำนวณออกอย่างชัดเจน

เสา คอนกรีต 3DCP ความหนา 2 ซม. มีค่า Max Load เท่ากับ 47.6 ตัน

เสา คอนกรีต 3DCP ความหนา 3 ซม. มีค่า Max Load เท่ากับ 45.6 ตัน

ซึ่งทั้งสองความหนาของเสา คอนกรีต 3DCP นี้สามารถรับแรงได้มากกว่าค่าการออกแบบที่คำนวณไว้ ทำให้ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัยตามมาตรฐานสำหรับเสา คอนกรีต 3DCP ความหนา 4 ซม. พบว่า Max Load เท่ากับ 35.1 ตัน ซึ่งต่ำกว่าค่าการออกแบบที่คำนวณไว้เล็กน้อย ส่งผลให้ต้องพิจารณาปรับปรุงความหนาหรือเสริมความแข็งแรงเพิ่มเติม อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงการนำไปใช้งาน

สรุปผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเสา คอนกรีต 3DCP ที่มีความหนาตั้งแต่ 2-3 ซม. มีความสามารถรับแรงสูงสุดที่เพียงพอต่อการใช้งานตามข้อกำหนดทางวิศวกรรม ในขณะที่ความหนา 4 ซม. จำเป็นต้องมีการพิจารณาเพิ่มเติมเพื่อให้มั่นใจในความมั่นคงปลอดภัยของโครงสร้าง จำเป็นต้องมีการคำนึงถึงการนำไปใช้งานจากการทดสอบเสา คอนกรีตทั้งประเภทเสา Reference (คอนกรีตหล่อในที่) และเสา 3DCP ที่มีความหนาเปลือกแตกต่างกัน ได้แก่ 2

ชม., 3 ชม. และ 4 ชม. พบว่าค่าแรง First Crack มีค่าแตกต่างกันดังนี้

- เสาคู Reference มีค่า First Crack สูงสุดที่ 60 ตัน
- เสาคู 2cm_3DCP มีค่า First Crack เท่ากับ 18 ตัน
- เสาคู 3cm_3DCP มีค่า First Crack เท่ากับ 30 ตัน
- เสาคู 4cm_3DCP มีค่า First Crack เท่ากับ 25 ตัน

ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าเสาคู Reference มีความสามารถในการต้านทานแรงก่อนเกิดรอยแตกกว้างแรกสูงกว่าเสาคู 3DCP ในทุกความหนาอย่างชัดเจน สำหรับเสาคู 3DCP พบว่าความหนาของเปลือกมีผลต่อค่า First Crack โดยเสาคูความหนา 3 ซม. แสดงค่าแรงเกิดรอยแตกกว้างแรกสูงกว่าเสาคูความหนา 2 ซม. และ 4 ซม. ซึ่งชี้ว่าความหนาของเปลือก 3DCP เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความทนทานต่อการเกิดรอยแตกกว้าง

4.2 ศึกษาความเหมาะสมของความหนาเสาคู 3DCP เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบเสาคอนกรีตในระบบก่อสร้างด้วยเทคโนโลยี 3D Printing

สรุปผลการทดสอบเสาคอนกรีตที่มีเปลือก 3D Printed Concrete (3DCP) ความหนาต่าง ๆ ได้แก่ 2 ซม., 3 ซม. และ 4 ซม. พบว่าเสาคูที่มีเปลือก 3DCP ขนาดความหนา 3 ซม. มีความสมดุลที่ดีที่สุดในแง่ของความแข็งแรงและความทนทาน

เสาคูที่มีเปลือก 3DCP ขนาดความหนา 3 ซม. สามารถรับแรงสูงสุด (Max Load) ได้ถึง 171% ของ Nominal Force of Grout และผ่านค่า Ultimate Load ที่ออกแบบไว้ล่วงหน้า (ค่าคำนวณ 35.8 ตัน)

ค่า First Crack ของเสาคูที่มีเปลือก 3DCP ขนาดความหนา 3 ซม. สูงที่สุดเมื่อเทียบกับ 2 ซม. และ 4 ซม. แสดงถึงความทนทานต่อการเกิดรอยแตกกว้างที่ดี ทำให้โครงสร้างมีความยืดหยุ่นและคงทนมากขึ้น

เสาคูที่มีเปลือก 3DCP ขนาดความหนา 4 ซม. แม้จะมีอัตราส่วน Max Load ต่อ Nominal Force of Grout สูงสุด (189%) แต่ Max Load ที่ทดสอบต่ำกว่า Ultimate Load Design ซึ่งอาจส่งผลให้โครงสร้างไม่ปลอดภัยในทางปฏิบัติ

เสาคูที่มีเปลือก 3DCP ขนาดความหนา 2 ซม. มีความแข็งแรงและความทนทานต่ำกว่าเสาคูขนาด 3 ซม. และ 4 ซม. อย่างมีนัยสำคัญ

การทดสอบการโก่งตัว (Deflection) และการวิบัติ (Buckling) ของเสาคู 3DCP ทั้งหมดไม่เกินค่าที่กำหนดในมาตรฐานวิศวกรรมวสท. 1008-38[1] ซึ่งยืนยันความสมบูรณ์ของโครงสร้างตามมาตรฐาน

การวัดการโก่งตัวด้วยเซ็นเซอร์ LVDT ทั้งในแนวนอนและตั้งฉากกับแรงที่กระทำ ช่วยตรวจสอบความเคลื่อนไหวของโครงสร้างได้อย่างแม่นยำและชัดเจน

สรุปโดยรวมเสาคูที่มีเปลือก 3DCP ขนาดความหนา 3 ซม. ถือเป็นความหนาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบเสาคอนกรีตในระบบก่อสร้างด้วยเทคโนโลยี 3D Printing เพราะให้ความสมดุลที่ดีระหว่างความแข็งแรงสูงสุดและความทนทานต่อการเกิดรอยแตกกว้าง รวมถึงผ่านมาตรฐานวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องอย่างครบถ้วน นอกจากนี้ การวางเหล็กปลอกในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของเสาคูเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงและช่วยลดความเสี่ยงในการใช้

งานจริง จึงเป็นแนวทางที่แนะนำสำหรับการออกแบบเสาคู 3DCP เพื่อให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและคงทนในระยะยาว

4.3 วิเคราะห์ผลกระทบของการวางเหล็กปลอกในเสาคู 3DCP ต่อความสามารถในการรับแรงและการเกิดรอย

สรุปการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีต 3DCP ความหนา 3 ซม. โดยเปรียบเทียบผลการวางเหล็กปลอก 2 รูปแบบ ได้แก่ การวางเหล็กปลอกตลอดแนวความยาวของเสาคูในระยะห่างเท่ากัน และการวางเหล็กปลอกเฉพาะบริเวณด้านบนและด้านล่างของเสาคู โดยมีปริมาณเหล็กปลอกเท่ากันในทั้งสองกรณี

ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า การวางเหล็กปลอกที่ด้านบนและด้านล่างของเสาคูมีผลดีต่อความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในด้านแรงเกิดรอยแตกกว้างแรก (First Crack) และแรงสูงสุดที่เสาคูสามารถรับได้ (Max Load) เมื่อเทียบกับการวางเหล็กปลอกตลอดแนวความยาว นอกจากนี้ การจัดวางเหล็กปลอกในตำแหน่งดังกล่าวช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของเสาคูและลดความเสี่ยงของการเกิดรอยแตกกว้างในระหว่างการขนส่งและการก่อสร้าง ส่งผลให้โครงสร้างมีความสมบูรณ์และทนทานมากขึ้น

ดังนั้นสรุปได้ว่าการวางเหล็กปลอกที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของเสาคอนกรีต 3DCP จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความสามารถรับแรงและความทนทานของเสาคอนกรีตที่ผลิตด้วยเทคโนโลยี 3D Printing Concrete สำหรับการออกแบบและประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างจริงต่อไป

4.4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เปลือกโครงสร้าง 3DCP เพื่อเสริมความสามารถในการรับแรงและเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้าง

การศึกษารุ่นนี้มุ่งเน้นการประเมินศักยภาพของเปลือกโครงสร้าง 3D Printed Concrete (3DCP) ในการเสริมความสามารถในการรับแรงและเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้าง โดยทำการทดสอบและวิเคราะห์เปลือก 3DCP ที่มีความหนาต่าง ๆ เพื่อหาองค์ประกอบที่เหมาะสมที่สุด

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เปลือก 3DCP ที่มีความหนาประมาณ 3 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการรับแรงสูงสุด (Max Load) ที่ผ่านเกณฑ์ Ultimate Load ที่ออกแบบไว้ล่วงหน้าอย่างชัดเจน สะท้อนถึงความแข็งแรงที่เพียงพอในการรองรับภาระจริง นอกจากนี้ เปลือกขนาดนี้ยังมีค่าการเกิดรอยแตกกว้างแรก (First Crack) สูงกว่าขนาดอื่น ๆ ซึ่งบ่งชี้ถึงความทนทานที่ดีกว่าและช่วยรักษาความสมบูรณ์ของโครงสร้างในระยะยาว

ในด้านการควบคุมการโก่งตัวและการวิบัติ (Buckling) การทดสอบเปลือก 3DCP ทั้งหมดยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐานวิศวกรรม วสท. 1008-38 [1] ซึ่งเป็นข้อบังคับสำคัญสำหรับความปลอดภัยและความมั่นคงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย โดยการวัดด้วยเซ็นเซอร์ LVDT แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีการโก่งตัวและการวิบัติที่อยู่ในระดับปลอดภัย ไม่เกิดความเสี่ยงหายรุนแรงที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้งาน

นอกจากนี้ การเสริมความแข็งแรงด้วยการวางเหล็กปลอกในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของเสาคู 3DCP ภายใต้ความหนา 3 เซนติเมตร พบว่าช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงทั้งในช่วง First Crack และ Max Load ได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังลดความเสี่ยง

ของการเกิดรอยแตกกว้างและความเสียหายในช่วงการขนส่งและก่อสร้าง

จากผลการศึกษาดังกล่าว จึงสรุปได้ว่า การใช้เปลือกโครงสร้าง 3DCP ขนาดความหนาประมาณ 3 เซนติเมตร เป็นทางเลือกที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้สูงในการเพิ่มความแข็งแรงและประสิทธิภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผลิตด้วยเทคโนโลยี 3D Printing Concrete เพื่อรองรับการใช้งานในระยะยาวได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกล่าวคำขอบคุณอย่างจริงใจต่อ รศ.ดร. วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ทำให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่นและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

- [1] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.), "มาตรฐานวิศวกรรม วสท. 1008-38," กรุงเทพฯ, 2538.
- [2] ณัฏฐา เวสสะภักดิ์, *เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ*, กรุงเทพฯ, 2545, หน้า 5.
- [8] นรเศรษฐ์ et al., "ข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติด้วยวัสดุซีเมนต์," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์*, 2558.

ภาษาอังกฤษ

- [3] FORMLABS, "Components of Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printer," 2021. [Online]. Available: <https://formlabs.com/blog/sls-3d-printing/>. [Accessed: 15-May-2025].
- [4] FORMLABS, "Components of Right-Side Up SLA 3D Printer," 2017. [Online]. Available: <https://formlabs.com/blog/right-side-up-sla/>. [Accessed: 15-May-2025].
- [5] M. Olivera et al., "Operation process of Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printers," *Journal of Manufacturing Processes*, 2016.
- [6] D. T. Pham et al., "Overlapping printing pattern of concrete with a 10-degree rotation in subsequent layers," *Construction and Building Materials*, 2022.
- [7] R. Wangler et al., "Concrete extrusion deposition in 3D printing," *Additive Manufacturing*, 2016.
- [9] American Concrete Institute. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. Farmington Hills, MI: ACI.
- [10] CPAC 3D Printing Solutions, "FDM operation and 3D concrete printing process," 2020. [Online]. Available: <https://cpac3dprinting.com/fdm-process>. [Accessed: 15-May-2025].

