

การออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์ 3 มิติ

DESIGN OF PEDESTRIAN BRIDGE WITH 3D PRINT

CONCRETE TECHNOLOGY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF PEDESTRIAN BRIDGE WITH 3D PRINT
CONCRETE TECHNOLOGY



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ
DESIGN OF PEDESTRIAN BRIDGE WITH 3D PRINT CONCRETE
TECHNOLOGY

นักศึกษา นายเจษฎา ภูมิภักดิ์ รหัสนักศึกษา 62010139
นายชัชมา สิทธิสาร รหัสนักศึกษา 62010192
นางสาวน้ำเพชร แซ่อึ้ง รหัสนักศึกษา 62010489

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา	
ดร.ทรงศักดิ์ สุธาสุประดิษฐ์	
ดร.ภาณุมาศ ไทรงาม	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(รศ.ดร.ชลิตา อุตะเภา)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

นายเจษฎา	ภูมิภักดิ์	รศ.สำนักศึกษา	62010139
นายชัชมา	สิทธิสาร	รศ.สำนักศึกษา	62010192
นางสาวน้ำเพชร	แซ่ฮึง	รศ.สำนักศึกษา	62010489

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.รัฐภูมิ วิชาตปรีชา
ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้างในหลายประเทศ ส่วนใหญ่มักใช้ในงานก่อสร้างอาคารหรือชิ้นส่วนสิ่งปลูกสร้าง สำหรับการประยุกต์ใช้กับงานโครงสร้างพื้นฐานเช่นสะพานยังพบน้อยและส่วนใหญ่ยังอยู่ในระหว่างการวิจัยและพัฒนา ทั้งนี้เนื่องมาจากยังขาดองค์ความรู้ที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบด้วยคอนกรีตพิมพ์สามมิติ บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติมาประยุกต์กับการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็ก และนำเสนอแนวคิดในการวิเคราะห์และออกแบบรายละเอียดสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบสะพานคนข้ามมีขนาดความกว้าง 2.5 เมตร ความยาว 5.0 เมตร ความลึกของหน้าตัด 0.7 เมตร โดยยึดติดชิ้นส่วนพิมพ์สามมิติเข้ากับฐานรากแผ่นคอนกรีตด้วยลวดอัดแรง โดยการสร้างแบบจำลอง ตลอดจนการวิเคราะห์หาผลตอบสนองโครงสร้างสะพานทั้งค่าหน่วยแรงและการแอ่นตัวที่สถานะการใช้งาน ซึ่งทำโดยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในกรณีน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบเต็มส่วน (Full span) และครึ่งส่วน (Half span) จากผลการวิเคราะห์พบว่าทั้งหน่วยแรงและค่าการแอ่นตัวสูงสุดไม่เกินมาตรฐานที่ยอมให้ เมื่อได้แบบรายละเอียดการออกแบบแล้วจึงนำมาจัดทำแบบจำลองขนาดย่อส่วนด้วยการพิมพ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติในสัดส่วน 1:20 เพื่อใช้ตรวจสอบความเป็นไปได้ก่อนการพิมพ์จริงด้วยวัสดุคอนกรีต ประโยชน์จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติได้ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: เทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ, สะพานคนข้าม, คอนกรีตพิมพ์สามมิติ, สะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

DESIGN OF PEDESTRIAN BRIDGE WITH 3D PRINT CONCRETE TECHNOLOGY

Mr. Jessada Phoommipug Student ID. 62010139

Mr. Chatsama Sitthisan Student ID. 62010192

Miss. Nampetch Sae-Ueng Student ID. 62010489

Advisor: Asst. Prof. Dr.Rattapoom Parichatprecha

Academic Year 2022

ABSTRACT

Currently, 3D-printed concrete technology is widely used in the construction industry in many countries. Most often used in the construction of buildings or building parts. Applications for infrastructure applications such as bridges are rare, and most are still under research and development. This is due to the lack of knowledge that can be used in analysis and design with 3D-printed concrete. This article aims to apply 3D printed concrete technology to the design of pedestrian bridges and present the concept of analyzing and designing the details of mini-crossing bridges with 3D printed concrete technology. In this research, the bridge was designed with a width of 2.5 meters, a length of 5.0 meters, and a cross-sectional depth of 0.7 meters. This is done by analyzing the bridge structure response both at force unit value and deflection at operating conditions, which is done using the finite element method. In the case of full and half-span loads, the analysis results showed that both the force unit and the maximum deflection value did not exceed the permissible standard. After obtaining the design details, the miniature model is then printed with a 3D printer at a ratio of 1:20 to be used to check the feasibility before printing with concrete materials. The benefits of this research can be used to guide the design of small pedestrian bridges with 3D-printed concrete technology in the future.

KEYWORDS: 3D Printed Concrete Technology, Pedestrian Bridge, 3D Printed Concrete, 3D Printed Concrete Bridge, Finite Element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตีพิมพ์อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาติปรีชา อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.ทรงศักดิ์ สุธาสุประดิษฐ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาจนงานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกรายวิชา โดยคณาจารย์แต่ละท่านได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดียิ่ง ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณ คุณธนศักดิ์ ศรีสวัสดิ์ ที่ให้แนวคิดและคำปรึกษาสำหรับความรู้ทั้งทางด้านทฤษฎีและการใช้โปรแกรม ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนผู้วิจัยสามารถดำเนินงานให้ลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท เอส ที เอส คอร์ปอเรชั่น จำกัด สำหรับข้อมูลผลการเจาะสำรวจดิน และบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (ซีแพค) สำหรับข้อมูลราคาการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาและทำวิจัยเรื่องนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการทำโครงการ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธาจนตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพภักดี ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

เจษฎา ภูมิภักดิ์
ชัชมา สิทธิสาร
น้ำเพชร แซ่อึ้ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะรับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ.....	5
2.2 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	17
2.3 ปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	25
3.1 ข้อจำกัดในงานวิจัย.....	27
3.2 การสำรวจพื้นที่.....	27
3.3 แนวคิดการออกแบบและสร้างแบบจำลอง.....	29
3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	30
3.5 การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับฐานรองรับที่ปลายสะพาน(End Block).....	41
3.6 ทดลองพิมพ์แบบจำลองสะพานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ.....	50
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล	52
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	52
4.2 รายละเอียดการออกแบบ.....	57
4.3 แบบจำลองสะพานพิมพ์สามมิติ	59
4.4 ประมาณราคาค่าก่อสร้างเบื้องต้น.....	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 ข้อเสนอจากงานวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก	66
ประวัติผู้เขียน.....	75



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
ตารางที่ 2.1 ข้อดี ความท้าทาย และความเสี่ยงของการนำเทคนิคการพิมพ์สามมิติ มาใช้กับงานก่อสร้าง.....	5
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของเทคนิคการพิมพ์คอนกรีต 2 เทคนิค.....	8
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ใน FE-model.....	32
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิด ลวด 7 เส้น (7 -wire) การคลายแรงดึงต่ำ (Low Relaxation) ตามมาตรฐาน มอก. 402-2534.....	32
ตารางที่ 3.3 การคำนวณแรงในแนวตั้งและโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาการอบจุด O.....	43
ตารางที่ 4.1 บัญชีแสดงปริมาณและราคา.....	61
ตารางที่ ก-1 ตาราง SUMMARY OF TEST RESULTS หลุมเจาะ BH-1.....	68
ตารางที่ ก-2 ตาราง LOG OF BORING หลุมเจาะ BH-1.....	70
ตารางที่ ก-3 ตาราง Vesic's bearing capacity factor (Das,B.J,1990).....	72
ตารางที่ ก-4 ค่า Shape, Depth and Inclination factor ที่แนะนำให้ใช้.....	73

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แนวคิดการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ.....	5
รูปที่ 2.2 การทำงานของ Extrusion-Based Technique.....	7
รูปที่ 2.3 การทำงานของ Powder-Based Technique.....	7
รูปที่ 2.4 หลักการขึ้นรูปทรงขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ.....	8
รูปที่ 2.5 การขึ้นรูปโดยที่มีความสูงระหว่างชั้นห่างกันน้อย (ซ้าย) และห่างกันมาก (ขวา).....	9
รูปที่ 2.6 การหดเข้า (Offset) เส้นรอบรูป.....	9
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของรูปทรงที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ.....	10
รูปที่ 2.8 Contour Crafting (CC).....	13
รูปที่ 2.9 การเสริมแรงในแนวตั้งและแนวนอน.....	13
รูปที่ 2.10 แนวคิดแม่พิมพ์ตาข่าย.....	14
รูปที่ 2.11 การเสริมแรงด้วยไฟเบอร์.....	14
รูปที่ 2.12 ระบบการพิมพ์คอนกรีตร่วมกับการเสริมแรงอย่างต่อเนื่อง.....	15
รูปที่ 2.13 การเสริมแรงด้วยเหล็กเสริมที่คล้ายลวดเย็บกระดาษ.....	15
รูปที่ 2.14 การเสริมแรงด้วยตาข่ายลวดเหล็กในแนวตั้ง.....	15
รูปที่ 2.15 คานคอนกรีตพิมพ์เสริมแรงโดยใช้เหล็กเส้นภายนอก.....	16
รูปที่ 2.16 การเสริมแรงขึ้นส่วนคอนกรีตพิมพ์โดยหุ้มด้วยแผ่น FRP.....	16
รูปที่ 2.17 การเสริมแรงคอนกรีตพิมพ์ด้วยวิธี Post-Tension.....	17
รูปที่ 2.18 แนวคิดการออกแบบสะพานจักรยาน 3DPC.....	19
รูปที่ 2.19 คุณสมบัติที่ใช้ออกแบบตาม Weber 3D 115-1.....	19
รูปที่ 2.20 การประกอบและอัดแรงด้วยวิธี Post-Tension.....	19
รูปที่ 2.21 สะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ.....	20
รูปที่ 2.22 การตั้งค่าเพื่อทำ Topology Optimization ของคานช่วงเดียว.....	20
รูปที่ 2.23 Topology Optimization.....	21
รูปที่ 2.24 ภาพจำลอง 3D โดยไม่มีบล็อกที่จุดปลาย (ฝั่งซ้าย) และมีบล็อกที่จุดปลาย (ฝั่งขวา).....	21
รูปที่ 2.25 คุณสมบัติของวัสดุ.....	21
รูปที่ 2.26 ความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกรณีต่าง ๆ.....	21
รูปที่ 2.27 การพิมพ์ขึ้นส่วน ตำแหน่งการเสริมแรง กระบวนการประกอบและเกร้าที่รอยต่อ.....	22
รูปที่ 2.28 การติดตั้งเครื่องวัดค่าการแอ่นตัว.....	22

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.29 การแอนตัวของคนตีพิมพ์ขึ้นจริง.....	22
รูปที่ 2.30 ภาพตัดขวางของสะพาน.....	23
รูปที่ 2.31 คุณสมบัติของวัสดุ.....	24
รูปที่ 2.32 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	24
รูปที่ 2.33 การประกอบชิ้นส่วนเป็นคานคองกรีตพิมพ์สามมิติ.....	24
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	26
รูปที่ 3.2 แผนที่แสดงรายละเอียดตำแหน่งการวางสะพานในบริเวณ สจล.	27
รูปที่ 3.3 คลองโดยรอบหอใน สจล.	28
รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางคลองแนว B.....	28
รูปที่ 3.5 หน้าตัดสะพาน. ดัดแปลงจาก Design of a 3D printed concrete bridge by testing... 29	
รูปที่ 3.6 ขนาดและสัดส่วนเบื้องต้นของส่วนรองรับที่ปลายสะพาน.....	30
รูปที่ 3.7 แบบจำลองสะพานคนข้ามคองกรีตพิมพ์สามมิติ.....	30
รูปที่ 3.8 ตัวอย่าง Part ของแบบจำลองสะพาน.....	31
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างวิธีกำหนดคุณสมบัติวัสดุที่ใช้วิเคราะห์.....	32
รูปที่ 3.10 กำหนดประเภทและวัสดุให้ section.....	33
รูปที่ 3.11 ประเภทและวัสดุของทุก section.....	33
รูปที่ 3.12 ประกอบ Part แบบจำลอง.....	33
รูปที่ 3.13 แนวการวางลวดอัดแรง.....	34
รูปที่ 3.14 การวางลวดอัดแรงใน Abaqus CAE.....	34
รูปที่ 3.15 กำหนดรูปแบบการวิเคราะห์.....	35
รูปที่ 3.16 กำหนด Field Output.....	35
รูปที่ 3.17 กำหนด History Output.....	36
รูปที่ 3.18 การเชื่อมต่อระหว่างสะพานกับคองกรีต end block.....	36
รูปที่ 3.19 การเชื่อมต่อระหว่างคองกรีต end block กับลวดอัดแรง.....	37
รูปที่ 3.20 กำหนดค่า DL และ LL.....	37
รูปที่ 3.21 กำหนดส่วนรองรับ (Supports).....	38
รูปที่ 3.22 กำหนดความเค้นในลวดอัดแรง.....	38
รูปที่ 3.23 การเม็ชแบบจำลอง.....	39

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.24 การเริ่มชหน้าตัดสะพาน.....	39
รูปที่ 3.25 กำหนดงาน	39
รูปที่ 3.26 ส่งงานไปวิเคราะห์ผล.....	40
รูปที่ 3.27 การออกแบบฐานรองรับที่ปลายสะพาน.....	42
รูปที่ 3.28 ขนาดและสัดส่วนของฐานรองรับ	42
รูปที่ 3.29 ตำแหน่งของแนวแรงรวม.....	44
รูปที่ 3.30 หน่วยแรงอัดใต้ฐาน.....	45
รูปที่ 3.31 ส่วนกำแพงเสมือนเป็นคานยื่น	46
รูปที่ 3.32 การกระจายหน่วยแรงอัดใต้ฐานสำหรับออกแบบส่วนยื่นรองรับสะพาน.....	47
รูปที่ 3.33 การกระจายหน่วยแรงอัดใต้ฐานสำหรับออกแบบส่วนยื่นด้านหลังฐาน.....	49
รูปที่ 3.34 เครื่องพิมพ์สามมิติ JGAurora.....	50
รูปที่ 3.35 เส้นทางการพิมพ์และจำนวนชั้นของแต่ละท่อน.....	51
รูปที่ 3.36 การพิมพ์ชิ้นส่วนสะพาน.....	51
รูปที่ 4.1 กราฟ Convergence ของค่าหน่วยแรงกับจำนวนเอลิเมนต์.....	53
รูปที่ 4.2 กราฟ Convergence ของค่าการแอ่นตัวกับจำนวนเอลิเมนต์.....	53
รูปที่ 4.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบเต็มส่วน	54
รูปที่ 4.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบครึ่งส่วน	54
รูปที่ 4.5 หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบเต็มส่วน	55
รูปที่ 4.6 หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบครึ่งส่วน	55
รูปที่ 4.7 การแอ่นตัวของสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบเต็มส่วน	56
รูปที่ 4.8 การแอ่นตัวของสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบครึ่งส่วน	56
รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางแสดงหน้าตัดของแบบจำลองสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ.....	57
รูปที่ 4.10 ด้านข้างของแบบจำลองสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ	57
รูปที่ 4.11 แบบจำลองสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ	58
รูปที่ 4.12 รายละเอียดการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก	58
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างหน้าตัดแบบจำลองจากเครื่องพิมพ์สามมิติ	59
รูปที่ 4.14 ชิ้นส่วนแบบจำลองที่ขึ้นรูปด้วยวัสดุ Filament ขนาด 125x35x50 มม.....	59
รูปที่ 4.15 แบบจำลองสะพาน scale 1:20 ขึ้นรูปด้วยวัสดุ Filament.....	60

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ก-1 แผนผังแสดงตำแหน่งที่ตั้งโครงการก่อสร้างอาคารหอพักนักศึกษา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร..... 67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตั้งข้งอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันธุรกิจด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างได้มีการขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดการพัฒนาและปรับปรุงสิ่งก่อสร้างเพิ่มขึ้น ซึ่งปฏิเสธไม่ได้ว่างานก่อสร้างในปัจจุบันนอกจากจะให้ความสำคัญกับความแข็งแรงคงทนแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความสวยงามและควมมีเอกลักษณ์ควบคู่กันไป ธุรกิจด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างจึงมีการแข่งขันค่อนข้างสูง แต่อุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วโลก ยังคงวนเวียนอยู่กับปัญหาด้านประสิทธิภาพ การจัดการด้านเวลา และปัญหาแรงงาน ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาจึงมีการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมเข้ามามีบทบาทในการแก้ปัญหาดังกล่าว สำหรับนวัตกรรมที่มีการกล่าวถึงและเริ่มเป็นที่นิยมของธุรกิจก่อสร้างไทย คือ เทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ซึ่งถูกริเริ่มขึ้นเมื่อ 10 กว่าปีที่แล้ว ในขณะนี้ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนเป็นที่ยอมรับและเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในวงการก่อสร้าง

เทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ (3D Print Concrete) เป็นการพิมพ์ขึ้นรูปโครงสร้างแบบสามมิติ สำหรับเป็นส่วนประกอบโครงสร้าง เช่น ผนัง วัสดุตกแต่งอาคารบ้านเรือน ชั้นงานเฟอร์นิเจอร์ การก่อสร้างแบบดิจิทัลจากเครื่องพิมพ์สามมิติ สามารถคำนวณการใช้วัสดุและควบคุมการผลิตได้อย่างแม่นยำ เทคโนโลยีนี้สามารถตอบสนองกลุ่มสถาปนิก วิศวกร และผู้รับเหมา เพื่อเพิ่มอิสระในการออกแบบโครงสร้าง แต่ยังคงมีความแข็งแรงที่จะใช้งานได้จริง เพิ่มความรวดเร็วและลดมลภาวะในการผลิต ซึ่งในต่างประเทศได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง ณ ปัจจุบันเทคโนโลยีนี้มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว สามารถสร้างโครงสร้างตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ เช่น บ้าน อาคารสำนักงาน และสะพาน เป็นต้น

สำหรับประเทศไทย กลุ่มบริษัทใหญ่อย่าง SCG, CPAC Construction Solution ได้มีการนำเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติมาใช้ในงานก่อสร้าง เช่น ชั้นงานเฟอร์นิเจอร์ วัสดุตกแต่งอาคาร ผนัง และอาคารขนาดเล็ก สำหรับการประยุกต์ใช้กับงานโครงสร้างพื้นฐานเช่นสะพานยังพบได้น้อยและส่วนใหญ่ยังอยู่ในระหว่างการวิจัยและพัฒนา ทั้งนี้เนื่องมาจากยังขาดองค์ความรู้ที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบด้วยคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าจะนำเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติมาประยุกต์กับการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็ก และนำเสนอแนวคิดในการวิเคราะห์และออกแบบรายละเอียดสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการและเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ และนำมาประยุกต์กับการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็ก

1.2.2 เพื่อทดลองหาแนวคิดในการวิเคราะห์และออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ที่สามารถนำไปพิมพ์ขึ้นรูปสามมิติด้วยวัสดุคอนกรีตได้จริง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ทั้งหลักการ รายละเอียด และข้อจำกัดต่าง ๆ จากบทความ สื่อ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

1.3.2 สร้างแบบจำลองสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

1.3.3 วิเคราะห์หาผลตอบแทนของโครงสร้างสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าการแอ่นตัวสูงสุดของสะพาน ที่สภาวะการใช้งาน

1.3.4 ทดลองพิมพ์แบบจำลองสะพานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการพิมพ์ขึ้นรูปก่อนการพิมพ์จริงด้วยวัสดุคอนกรีต

1.3.5 ทำรายการคำนวณประมาณราคาค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการก่อสร้าง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาการดำเนินงานแต่ละขั้นตอนดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการ	ปี พ.ศ. 2565					ปี พ.ศ. 2566				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	←		→							
2. รวบรวมทฤษฎีและข้อมูลสำหรับการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ				←	→					
3. สร้างแบบจำลองสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติขนาดเล็กแบบอัดแรง ในโปรแกรมจำลอง						←	→			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการดำเนินการ	ปี พ.ศ. 2565					ปี พ.ศ. 2566				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
4. วิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์							←→			
5. ทดลองพิมพ์แบบจำลองสะพาน								←→		
6. ประมาณราคาก่อสร้าง									←→	
7. สรุปผลงานวิจัย									←→	
8. จัดทำรายงานการวิจัย										←→
9. นำเสนอการวิจัยฉบับสมบูรณ์										←→

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เสริมสร้างองค์ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กได้

1.5.2 สามารถเสนอแนวคิดในการวิเคราะห์และออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติได้

1.5.3 งานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติได้ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาหลักการและเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็ก ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับหลักการ ทฤษฎี และแนวคิด จากบทความ สื่อและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยสามารถแบ่งเนื้อหาได้ดังนี้

2.1 เทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

2.1.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

2.1.2 คอนกรีตสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ

2.1.3 เทคนิคการขึ้นรูปคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

2.1.4 หลักการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

2.1.5 วิธีการเสริมแรงคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

2.2 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.3 ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 Design of a 3D Printed Concrete Bridge by Testing, 2018

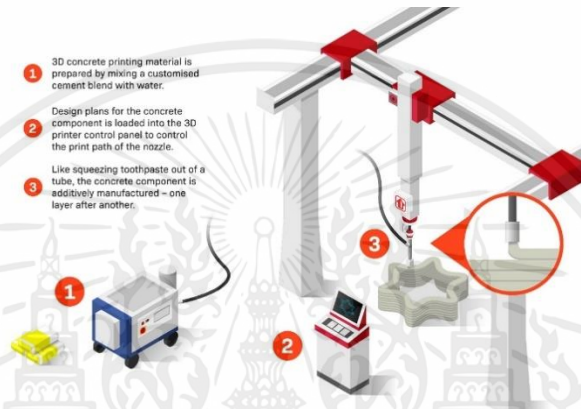
2.3.2 3D Printing of a Post-Tensioned Concrete Girder Designed by Topology Optimization, 2020

2.3.3 Digital Design and Fabrication of a 3D Concrete Printed Prestressed Bridge, 2021

2.1 เทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

2.1.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

เทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติเป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ซึ่งเป็นเทคนิคการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM) ทำงานโดยสั่งการเครื่องพิมพ์สามมิติผ่านระบบซอฟต์แวร์ที่ตั้งค่าไว้ในคอมพิวเตอร์ ให้ส่งคอนกรีตผ่านอุปกรณ์ฉีดขึ้นรูปเพื่อพิมพ์โครงสร้างที่ออกแบบในอัตราเร็วและทิศทางที่เคลื่อนที่ตามที่ตั้งค่าไว้ ระบบการพิมพ์แบบนี้จะเป็นลักษณะการแบ่งระนาบการพิมพ์เป็นชั้น ๆ จนได้เป็นชิ้นงานสำเร็จ



รูปที่ 2.1 แนวคิดการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ. โดย The Housing and Development Board (HDB) in Singapore, 2019

การนำเทคนิคการพิมพ์สามมิติมาใช้กับงานก่อสร้าง [16] สามารถสรุปข้อดี ความท้าทาย และความเสี่ยงได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ข้อดี ความท้าทาย และความเสี่ยงของการนำเทคนิคการพิมพ์สามมิติมาใช้กับงานก่อสร้าง

ข้อดี	ความท้าทาย	ความเสี่ยง
- ลดเวลาการก่อสร้าง - เพิ่มความอิสระของรูปทรงโครงสร้าง - ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน - ลดวัสดุเหลือทิ้งและแบบหล่อ	- วัสดุคอนกรีต - เครื่องพิมพ์ 3 มิติ - ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง - สถาปัตยกรรมและการออกแบบ - การบริหารงานก่อสร้าง	- Extrudability, Buildability, Open Time ของคอนกรีต - ต้นทุนเครื่องพิมพ์ - สภาพแวดล้อมโดยรอบการทำงานของเครื่องพิมพ์ - การจัดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและตั้ง 5 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี	ความท้าทาย	ความเสี่ยง
<ul style="list-style-type: none"> - มีความยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม - เพิ่มความปลอดภัยในสถานที่ก่อสร้าง - ลดจำนวนแรงงาน 	<ul style="list-style-type: none"> - ข้อบังคับและปัญหาระหว่างการพิมพ์ - ทักษะใหม่ของแรงงาน 	<ul style="list-style-type: none"> - การขาดแคลนแรงงานที่มีทักษะด้านนี้ - การขาดรหัสและข้อบังคับเกี่ยวกับการพิมพ์ 3 มิติในงานก่อสร้าง - ความปลอดภัยทางไซเบอร์

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2565

2.1.2 คอนกรีตสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ

เทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติยังมีข้อจำกัดและตัวแปรที่สำคัญทางด้านวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ เนื่องจากคอนกรีตสำหรับการนำไปพิมพ์สามมิติ จะมีความแตกต่างจากคอนกรีตทั่วไป เพราะคอนกรีตพิมพ์ต้องมีความชื้นเหลวที่เหมาะสมให้สามารถไหลผ่านท่อและฉีดอัดได้ (Extrudability) เมื่อถูกฉีดจากหัวฉีดจะต้องมีความสามารถอยู่ได้ด้วยตัวเอง (Buildability) ไม่เหลวจนเกินไป และระยะเวลาในการก่อตัว (Open time) ของคอนกรีตที่ใช้ในการแข็งตัวจะต้องมีความสัมพันธ์กับรูปแบบของโครงสร้าง ความเร็วในการฉีด และการเคลื่อนที่ของหัวพิมพ์ โดยวัสดุคอนกรีตที่ใช้ต้องมีกำลังรับแรงอัดที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกโครงสร้างคอนกรีตที่ฉีดขึ้นรูปในแต่ละชั้นของโครงสร้างได้ เพื่อให้วัสดุที่ขึ้นรูปในแต่ละชั้นมีการประสานกันอย่างสมบูรณ์ [10] ซึ่งส่วนผสมหลักประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด เช่นทรายละเอียด (0-1 มม.) สารผสมเพิ่ม และน้ำ

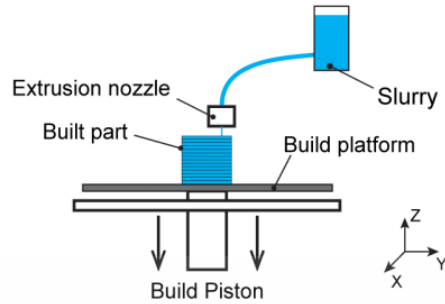
2.1.3 เทคนิคการขึ้นรูปคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

เทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ในปัจจุบันจะใช้เทคนิคการพิมพ์ขึ้นรูป 2 เทคนิค [13] ได้แก่

2.1.3.1 เทคนิคการฉีดอัด (Extrusion-Based Technique)

เป็นวิธีการพิมพ์ที่มีความคล้ายคลึงกับวิธีการ Fused Deposition Modeling (FDM) โดยจะฉีดวัสดุซีเมนต์จากหัวฉีดที่ติดอยู่กับเครนหรือแขนหุ่นยนต์ 6 แกน เพื่อพิมพ์โครงสร้างชั้นต่อชั้น เทคนิคนี้จะเน้นใช้กับงานก่อสร้างในสถานที่ เช่น ส่วนประกอบอาคารที่มีขนาดใหญ่ ลักษณะคุณภาพของพื้นผิวที่พิมพ์จะมีความละเอียดไม่มาก ผิวจะเป็นลักษณะขรุขระ ๆ ซ้อนกันขึ้นไป ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความละเอียด แต่การพิมพ์ที่ละชั้นอาจมีปัญหาเกี่ยวกับการเชื่อมกันระหว่างชั้น เกิดการเอียงและ

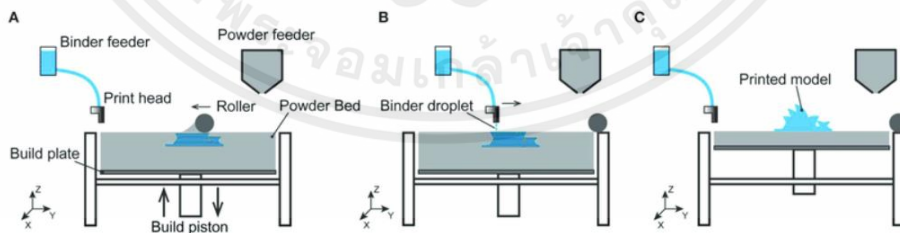
วิบัติของชั้นต่อมา เนื่องจากชั้นแรกไม่แข็งแรงพอที่จะรับน้ำหนักขององค์ประกอบในขณะที่พิมพ์ และคอนกรีตอาจมีการหดตัวระหว่างที่พิมพ์ทำให้เกิดการแตกหักได้



รูปที่ 2.2 การทำงานของ Extrusion-Based Technique.

2.1.3.2 เทคนิคแบบผง (Powder-Based Technique)

เป็นอีกหนึ่งกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูปโครงสร้างที่รูปทรงซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ โดยหัวฉีดจะทำการฉีดสารยึดเกาะลงบนฐานรองพิมพ์ (Build Plate) ที่ถูกกลิ้งได้ปาดผงซีเมนต์ให้เรียบเป็นชั้นบาง ๆ ไว้ทั่วแล้ว ซึ่งจะทำสลับระหว่างการฉีดสารยึดเกาะและการปาดผงเป็นชั้น ๆ ไป ทำให้อุณหภูมิของผงเกาะติดกันเป็นชั้น ๆ กระทั่งได้เป็นชิ้นงานรูปทรงสามมิติตามที่ต้องการแบบไว้ จากนั้นจะนำไปเป่าผงส่วนเกินออกจากชิ้นงาน เทคนิคนี้เหมาะกับการผลิตส่วนประกอบสำเร็จรูป ชิ้นงานที่มีความละเอียด ส่วนประกอบอาคารขนาดเล็ก เช่น แบบหล่อถาวร หรือโครงสร้างที่สามารถยกไปประกอบในสถานที่ได้ แต่คุณสมบัติทางโครงสร้างไม่ดีเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตอื่น ๆ เนื่องจากชิ้นส่วนต่าง ๆ ทำขึ้นโดยการหลอมรวมผงเข้าด้วยกัน คุณภาพพื้นผิวจึงขึ้นอยู่กับขนาดของผง และไม่สามารถสร้างชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้



รูปที่ 2.3 การทำงานของ Powder-Based Technique

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของเทคนิคการพิมพ์คอนกรีต 2 เทคนิค

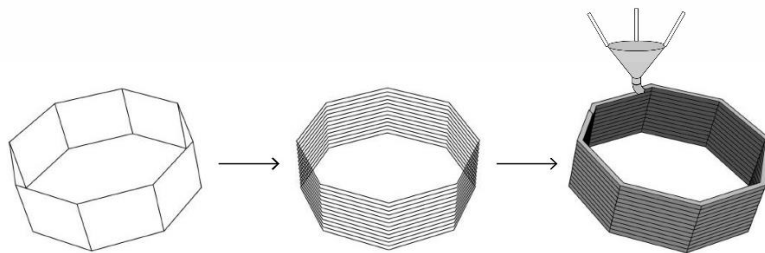
	Extrusion-Based Technique	Powder-Based Technique
ข้อดี	<ul style="list-style-type: none"> - ขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ - ขึ้นรูปชิ้นงานได้รวดเร็ว - เครื่องจักรราคาถูกกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - ขึ้นรูปชิ้นงานที่ละเอียดและซับซ้อนได้ - เศษวัสดุที่เหลือจากการขึ้นรูปนำมาใช้ใหม่ได้
ข้อจำกัด	<ul style="list-style-type: none"> - พื้นผิวชิ้นงานไม่เรียบ มีลักษณะเป็นชั้น ๆ - ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความละเอียด - อาจมีปัญหาการเชื่อมกันระหว่างชั้น - เศษวัสดุที่เหลือจากการขึ้นรูปนำมาใช้ใหม่ไม่ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เวลาขึ้นรูปนานกว่า - คุณภาพของพื้นผิวขึ้นอยู่กับขนาดของผง - คุณสมบัติทางโครงสร้างไม่ดีเท่าเทคนิคการฉีดอัด - เครื่องจักรราคาแพงกว่า

หมายเหตุ. ดัดแปลงจาก แนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์: กรณีศึกษา การออกแบบศาลาอเนกประสงค์. โดย ธนัทศักดิ์ นรเศรษฐ์, 2559

เทคนิคการพิมพ์ขึ้นรูปทั้ง 2 เทคนิค มีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้ เทคนิคการฉีดอัด (Extrusion-Based Technique) มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานมากกว่า เนื่องจากเป็นการพิมพ์ขึ้นรูปสะพาน ไม่ต้องการความละเอียดสูง และสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยเทคนิคนี้ได้มากกว่า

2.1.4 หลักการขึ้นรูปทรงชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ

การขึ้นรูปทรงชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติจำเป็นต้องมีความรู้และความเข้าใจในหลักการการทำงานของซอฟต์แวร์และเครื่องพิมพ์สามมิติ เพื่อรับรู้ถึงกระบวนการและข้อจำกัดในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีนี้ ซึ่งหลักการขึ้นรูปมีกระบวนการดังนี้ [12]



รูปที่ 2.4 หลักการขึ้นรูปทรงชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ. โดย วรณพล สดากกร, 2561

2.1.4.1 หลักการแปลงรูปทรงก่อนกระบวนการขึ้นรูป

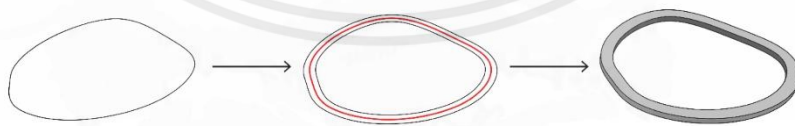
รูปทรงใด ๆ ที่ถูกนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติจะต้องผ่านกระบวนการแปลงรูปทรงตามหลักการสร้างเส้นชั้นความสูง (Contour) กระบวนการนี้เป็นการสร้างรูปทรงขึ้นใหม่อีกครั้ง ในลักษณะที่ถูกตัดแบ่งออกเป็นชั้น ๆ เพื่อให้รูปทรงมีความเหมาะสมที่จะขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ การตัดแบ่งรูปทรงในแต่ละชั้นเป็นการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีด ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ หัวฉีดจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ถูกกำหนดไว้พร้อมทั้งฉีดวัสดุออกมาในระหว่างการเคลื่อนที่ด้วย เมื่อหัวฉีดได้เคลื่อนที่และฉีดวัสดุได้ครบทุกชั้นจะได้ชิ้นงานขึ้นรูปตามรูปทรงต้นฉบับ ทั้งนี้ความละเอียดของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัว ได้แก่ ขนาดของหัวฉีด และระยะความสูงระหว่างชั้นของการตัด Contour โดยที่ความหลากหลายของตัวแปรจะทำให้ชิ้นงานมีความแตกต่างกัน คือ หัวฉีดที่มีขนาดเล็กและระยะความสูงระหว่างชั้นที่ห่างกันน้อยจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความละเอียดมากกว่าหัวฉีดที่มีขนาดใหญ่และระยะความสูงระหว่างชั้นที่ห่างกันมาก



รูปที่ 2.5 การขึ้นรูปโดยที่มีความสูงระหว่างชั้นห่างกันน้อย (ซ้าย) และห่างกันมาก (ขวา).

โดย วรณพล สดากร, 2561

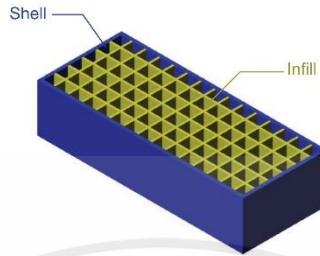
เส้นที่เกิดจากการตัดผ่านรูปทรงต้นแบบในแต่ละชั้นที่จะถูกนำมาใช้เป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีด จะต้องถูกนำมาหดเข้า (Offset) ให้เส้นรอบรูปเล็กลงตามระยะรัศมีของหัวฉีด เพื่อชดเชยพื้นที่สำหรับวัสดุที่จะถูกฉีดออกมาในแต่ละชั้นให้มีขนาดเท่ากับเส้นรอบรูปเดิมที่เกิดจากการตัดผ่านรูปทรงต้นแบบ



รูปที่ 2.6 การหดเข้า (Offset) เส้นรอบรูป. โดย วรณพล สดากร, 2561

เมื่อรูปทรงที่มีความหนา (Volume) ถูกแปลงเพื่อการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ความหนาจะถูกแปลงเป็นรูปทรงที่ประกอบด้วยเปลือก (Shell) และส่วนเติมเต็ม (Infill) ซึ่งเป็นตัวแปร 2 ตัวที่มีผลต่อมวลความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยที่เปลือก (Shell) คือกรอบของรูปทรง ความหนาของเปลือกจะนับได้เป็นจำนวนชั้น และส่วนเติมเต็ม (Infill) คือไส้ในของรูปทรง ความหนาแน่นของส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและตั้ง 9 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมเต็มจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากมวลทั้งหมด ส่วนเติมเต็มที่น้อยกว่าจะทำให้รูปทรงมีมวลน้อยลงและมีน้ำหนักเบาลง เปอร์เซ็นต์ของส่วนเติมเต็มมีผลโดยตรงกับมวลและความแข็งแรงของรูปทรง เปอร์เซ็นต์ที่น้อยลงจะทำให้มวลและความแข็งแรงของรูปทรงลดลงไปด้วย ทั้งนี้การออกแบบรูปแบบ (Pattern) ของส่วนเติมเต็มภายในรูปทรงที่เหมาะสมจะสามารถช่วยในด้านความแข็งแรงของรูปทรงได้



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของรูปทรงที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ โดย วรณพล สดากัน, 2561

การออกแบบรูปแบบ (Pattern) ของส่วนเติมเต็ม (Infill) จะต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ในที่นี้คือเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีดวัสดุในแต่ละชั้น และระหว่างชั้น ซึ่งต้องมีความเป็นไปได้ภายใต้ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของรูปแบบส่วนเติมเต็มในแต่ละชั้นด้วยเช่นกัน รูปทรงที่มีความเปลี่ยนแปลงในแต่ละชั้น ไม่ว่าจะเป็นขนาดหรือรูปทรงของเปลือก (Shell) ส่วนเติมเต็มภายในจะต้องเปลี่ยนไปตามเปลือกด้วย เพื่อให้ส่วนเติมเต็มแต่ละชั้นมีความต่อเนื่องกัน

2.1.4.2 ข้อจำกัดในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติแบบการฉีดอัด

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดหลายประการ ทั้งวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานของเครื่องพิมพ์สามมิติและคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุประเภทซีเมนต์ที่มีสถานะเป็นของเหลวที่มีความหนืดและมีน้ำหนักค่อนข้างมาก ทำให้การขึ้นรูปชิ้นงานมีข้อจำกัดดังนี้

1. รูปทรงต้องถูกแปลงให้มีลักษณะเป็นขั้นก่อนการขึ้นรูป

ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจะต้องผ่านกระบวนการแปลงรูปทรงตามหลักการสร้างเส้นชั้นความสูง (Contour) ซึ่งความละเอียดของชิ้นงานที่ได้จะขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัว ได้แก่ ขนาดของหัวฉีดและระยะความสูงระหว่างชั้นของการตัด Contour

2. ชิ้นงานขึ้นรูปต้องมีด้านใดด้านหนึ่งเป็นระนาบเรียบ

เนื่องจากจำเป็นต้องพิมพ์บนแท่นพิมพ์ที่เป็นระนาบเรียบ ดังนั้นการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องมีการทอนรูปทรงต้นแบบให้มีด้านใดด้านหนึ่งเป็นระนาบเรียบ เพื่อให้เป็นส่วนฐานของชิ้นงานที่อยู่ติดกับแท่นพิมพ์เมื่อมีการขึ้นรูป จึงจะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้

3. รูปทรงที่มีลักษณะยื่นออกจากฐานต้องมืองศาการเฉียงที่จำกัด

วัสดุที่มีน้ำหนักมากและใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานในการแข็งตัว เช่น ซีเมนต์คอนกรีต จำเป็นต้องมีฐานรองรับการขึ้นรูปในแต่ละชั้นเสมอ ทำให้การขึ้นรูปในลักษณะที่มีการยื่นออกจากฐานจะต้องมืองศาการเฉียงของรูปทรงภายในองศาที่จำกัด เพื่อไม่ให้ชั้นงานเกิดการพังทลายระหว่างขึ้นรูป โดยองศาการเฉียงที่ยอมให้จะขึ้นรูปกับคุณสมบัติและน้ำหนักของวัสดุ

4. ไม่สามารถขึ้นรูปขึ้นงานในลักษณะคานยื่นได้ถ้าไม่มีส่วนรองรับ

วัสดุที่มีน้ำหนักมากและใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานในการแข็งตัว เช่น ซีเมนต์คอนกรีต จำเป็นต้องมีฐานรองรับการขึ้นรูปในแต่ละชั้นเสมอ ทำให้การขึ้นรูปในลักษณะคานยื่นเป็นไปได้ถ้าไม่มีส่วนรองรับในระหว่างการขึ้นรูป หากต้องการขึ้นรูปขึ้นงานที่มีลักษณะเป็นคานยื่น จะต้องใช้วัสดุอื่นที่สามารถแยกออกจากขึ้นงานได้เมื่อขึ้นรูปเสร็จเป็นส่วนรองรับคานยื่นในขึ้นงาน เช่น ใช้ทรายรองรับวัสดุซีเมนต์ส่วนที่เป็นคานยื่นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป หรือต้องทอนขึ้นงานส่วนที่เป็นคานยื่นแยกออกเป็นอีกชั้นหนึ่ง แล้วออกแบบรอยต่อให้ชั้นส่วนสามารถนำมาประกอบกันภายหลังได้ จึงจะได้รูปทรงที่ต้องการ

5. การทำแบบสำหรับการพิมพ์สามมิติต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้อยู่เสมอ

การทำแบบสำหรับการพิมพ์สามมิติต้องอาศัยความเข้าใจหลักการทำงานและข้อจำกัดของเครื่องจักรและวัสดุที่ใช้พิมพ์เป็นอย่างดีเพื่อให้ได้ขึ้นงานที่มีคุณภาพ รูปทรงของเปลือก (Shell) และส่วนเติมเต็ม (Infill) ของขึ้นงานที่ถูกแปลงมาจากรูปทรงต้นแบบต้องมีลักษณะที่สัมพันธ์กันเปลือก (Shell) และส่วนเติมเต็ม (Infill) ในแต่ละชั้นต้องเป็นรูปแบบเดียวกันหรือมีลักษณะตามเปลือก (Shell) ของแต่ละชั้น เช่น การบิดรูปทรงทั้งเปลือกและส่วนเติมเต็ม การย่อหรือขยายส่วน การยืดหรือหดรูปทรง เป็นต้น

นอกจากนี้ การกำหนดเส้นทางการเดินของหัวฉีดวัสดุจะต้องทำให้เครื่องพิมพ์สามมิติสามารถฉีดวัสดุได้ตามขั้นตอนและเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง เช่น การกำหนดเส้นทางการเดินให้มีการฉีดเปลือก (Shell) 2 ชั้นก่อน จากนั้นจึงฉีดส่วนเติมเต็ม (Infill) โดยมีการเคลื่อนที่ที่หัวฉีดแบบเริ่มเคลื่อนที่วนมาจบที่จุดเดิม จะทำให้ได้ขึ้นงานที่มีรอยตะเข็บซึ่งเกิดจากจุดเริ่มและจุดจบของหัวฉีดในตำแหน่งเดียวกันทุกชั้น ทำให้ได้ขึ้นงานที่มีความเรียบร้อยมากขึ้น

6. ขนาดของขึ้นงานถูกจำกัดภายใต้ขนาดของเครื่องพิมพ์สามมิติ

ขึ้นงานใด ๆ ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติจะต้องมีขนาดเล็กกว่าขอบเขตที่เครื่องพิมพ์สามมิตินั้นสามารถพิมพ์ได้ ทั้งในแกน X แกน Y และแกน Z ในกรณีที่ขึ้นงานมีขนาดใหญ่เกินกว่าขอบเขตที่จะสามารถพิมพ์ได้ จะต้องมีการแยกส่วนขึ้นงานให้มีขนาดเล็กลงให้อยู่ภายในขอบเขตของการพิมพ์ แล้วแยกพิมพ์ทีละส่วน เครื่องพิมพ์สามมิติจึงจะสามารถพิมพ์ขึ้นส่วนได้

การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติเพื่อการขึ้นรูปชิ้นงานล้วนมีหลักการและข้อจำกัดเหล่านี้เป็นพื้นฐาน อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้สามารถประยุกต์วิธีการใช้ได้หลากหลายตามความเหมาะสมของรูปแบบงาน ทรายที่เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติยังคงมีหลักการงานเช่นเดิม และการพัฒนาเทคโนโลยียังไม่สามารถก้าวข้ามข้อจำกัดเหล่านี้ได้ การใช้งานเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติจะต้องอยู่ภายใต้หลักการและข้อจำกัดเหล่านี้ทั้งสิ้น

2.1.5 วิธีการเสริมแรงคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

วัสดุคอนกรีตสำหรับการพิมพ์สามมิติแตกต่างจากคอนกรีตทั่วไป เนื่องจากคอนกรีตถูกอัดจากหัวฉีดและพิมพ์ทีละชั้น รวมเข้าด้วยกันโดยไม่มีกริปบอดหรือสันสะเทือน ดังนั้น แนวทางที่เป็นไปได้ในการใช้การเสริมแรงแบบเดิมในคอนกรีตพิมพ์สามมิติ [18] ประกอบด้วย

เหล็กเส้น (Rebars) สามารถใช้เสริมแรงในคอนกรีตพิมพ์สามมิติได้ โดยฝังไว้ใกล้กับพื้นผิวของคอนกรีตในทิศทางตามยาวหรือแทรกในแนวตั้งลงในคอนกรีตสด เหล็กเส้นสามารถเชื่อมหรือมัดเป็นโครงเพื่อเสริมแรงให้คอนกรีตพิมพ์ อย่างไรก็ตาม การเสริมแรงในแนวตั้งด้วยเหล็กเส้นมีข้อระวังคืออาจทำให้โครงสร้างคอนกรีตสดที่พิมพ์ออกมาพังทลายลงได้

แผ่น FRP (Fiber-Reinforced Polymer) สามารถยึดติดกับพื้นผิวคอนกรีตที่บ่มแล้ว หลังจากกระบวนการพิมพ์ทั้งหมดเช่นเดียวกับคอนกรีตหล่อในที่ทั่วไป ในขณะที่ยังคงประสิทธิภาพเท่าเดิม สำหรับการเสริมแรงด้วยไฟเบอร์ เส้นใยจะถูกผสมในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอหลังจากคอนกรีตแข็งตัว เมื่อคอนกรีตเสริมเหล็กไฟเบอร์อยู่ภายใต้แรงภายนอก เฉพาะส่วนของเส้นใยที่ไม่ขนานกับระนาบรอยแตกและความกว้างของรอยแตกเท่านั้น จะช่วยควบคุมรอยร้าวอย่างมีประสิทธิภาพ การวางแนวเส้นใยที่แตกต่างกันทำให้คอนกรีตพิมพ์มีความต้านทานการแตกร้าวแบบหลายทิศทาง วิธีการเสริมแรงนี้มีศักยภาพที่ดีในการนำไปใช้กับคอนกรีตพิมพ์สามมิติ เนื่องจากสามารถควบคุมการวางแนวและตำแหน่งของเส้นใยได้ในระหว่างกระบวนการพิมพ์

ลวดตาข่าย (Wire Mesh) ยังคงเหมาะสำหรับใช้เสริมแรงคอนกรีตพิมพ์สามมิติ เนื่องจากพื้นที่ผิวเหล็กขนาดใหญ่ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งการประสานคอนกรีตภายในกริดจะเป็นประโยชน์ต่อการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตและลวดเหล็ก นอกจากนี้ คุณสมบัติน้ำหนักเบาจะช่วยลดการเสียรูปของชั้นระหว่างการพิมพ์ได้อย่างมากในขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวและไม่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักของคอนกรีตพิมพ์ชั้นถัดไป และไม่สามารถรับน้ำหนักลวดตาข่ายเสริมแรงได้

วิธีเสริมแรงแบบดึงเหล็กทีหลัง (Post-Tension) ค่อนข้างเป็นไปได้ในการเสริมแรงให้คอนกรีตพิมพ์สามมิติ เนื่องจากสามารถดึงลวดอัดแรง (Tendon) หลังจากการบ่มคอนกรีตได้ แต่วิธีเสริมแรงแบบดึงเหล็กก่อน (Pre-Tension) ไม่สามารถทำได้ในการเสริมแรงคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

เนื่องจากการดึงสายเคเบิลในพื้นที่การพิมพ์เป็นเรื่องยากสำหรับการใช้เครื่องพิมพ์สามมิติในการทำงานอย่างต่อเนื่อง

การเสริมแรงคอนกรีตพิมพ์สามมิติ สามารถทำได้ทั้งก่อนการพิมพ์ ระหว่างการพิมพ์ และ หลังการพิมพ์ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

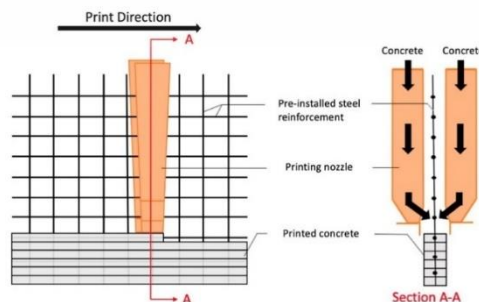
2.1.5.1 การเสริมแรงก่อนการพิมพ์ (Pre-Installed Reinforcement)

Contour Crafting (CC) ถูกพัฒนาโดย Khoshnevis เป็นการนำคอนกรีตมาพิมพ์เป็นแบบหล่อ จากนั้นจะเทหล่อคอนกรีตในช่องว่าง ซึ่งเหล็กเส้นแนวตั้งหรือลวดตาข่าย สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคการพิมพ์ CC ได้ โดยติดตั้งภายในแบบหล่อที่ถูกพิมพ์ออกมาก่อนที่จะทำการเทหล่อคอนกรีต ส่วนเหล็กเส้นแนวนอน สามารถวางระหว่างชั้นการพิมพ์ (Layer) หรือแทรกลงในแต่ละชั้นการพิมพ์ระหว่างกระบวนการพิมพ์ได้ โดยวิธี CC มีประสิทธิภาพและเหมาะสมในการสร้างส่วนประกอบคอนกรีตแนวตั้ง เช่น ผนังและเสา อย่างไรก็ตาม เมื่อผนังมีความโค้งในแนวตั้งทำให้วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัด



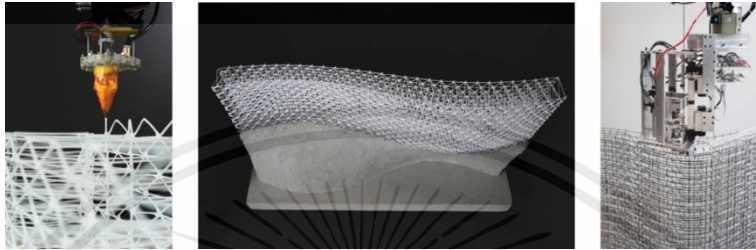
รูปที่ 2.8 Contour Crafting (CC)

การเสริมแรงโดยวางเหล็กเส้นแนวตั้งและแนวนอนในตำแหน่งเสริมแรง สำหรับระบบการพิมพ์ที่มีหัวฉีด 2 หัว วิธีนี้ถูกพัฒนาโดย HuaShang และคณะ โดยระหว่างกระบวนการพิมพ์ หัวฉีดทั้งสองจะประกบด้านข้างของแนวเหล็กเสริมและฉีดพิมพ์คอนกรีตเป็นชั้น ๆ ไป วิธีนี้จึงจำกัดความอิสระในการออกแบบรูปทรงผนัง



รูปที่ 2.9 การเสริมแรงในแนวตั้งและแนวนอน

แนวคิดแม่พิมพ์ตาข่าย (The Mesh Mould Concept) ถูกพัฒนาขึ้นที่ ETH Zurich วิธีนี้ใช้โครงสร้างตาข่ายสามมิติเพื่อเสริมกำลังคอนกรีตพิมพ์ โดยคอนกรีตจะถูกฉีดผ่านเข้าไปในส่วนที่เป็นช่องว่างของแบบหล่อที่ทำจากโพลีเมอร์ที่ผ่านการอัดขึ้นรูป หรือเหล็กเส้นที่ผ่านการตัด การตัด และการเชื่อม โครงสร้างตาข่ายสำเร็จรูปนี้ทำหน้าที่เป็นทั้งการเสริมแรงและแบบหล่อ stay-in-place จึงช่วยประหยัดทั้งวัสดุและแบบหล่อ แต่โครงสร้างตาข่ายนี้ไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานแรงกระทำของโครงสร้าง วิธีนี้จึงจำกัดให้ใช้เฉพาะกับส่วนประกอบที่ไม่ใช่โครงสร้าง

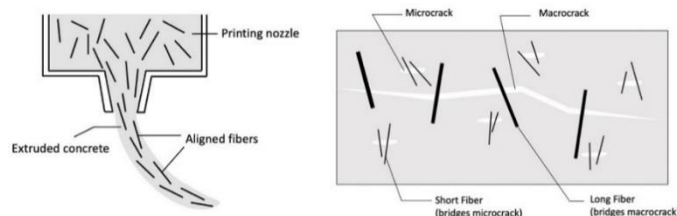


รูปที่ 2.10 แนวคิดแม่พิมพ์ตาข่าย

2.1.5.2 การเสริมแรงระหว่างการพิมพ์ (In-Process Reinforcement)

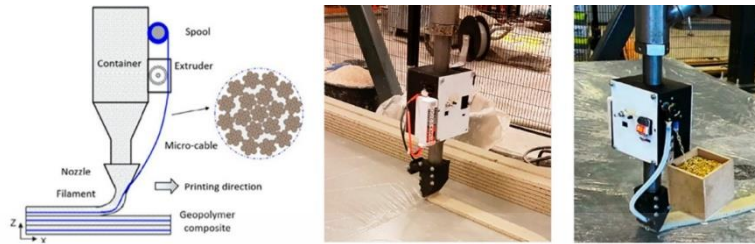
วิธีการเสริมแรงในกระบวนการติดตั้งช่วยให้การพิมพ์และเสริมแรงสามารถทำได้พร้อมกันโดยอัตโนมัติ ซึ่งช่วยประหยัดเวลามากขึ้น โดยประกอบด้วย

การเสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (เส้นใยคาร์บอน แก้ว หินบะซอลต์ หรือเส้นใยเหล็ก) โดยการใส่เส้นใยสั้น ๆ ผสมกับคอนกรีตและส่วนผสมอื่น ๆ จะช่วยเพิ่มความต้านทานแรงเฉือน แรงอัด และแรงดึงของคอนกรีตที่พิมพ์และบ่ม ซึ่งจะมีทั้งการเลือกใช้เส้นใยขนาดเดียวพิมพ์ออกมาให้เส้นใยอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางการพิมพ์ โดยปรับขนาดของหัวฉีดให้มีขนาดเล็ก และการเลือกใช้เส้นใยเหล็กหลายขนาด โดยปรับขนาดหัวฉีดให้ใหญ่ขึ้น เพื่อเพิ่มความต้านทานแรงดึง สามารถช่วยยืดรอยแตกของคอนกรีต และเพิ่มความเหนียวหลังจากการแตกแล้ว ซึ่งการใช้เส้นใยหลายขนาดเหมาะสมกว่าในการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของคอนกรีต แต่วิธีการนี้ยังคงมีข้อจำกัดคือความแข็งแรงที่ได้ยังไม่เพียงพอต่อการสร้างองค์ประกอบคอนกรีตขนาดใหญ่โดยไม่ต้องเสริมแรงเพิ่มเติม



รูปที่ 2.11 การเสริมแรงด้วยไฟเบอร์

ระบบการพิมพ์คู่ ซึ่งประกอบด้วยหัวฉีดสำหรับพิมพ์คอนกรีตและเครื่องอัดรีดสำหรับวางสายเคเบิลขนาดเล็ก เช่น เคเบิลเหล็ก ลวดสลิง โซเหล็ก เพื่อพิมพ์คอนกรีตและวางไมโครเคเบิลไปพร้อมกัน



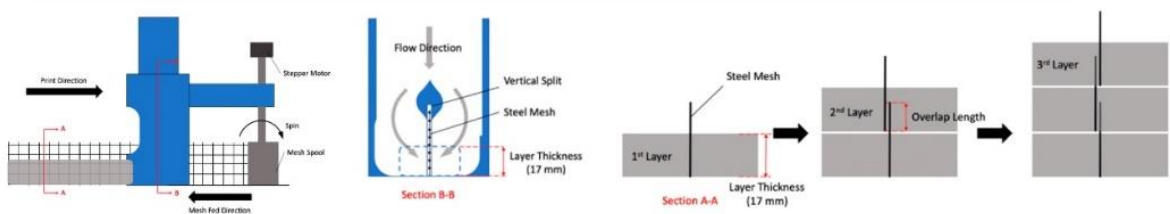
รูปที่ 2.12 ระบบการพิมพ์คอนกรีตร่วมกับการเสริมแรงอย่างต่อเนื่อง

การเสริมแรงด้วยเหล็กเสริมที่คล้ายลวดเย็บกระดาษ ซึ่งไม่เพียงแต่จะช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างชั้นเท่านั้น แต่ยังเพิ่มความสมบูรณ์ของโครงสร้างด้วย เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับบริเวณที่อ่อนแอจึงมีการเย็บลวดเหล็กแทรกและซ้อนทับกันเป็นรูปตัว “X” วิธีการเสริมแรงนี้มีความยืดหยุ่นและความสามารถในการควบคุมที่สูง



รูปที่ 2.13 การเสริมแรงด้วยเหล็กเสริมที่คล้ายลวดเย็บกระดาษ

การเสริมแรงด้วยตาข่ายเหล็ก (Steel Mesh) โดยการฝังไว้ในแนวตั้งขณะพิมพ์ผนังคอนกรีต แล้วหัวฉีดที่มีรอยแยกตรงกลางจะฉีดคอนกรีตจากทั้ง 2 ด้าน



รูปที่ 2.14 การเสริมแรงด้วยตาข่ายลวดเหล็กในแนวตั้ง

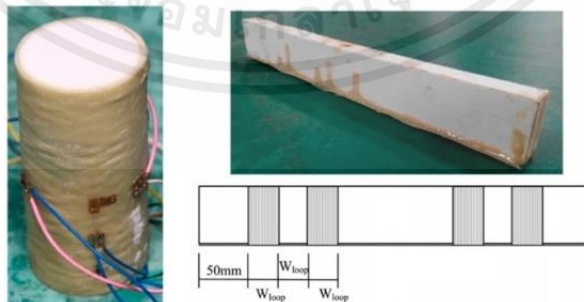
2.1.5.3 การเสริมแรงหลังการพิมพ์ (Post-Installed Reinforcement)

การเสริมแรงโดยใช้เหล็กเส้นภายนอก โดย Asprone และคณะ ได้พัฒนาคานคอนกรีตพิมพ์เสริมแรงโดยใช้เหล็กเส้นภายนอก โดยคานคอนกรีตถูกพิมพ์อย่างอิสระในทิศทางความหนา จากนั้นบล็อกคอนกรีตกลางจะถูกประกอบและยึดด้วยเหล็กเส้นเพื่อสร้างโครงสร้างคาน ในกรณีนี้เหล็กเส้นมีหน้าที่จับแต่ละชั้นส่วนให้เข้าที่และเสริมแรงภายนอกภายใต้เงื่อนไขของแรงกระทำ ปลายทั้งสองด้านของเหล็กเส้นงอเพื่อใส่ไปในช่องที่ทำขึ้นในคอนกรีต จากนั้นจึงเติมปูนเพื่อยึดเหล็กเส้นไว้ เนื่องจากเหล็กโค้ง การเสริมแรงดังกล่าวจึงสามารถให้ความต้านทาน in-plane และ out-of-plane แก่คานได้



รูปที่ 2.15 คานคอนกรีตพิมพ์เสริมแรงโดยใช้เหล็กเส้นภายนอก

การใช้แผ่นโพลีเมอร์เสริมใยแก้ว (GFRP) ห่อชั้นส่วนคอนกรีตพิมพ์ โดย Feng และคณะ ทำการห่อเสาและคอนกรีตพิมพ์ด้วยแผ่น GFRP โดยใช้กระบวนการ hand-lay-up หลังจากพิมพ์ชั้นส่วนคอนกรีตเสร็จ วิธีนี้มีความคล้ายกับการใช้แผ่น FRP ห่อคอนกรีตทั่วไป ซึ่งสามารถเปลี่ยนโหมดการวิบัติของเสาคอนกรีตจากเปราะเป็นเหนียว จึงช่วยให้ต้านทานแรงกระทำได้มากขึ้นก่อนจะเกิดการแตกร้าว



รูปที่ 2.16 การเสริมแรงชั้นส่วนคอนกรีตพิมพ์โดยหุ้มด้วยแผ่น FRP

วิธีเสริมแรงแบบดึงเหล็กที่หลัง (Post-Tension) สามารถนำมาใช้เสริมแรงหลังกระบวนกรพิมพ์คอนกรีตได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้าง ซึ่งชิ้นส่วนของคอนกรีตจะพิมพ์เป็นโครงสร้างกลวงทำให้ใช้วัสดุน้อยลง ช่องที่สร้างขึ้นในระหว่างกระบวนกรพิมพ์ทำหน้าที่เป็นท่อไว้สอดเคเบิล Post-Tension และเกร้าท์หลังจากการดึงเคเบิลเหล็ก ในช่วงต้นปี 2011 วิธีการนี้ถูกใช้ที่มหาวิทยาลัย Loughborough ในอังกฤษเพื่อพิมพ์มันั่งคอนกรีต สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กพิมพ์ 3 มิติแห่งแรกของโลกซึ่งถูกพิมพ์ที่ TU/e โดยใช้เคเบิลเหล็กอัดแรงตามยาวและยึดกับบล็อกคอนกรีตหล่อเสริมเหล็ก อีกทั้งยังมีเสาคอนกรีตพิมพ์ที่ถูกพัฒนาโดย Silva และคณะ และคานคอนกรีตพิมพ์ที่ถูกพัฒนาโดย Vantyssem และคณะ



รูปที่ 2.17 การเสริมแรงคอนกรีตพิมพ์ด้วยวิธี Post-Tension

การเสริมแรงคอนกรีตพิมพ์สามมิติมีแนวทางที่เป็นไปได้ในการใช้วิธีการเสริมแรงแบบเดิมได้หลายแนวทาง อย่างไรก็ตาม จากคุณลักษณะ ข้อจำกัดของแต่ละวิธี และหลาย ๆ งานวิจัยของต่างประเทศพบว่า การนำวิธีการเสริมแรงแบบดึงเหล็กที่หลัง (Post-Tension) มาใช้กับงานก่อสร้างสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ มีแนวโน้มที่จะเป็นไปได้และมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการเสริมแรงรูปแบบอื่น

2.2 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM, Finite Element Analysis : FEA) [5] เป็นวิธีการหนึ่งในการนำมาวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน โดยปกติแล้วปัญหาประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกัน รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสม ค่าของผลเฉลยแม่นยำตรงซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่แท้จริงของปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่าง ๆ กัน ตามตำแหน่งของรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ค่าเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ จำนวนอนันต์ค่า ซึ่งในทางปฏิบัติจะหาไม่ได้ จึงทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน

วิธีการดังกล่าวซึ่งบ่งเป็นนัยว่า ผลเฉลยโดยประมาณของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้ปัญหานั้น ๆ ซึ่งหมายความว่า หลักการ

ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเริ่มต้นจากการพิจารณาที่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้ากัน ก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่หาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่นี้ แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของรูปร่างปัญหานั้น

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น ๆ นอกจากนี้ความแม่นยำของผลเฉลยยังขึ้นอยู่กับการสมมติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (International Function) ที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชัน การประมาณภายในเอลิเมนต์อาจสมมติให้อยู่ในหลายรูปแบบ เช่น รูปแบบของการกระจายเชิงเส้นตรง (Linear Distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด (Magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (Node) ของเอลิเมนต์

2.3 ปรัชญาวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างสะพานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยการวิเคราะห์และออกแบบสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติขนาดเล็ก ผู้วิจัยได้เลือกงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.3.1 Design of a 3D printed concrete bridge by testing โดย Theo A.M. Salet และคณะ, 2018

สะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติแห่งแรกของโลกได้ถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีไอนด์โฮเฟิน (Eindhoven University of Technology) หรือ TU/e ตามแนวคิด Design by Testing สะพานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการต่อเส้นทางจักรยาน Lieve Vrouwensteeg ของหมู่บ้าน Gemert ประเทศเนเธอร์แลนด์ ใช้ข้ามคลองท้องถิ่นขนาดเล็กชื่อว่า Peelse Loop ความยาว 6.5 เมตร และกว้าง 3.5 เมตร น้ำหนักบรรทุกออกแบบที่กระจายสม่ำเสมอเท่ากับ 5.0 KN/m^2 ส่วนประกอบของสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ประกอบด้วยโครงสร้างสะพานที่พิมพ์เป็นช่องกลวงเรียงกัน 2 แถว เสริมแรงด้วยการใช้เคเบิลในเส้นคอนกรีตพิมพ์ร่วมกับกระบวนการ Post-Tension มีการเพิ่มกำแพงคอนกรีตที่ปลายสะพานทั้ง 2 ด้าน เพื่อยึดลวดอัดแรงซึ่งเป็นลวด 7-wire ตัวสะพานวาง

อยู่บนฐานรากเสาเข็มเนื่องจากสภาพดินอ่อน และใช้คุณสมบัติวัสดุสำหรับการออกแบบโครงสร้างตาม Weber 3D 115-1 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าวัสดุที่ออกแบบไม่สอดคล้องกับการกำหนดมาตรฐานคอนกรีต (C30/37 และอื่น ๆ) การออกแบบในขั้นสุดท้ายได้หน้าตัดของสะพานมีขนาด 3440 x 920 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพิมพ์มีขนาด 60 มิลลิเมตร ความยาวสะพาน 8.0 เมตร ทำการทดลองพิมพ์สะพานจริง โดยลดขนาดในอัตราส่วน 1:2 เพื่อทำการทดสอบอย่างละเอียดถี่ถ้วนทั้งในด้านโครงสร้างและการก่อสร้าง มีการทดลองประกอบเพื่อระบุปัญหาและอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ก่อนจะพิมพ์สะพานตามขนาดจริงตามที่ออกแบบไว้ เพื่อแสดงให้เห็นว่าสะพานเป็นไปตามข้อกำหนดบังคับอาคารของเนเธอร์แลนด์ และนำไปประกอบ เสริมแรงด้วยวิธี Post-Tension สุดท้ายสะพานนี้เปิดบริการในวันที่ 17 ตุลาคม 2017 และตอนนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างทางปั่นจักรยานรอบเมือง Gemert ประเทศเนเธอร์แลนด์



รูปที่ 2.18 แนวคิดการออกแบบสะพานจักรยาน 3DPC

Table 1. Structural properties of Weber 3D 115-1 print mortar, as used in the structural design of the bridge.

Property	Dir.	Age	Symbol	Value
Density		28 days	ρ	2,000 kg/m ³
Modulus of elasticity		28 days	E	19,000 MPa
Average compressive strength	u	28 days	$f_{c,u}$	23.2 MPa
	v	28 days	$f_{c,v}$	21.5 MPa
	w	28 days	$f_{c,w}$	21.0 MPa
Average tensile strength (also used for flexural tension)	u	28 days	$f_{t,u}$	1.9 MPa
	v	28 days	$f_{t,v}$	1.6 MPa
	w	28 days	$f_{t,w}$	1.3 MPa
Creep factor ^a		7 days	ϕ_7	1.0
		14 days	ϕ_{14}	2.5
		56 days	ϕ_{56}	3.0
Shrinkage		7 days	ϵ_7	0.6
		14 days	ϵ_{14}	1.2
		56 days	ϵ_{56}	1.5

^aAfter 28 days.

Notes: For the directional dependency, a relative orientation of axis u, v, w is used (Bos *et al.*, 2016), indicating the direction parallel to the print in the horizontal plane, perpendicular to the print direction in the horizontal plane, and vertically perpendicular to the print direction (or parallel to the robot arm), respectively.

รูปที่ 2.19 คุณสมบัติที่ใช้ออกแบบตาม Weber 3D 115-1



รูปที่ 2.20 การประกอบและอัดแรงด้วยวิธี Post-Tension

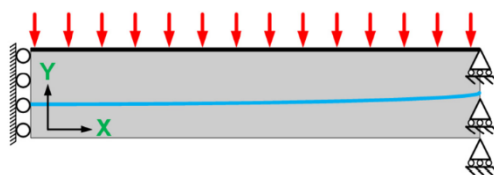
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและที่ 19 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 สะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

2.3.2 3D Printing of a Post-Tensioned Concrete Girder Designed by Topology Optimization โดย Giejan Vantighem และคณะ, 2020

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและกระบวนการผลิตที่ผสมผสานระหว่างการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ การทำ Topology Optimization และกระบวนการ Post-Tension ของโครงสร้างคอนกรีต โดยออกแบบคานที่มีส่วนรองรับอย่างง่าย (Simply-Supported Beam) ภายใต้แรงกระทำที่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.22 สำหรับ Topology Optimization จะใช้โดเมนสี่เหลี่ยมที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความสูง 10 : 1 แบ่งองค์ประกอบขนาด 300 x 30 ช่องเพื่อทำไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่ช่ององค์ประกอบสัมพันธ์กับความหนาแน่นของวัสดุต่าง ๆ เพื่อหาตำแหน่งของจุดที่จะเสริมแรงได้ดีที่สุด ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 2.23 จากนั้นผลลัพธ์ Topology-Optimized ถูกสร้างเป็นแบบจำลอง 3D ดังรูปที่ 2.24 ด้วยโปรแกรม Autodesk Fusion 360 แนวคิดคือแบ่งเป็นคอร์คกลางและคอร์คบน โดยคอร์คกลางทำเป็นวงกลมกลวงเพื่อสอดลวด Post-Tension คอร์คบนทำเป็นทางเดินที่ไม่กว้างเกินไปเพื่อไม่ให้เกิดแรงดึงตามขวาง มีความยาวคาน 4.0 เมตร สายเคเบิล Post-Tension ใช้ลวดอัดแรง 7-wire จำนวน 1 เส้น คานแบ่งพิมพ์เป็นช่วง ๆ และเชื่อมรอยต่อด้วยวัสดุยาแนว ปลายทั้งสองด้านประกอบด้วยบล็อกคอนกรีตหล่อ การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ กำหนดให้เคเบิลมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.2 มิลลิเมตร ไม่คิดแรงเสียดทานระหว่างเคเบิลกับคอนกรีต คุณสมบัติของวัสดุแสดงดังรูปที่ 2.25 อ้างอิงตามข้อกำหนดของ EN 1992-1-1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตถูกจำกัดที่ 20 MPa และความต้านทานแรงดึงถูกจำกัดที่ 1.35 MPa ได้ผลการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.22 การตั้งค่าเพื่อทำ Topology Optimization ของคานช่วงเดียว



รูปที่ 2.23 Topology Optimization (ลึดำแทนคอนกรีต, สีขาวแทนช่องว่าง, สีเขียวแทน Tendon)



รูปที่ 2.24 ภาพจำลอง 3D โดยไม่มีบล็อคที่จุดปลาย (ฝั่งซ้าย) และมีบล็อคที่จุดปลาย (ฝั่งขวา)

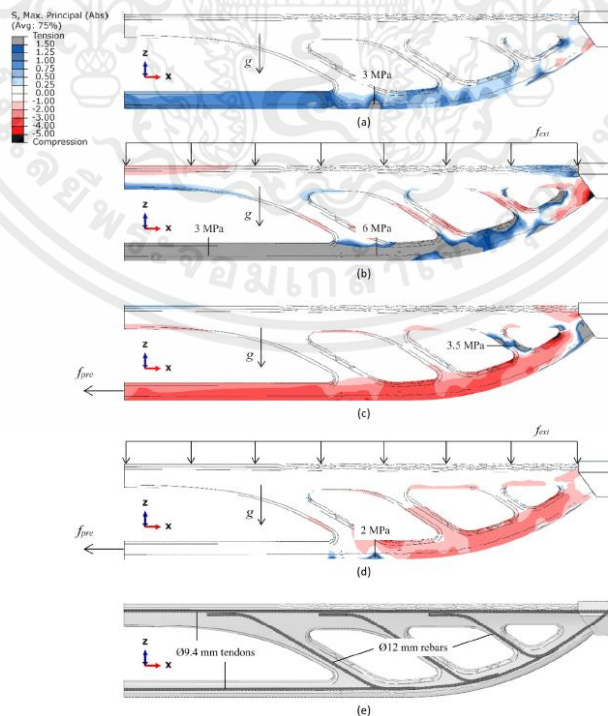
Material properties used in the FE-model.

Material	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio (-)	Density (kg/m ³)
Concrete (C30/37)	32,800	0.2	2500
Steel	190,000	0.3	7800

Strand properties.

Type	3/8"
Diameter (mm)	9.3
A _p (mm ²)	52
f _{pk} (N/mm ²)	1860
Max. prestress force (kN)	77.4

รูปที่ 2.25 คุณสมบัติของวัสดุ



รูปที่ 2.26 ความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกกรณีต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 21อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ (a) ความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักของคานเท่านั้น (b) ความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักคาน และน้ำหนักบรรทุกจร (c) ความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักคานและกระบวนการ Post-Tension (d) ความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักคาน น้ำหนักบรรทุกจร และกระบวนการ Post-Tension (e) การเพิ่มเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรอีก 2 เส้น เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการออกแบบ

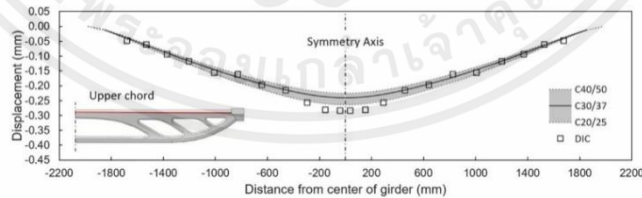
สะพานที่ผูกพิมพ์ขึ้นได้รับการทดสอบในด้านต่าง ๆ เช่น การรับน้ำหนัก การเสียรูป หรือ การต้านแรงสั่นสะเทือน เพื่อให้มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและเป็นไปตามมาตรฐานทางวิศวกรรม โดยผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลการตรวจสอบค่าการแอ่นตัวของคานที่พิมพ์จริงแสดงดังรูป 2.29



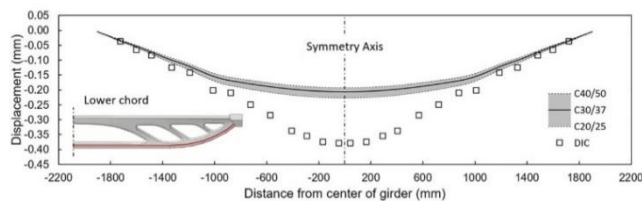
รูปที่ 2.27 การพิมพ์ขึ้นส่วน ตำแหน่งการเสริมแรง กระบวนการประกอบและเกร้าท์รอยต่อ



รูปที่ 2.28 การติดตั้งเครื่องวัดค่าการแอ่นตัว



(a)



(b)

รูปที่ 2.29 การแอ่นตัวของคานที่พิมพ์ขึ้นจริง

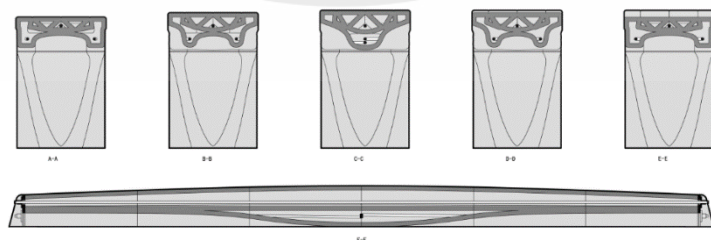
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 22 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยคอร์คอบน a) แสดงความเบี่ยงเบนเล็กน้อยจากค่า FEA และคอร์คกลาง b) หน้าตัดกลาง คานแสดงความเบี่ยงเบนที่สูงกว่าค่าจาก FEA สิ่งนี้บ่งบอกความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งลวดอัดแรงใน คอร์คกลางและความคลาดเคลื่อนบริเวณรอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ Post-Tension ดังนั้น ใน โครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นจึงจำเป็นต้องแก้ปัญหาในส่วนนี้

2.3.3 Digital Design and Fabrication of a 3D Concrete Printed Prestressed Bridge

โดย Qiang Zhan และคณะ, 2021

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการรวมระบบอัดแรง Post-Tension เข้ากับโครงสร้างคอนกรีตพิมพ์ สามมิติ โดยใช้ช่องว่างของส่วนประกอบคอนกรีตพิมพ์สามมิติเพื่อวางลวดอัดแรง ความต้านทานแรงดึง ของลวดอัดแรงและคุณสมบัติการบีบอัดของคอนกรีตรวมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างโครงสร้างคล้ายคานที่มี น้ำหนักเบาแต่มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้สูง โดยกระบวนการทดลองเริ่มต้นด้วยการวิจัยวัสดุ ทดสอบวัสดุเพื่อให้ได้พารามิเตอร์ประสิทธิภาพของวัสดุ การทำ Toolpath Optimization เพื่อออกแบบ รูปทรงสะพานให้เหมาะสม ดังรูป 2.30 จึงได้คานอัดแรงที่มีความยาว 4.7 เมตร กว้าง 0.6 เมตร ในการ วิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สะพานประกอบด้วยลวดอัดแรง 2 เส้น อยู่ที่ส่วนล่างของตัว สะพานเพื่อให้ส่วนประกอบที่พิมพ์ออกมาของตัวสะพานบีบอัดได้เต็มหน้าตัด ปลายทั้งสองข้างเป็นส่วน รองรับแบบยึดหมุน และคุณสมบัติของวัสดุแสดงดังรูป 2.31 ภายใต้น้ำหนักบรรทุกจร 4.5 KPa และ วิเคราะห์ในกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span) และครึ่งช่วง (Half Span) ได้ผลลัพธ์ดังรูป 2.32 โดยกระบวนการพิมพ์ใช้เวลา 3 วัน บ่ม 21 วัน และประกอบ 2 ชั่วโมง ใช้แรงงานแต่ละขั้นตอนไม่เกิน 3 คน น้ำหนักรวมของสะพานประมาณ 600 กิโลกรัม หรือประมาณ 1/4 ของน้ำหนักคอนกรีต 1 m³ ซึ่งเป็นการ เน้นย้ำประสิทธิภาพของการพิมพ์คอนกรีตสามมิติทั้งในเรื่องของเวลา อิสระในการขึ้นรูป การใช้ แรงงานที่น้อยกว่า ประหยัดวัสดุมากกว่า เนื่องจากสามารถกระจายเนื้อวัสดุไปที่จุดสำคัญได้ง่ายกว่า และ โครงสร้างมีน้ำหนักเบา

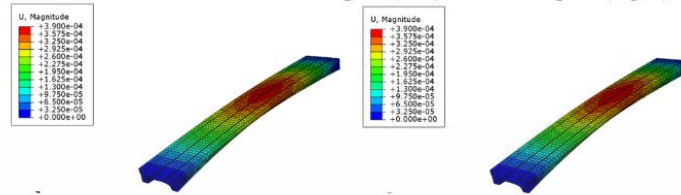


รูปที่ 2.30 ภาพตัดขวางของสะพาน

Material	strength	Young's modulus
Φ15 PSB 830 finish rolled rebar	830MPa (tensile strength)	200GPa
3D printed part	40MPa (Compressive strength)	20GPa

รูปที่ 2.31 คุณสมบัติของวัสดุ

Table 4. deformation of full span (left) and half span (right).



รูปที่ 2.32 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 2.33 การประกอบชิ้นส่วนเป็นคานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

จากการศึกษาทั้งทฤษฎีและปรัทัศน์วรรณที่เกี่ยข้อง ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติมาประยุกต์กับการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็ก เพื่อนำเสนอแนวคิดในการวิเคราะห์และออกแบบรายละเอียดสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีดังกล่าว โดยออกแบบเป็นสะพานคอนกรีตอัดแรง (Post-Tension) และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้าง ทั้งนี้ การบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้อยู่ภายใต้ข้อจำกัดของเทคโนโลยีที่ผู้วิจัยสามารถเข้าถึงได้ ณ ช่วงเวลาของการทำวิจัย และระยะเวลาการทำวิจัยที่จำกัด

บทที่ 3

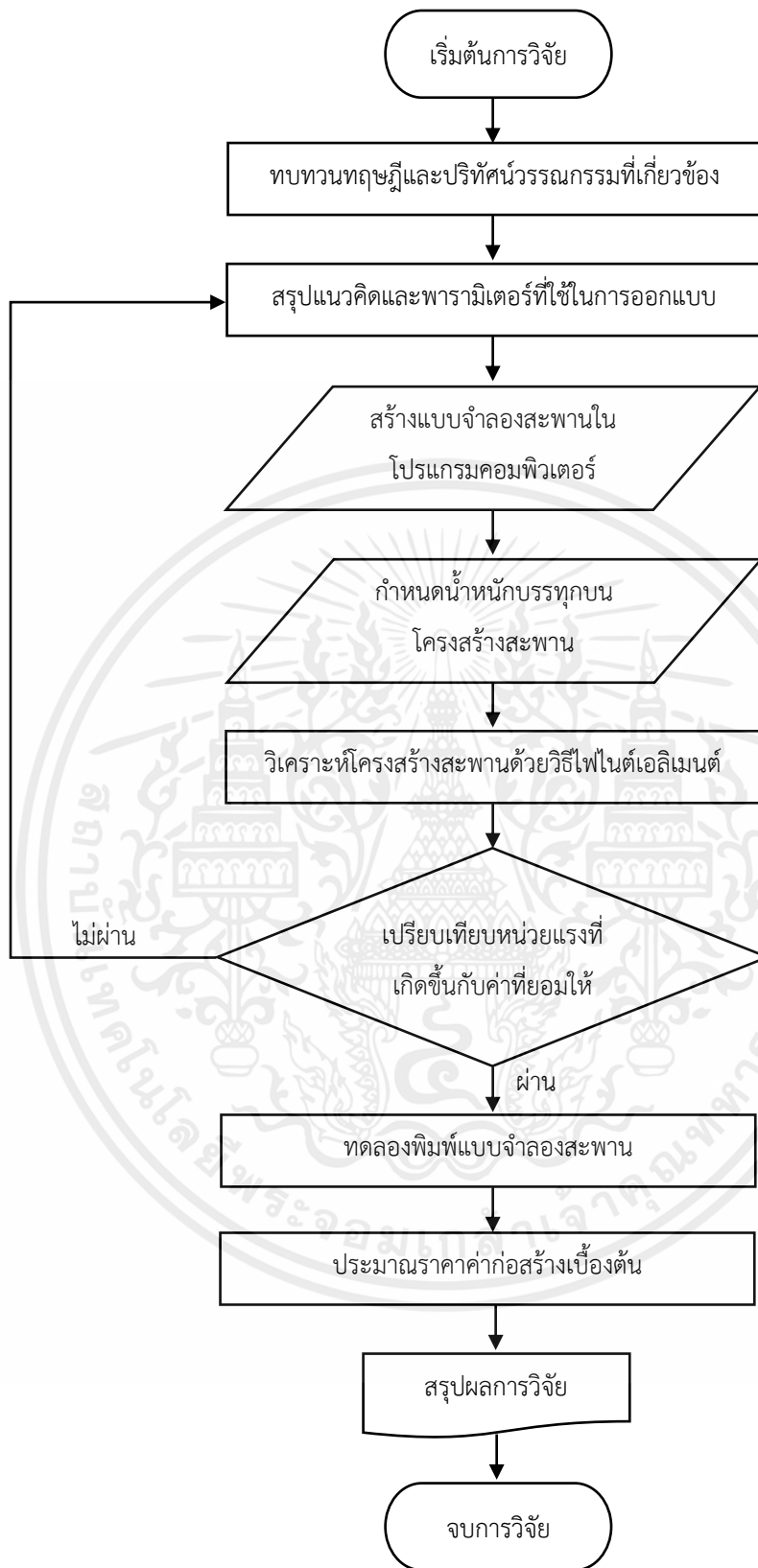
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์และออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประมาณค่าหน่วยแรงสูงสุดที่จะเกิดขึ้นและค่าการแอ่นตัวสูงสุดของสะพานที่สภาวะการใช้งาน แล้วนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงและค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) เพื่อให้สะพานที่ออกแบบมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและเป็นไปตามมาตรฐานทางวิศวกรรม จากนั้นทดลองนำแบบจำลองไปพิมพ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการพิมพ์ขึ้นรูปก่อนการพิมพ์จริงด้วยวัสดุคอนกรีต

ในส่วนของบทนี้จะอธิบายรายละเอียดของวิธีการดำเนินงานแต่ละขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลักดังหัวข้อต่อไปนี้

- 3.1 ข้อจำกัดในงานวิจัย
- 3.2 การสำรวจพื้นที่
- 3.3 แนวคิดการออกแบบและสร้างแบบจำลอง
- 3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 3.5 การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับฐานรองรับที่ปลายสะพาน (End Block)
- 3.6 ทดลองพิมพ์แบบจำลองสะพานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

ซึ่งสามารถสรุปเป็นแผนผังภาพรวมของการดำเนินงานวิจัยได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย. โดย ผู้วิจัย, 2565

3.1 ข้อจำกัดในงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในลักษณะการวิจัยและทดลอง เพื่อหาแนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ซึ่งมีรายละเอียดทางด้านข้อจำกัดดังนี้

3.1.1 ศึกษาภายใต้ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติในประเทศไทย เนื่องจากเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิตียังคงไม่แพร่หลายในวงการก่อสร้างของประเทศไทย ส่งผลให้มีข้อจำกัดในการเข้าถึงเทคโนโลยี

3.1.2 ศึกษาภายใต้ข้อจำกัดของงบประมาณในการทดลองและทำงานวิจัย เนื่องจากเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ จำเป็นต้องใช้ต้นทุนในด้านการผลิตและราคาเครื่องจักรค่อนข้างสูง ส่งผลให้ไม่สามารถทดลองพิมพ์ขึ้นรูปแบบจำลองสะพานด้วยวัสดุคอนกรีตได้

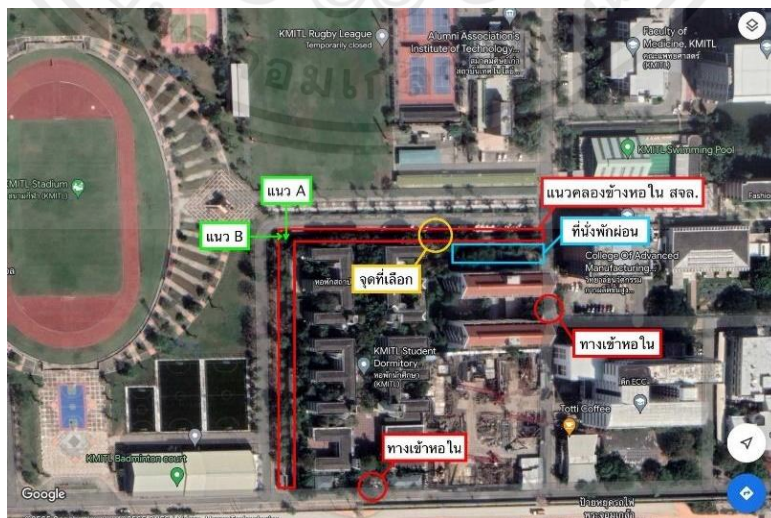
3.1.3 ศึกษาภายใต้ข้อจำกัดของระยะเวลาที่ใช้ในการทำวิจัย โดยผู้วิจัยเริ่มต้นศึกษาและดำเนินการตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2565 ถึง 31 พฤษภาคม 2566

3.2 การสำรวจพื้นที่

ผู้วิจัยได้สำรวจตำแหน่งที่คาดว่าจะสามารถวางสะพานคนข้ามคอนกรีตพิมพ์สามมิติได้ โดยข้อพิจารณา ประกอบด้วย

- เป็นตำแหน่งทางน้ำที่มีความกว้างประมาณ 4.0 - 5.0 เมตร
- เป็นบริเวณที่เอื้อต่อการวางสะพานให้สามารถใช้ประโยชน์ได้จริง

จากการสำรวจในบริเวณพื้นที่ของ สจล. พบว่า ตำแหน่งที่ตั้งที่มีความเหมาะสม คือ คลองโดยรอบหอในของ สจล. โดยแบ่งเป็นเส้นคลองแนว A และ B ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนที่แสดงรายละเอียดตำแหน่งการวางสะพานในบริเวณ สจล. โดย ผู้วิจัย, 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 27 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลองในแนว A และ B อยู่ใกล้กับสนามกีฬาของ สจล. โดยคลองในแนว A มีความกว้างประมาณ 10 เมตร คลองแนว B มีความกว้างอยู่ในช่วง 4 - 5 เมตร ผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกแนวคลอง B เนื่องจากมีความกว้างไม่เกิน 5.0 เมตร ซึ่งทำให้ช่วงความยาวของสะพานไม่มากเกินไป อีกทั้งมีจุดนั่งพักผ่อนอยู่ใกล้เคียง ซึ่งสะพานคนข้ามในบริเวณนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้ ทั้งในแง่ของความสะดวกในการสัญจร และหากหอน้ำมันโยบายเพิ่มประตูบริเวณรั้ว ณ ตำแหน่งคลองแนว B ในอนาคต จะทำให้นักศึกษาที่พักในหอในสามารถเดินไปสนามกีฬาได้เร็วขึ้น

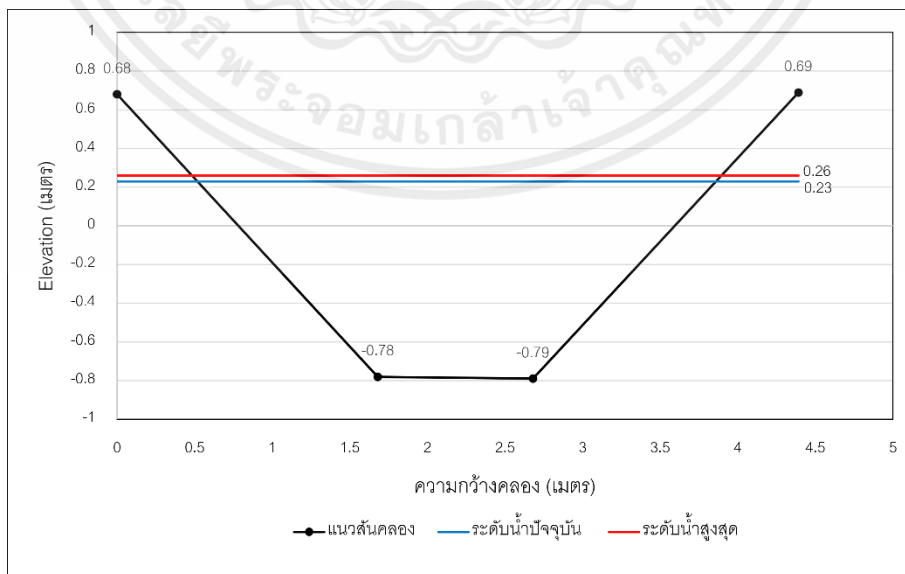


(ก)

(ข)

รูปที่ 3.3 คลองโดยรอบหอใน สจล. ก) แนว A ข) แนว B. โดย ผู้วิจัย, 2565

จากการทำปฏิบัติการงานสำรวจ พบว่า คลองแนว B มีความกว้าง 4.40 เมตร หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีความลึก 1.50 เมตร ระดับน้ำสูงสุดประมาณ 1.05 เมตร ความลาดเอียงตาดด้วยคอนกรีตและหิน บริเวณด้านข้างประกอบด้วย คันดินติดถนน ความกว้างประมาณ 0.55 เมตร และอีกด้านเป็นพื้นที่โล่งที่ปูด้วยบล็อกตัวหนอน



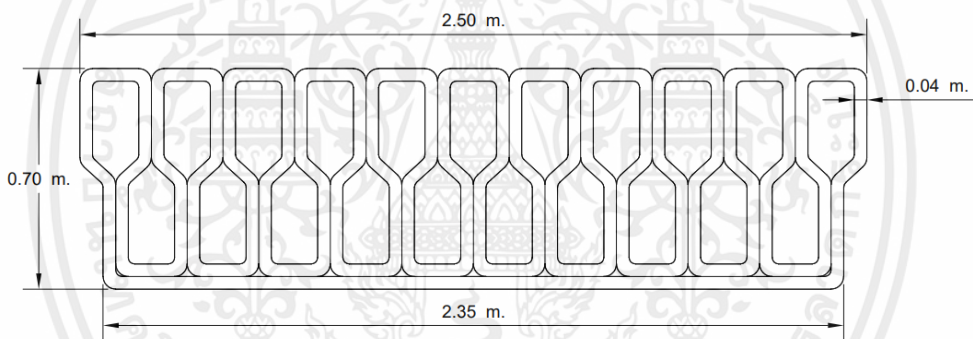
รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางคลองแนว B. โดย ผู้วิจัย, 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 28 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แนวคิดการออกแบบและสร้างแบบจำลอง

สะพานที่ออกแบบเป็นสะพานคนข้ามขนาดเล็ก ใช้ข้ามคลองน้ำขนาดเล็กที่มีความกว้าง 4.4 เมตร การกำหนดขนาดความกว้างและความยาวของสะพาน ใช้แนวทางในการกำหนดระยะห่างจากขอบสะพานเท่ากับ 32.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างบุคคลเท่ากับ 25 เซนติเมตร ระยะสำหรับคนเดินเท้าเท่ากับ 70 เซนติเมตร และระยะสำหรับผู้ขี่จักรยานเท่ากับ 75 เซนติเมตร [9] เมื่อพิจารณาเผื่อถึงกรณีคนเดินเท้าสวนกัน คนขี่จักรยานสวนกัน และคนเดินเท้าสวนคนขี่จักรยาน จึงกำหนดให้สะพานควรมีความกว้าง 2.50 เมตร ความยาว 5.0 เมตร

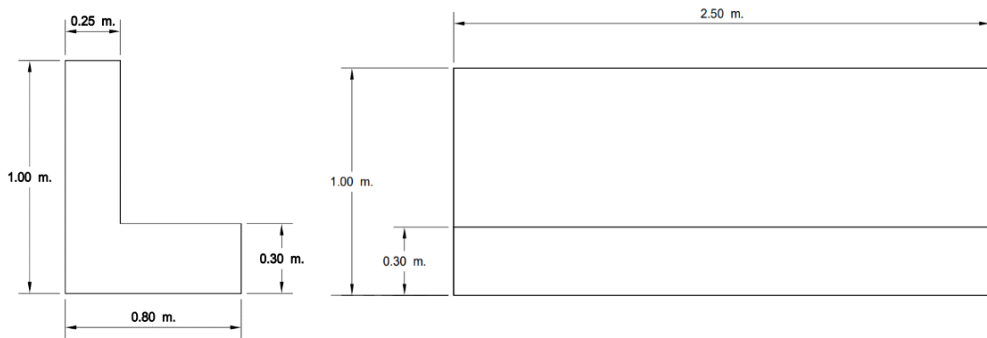
ในการออกแบบรูปแบบหน้าตัดของสะพาน จะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปพิมพ์ขึ้นรูป ข้อจำกัดต่าง ๆ ของเครื่องพิมพ์สามมิติ และความยากง่ายในการก่อสร้าง โดยผู้จัดทำอ้างอิงรูปแบบของหน้าตัดสะพานจากงานวิจัยที่ศึกษา [17] ซึ่งผ่านการพิสูจน์แบบจำลองและพิมพ์ใช้จริงแล้ว โดยทำการปรับพารามิเตอร์ของขนาดเป็นความกว้าง 2.5 เมตร ความลึก 0.7 เมตร และใช้ขนาดหัวพิมพ์เท่ากับ 0.04 เมตร และเลือกใช้โปรแกรม AutoCAD ในการเขียนแบบ 2D และกำหนดขนาด ดังรูปที่ 3.5



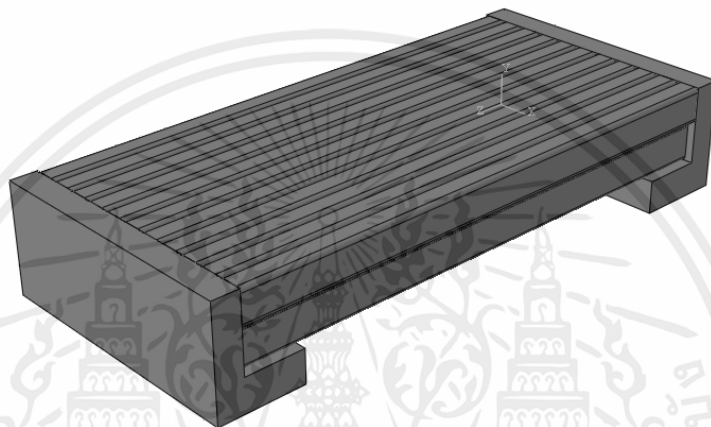
รูปที่ 3.5 หน้าตัดสะพาน. ดัดแปลงจาก *Design of a 3D printed concrete bridge by testing*.

โดย ผู้วิจัย, 2565

การออกแบบรูปหน้าตัดได้คำนึงถึงการกำหนดเส้นทางในขั้นตอนการพิมพ์ เพื่อให้หัวพิมพ์สามารถเคลื่อนที่มาจบที่จุดเริ่มต้นได้ และโครงสร้างจะมีลักษณะเป็นช่องกลางที่คอร์ดบนและล่าง เพื่อสอดลวดอัดแรง (Post-Tension) ซึ่งจะยึดรั้งกับฐานแม่คอนกรีต (End Block) ที่ปลายทั้งสองฝั่งของสะพาน โดยส่วนฐานนั้นถูกกำหนดให้มีรูปหน้าตัดเป็นตัวแอล (L-Shape) เพื่อให้มีส่วนที่สามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งมีขนาดและสัดส่วนเบื้องต้นแสดงดังรูปที่ 3.6 และสร้างเป็นแบบจำลอง 3D ได้ดังรูปที่ 3.7 เพื่อนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.6 ขนาดและสัดส่วนเบื้องต้นของส่วนรองรับที่ปลายสะพาน. โดยผู้วิจัย, 2565



รูปที่ 3.7 แบบจำลองสะพานคนข้ามคอนกรีตพิมพ์สามมิติ. โดย ผู้วิจัย, 2565

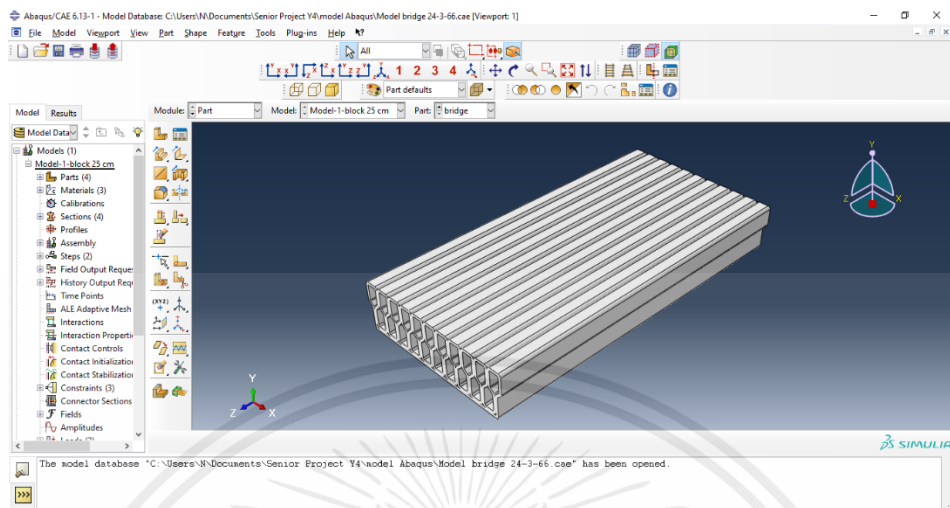
3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้โปรแกรม Abaqus CAE ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม เป็นซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาทางด้านโครงสร้างโดยทั่วไปและขั้นสูง ทั้งแบบ Linear และ Nonlinear ที่มีพฤติกรรมแรงภายนอกแบบ Static และ Dynamics รวมถึงปัญหา Multiphysics ในแบบต่าง ๆ ที่มีโมเดลของวัสดุที่หลากหลาย ประกอบกับการคำนวณที่แม่นยำ และมีทางเลือกของตัวแปรและวิธีการที่หลากหลาย Abaqus ประกอบด้วยระบบการคำนวณ 2 ส่วนหลัก ๆ คือ แบบ Standard หรือ Implicit เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา Static ทั่วไป และแบบ Explicit ที่เหมาะสำหรับปัญหาการกระแทก การชน และ FSI ซึ่งขั้นตอนการทำไฟไนต์เอลิเมนต์มีดังนี้

3.4.1 สร้างส่วนประกอบชิ้นงาน (Part)

การนำเข้าแบบจำลอง 3D จากโปรแกรม AutoCAD ที่ Export ด้วยไฟล์ประเภท ACIS (*.sat) โดยเลือกที่ File > Import > Part > เลือกไฟล์แบบจำลองประเภท .sat > จะขึ้นหน้าต่าง Create

Part form ACIS file ให้เลือก Scale > Use transform form file, including scale > OK จะได้ Part แต่ละส่วนของแบบจำลองดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวอย่าง Part ของแบบจำลองสะพาน. โดย ผู้วิจัย, 2565

3.4.2 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุและคุณสมบัติของ Section (Property)

คอนกรีตสำหรับพิมพ์สะพานจะต้องมีคุณสมบัติแตกต่างจากคอนกรีตทั่วไป เนื่องจากคอนกรีตพิมพ์ต้องมีความข้นเหลวที่เหมาะสมให้สามารถไหลผ่านท่อและฉีดอัดได้ (Extrudability) เมื่อถูกฉีดจากหัวฉีดจะต้องมีความสามารถอยู่ได้ด้วยตัวเอง (Buildability) ไม่เหลวจนเกินไป และระยะเวลาในการก่อตัว (Open time) จะต้องมีความสัมพันธ์กับรูปแบบของโครงสร้าง ความเร็วในการฉีด และการเคลื่อนที่ของหัวพิมพ์ แต่เนื่องด้วยคุณสมบัติของคอนกรีตพิมพ์ยังไม่กำหนดเป็นที่แน่ชัดและยากที่จะระบุ งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้คุณสมบัติของคอนกรีตพิมพ์เทียบเท่ากับคุณสมบัติของคอนกรีตอัดแรงเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ศึกษา [14] โดยมีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 400 กก./ cm^2 (สำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกที่ 28 วัน) โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการออกแบบเท่ากับ 334,467 กก./ cm^2

ส่วนฐานแผ่คอนกรีต (End Block) ที่ปลายของสะพานทั้งสองฝั่งถูกออกแบบให้เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 240 กก./ cm^2 (สำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกที่ 28 วัน) โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการออกแบบเท่ากับ 245,952 กก./ cm^2

ลวดอัดแรงที่ใช้สำหรับกระบวนการ Post-Tension คือ ลวดเกลียวอัดแรงชนิด ลวด 7 เส้น (7-wire) การคลายแรงดึงต่ำ (Low relaxation) ตามมาตรฐาน มอก. 420-2534 สอดไว้ที่คอร์บอนจำนวน 5 เส้น และคอร์ดล่างจำนวน 10 เส้น

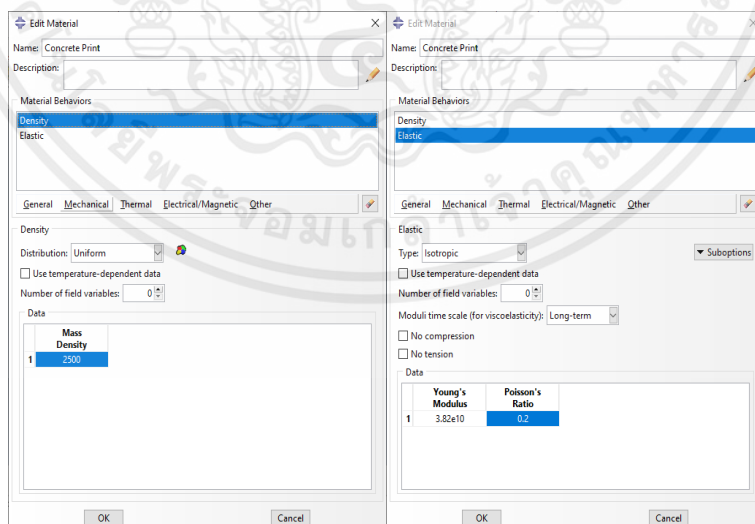
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ใน FE-model

วัสดุ	ความหนาแน่น (กก./ม. ³)	โมดูลัสยืดหยุ่น (นิวตัน/ม. ²)	อัตราส่วนปัวซอง
คอนกรีตพิมพ์	2500	3.28×10^{10}	0.2
คอนกรีตธรรมดา	2400	2.41×10^{10}	0.2
ลวดอัดแรง	7850	1.93×10^{10}	0.3

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิด ลวด 7 เส้น (7-wire) การคลายแรงดึงต่ำ (Low relaxation) ตามมาตรฐาน มอก. 420-2534

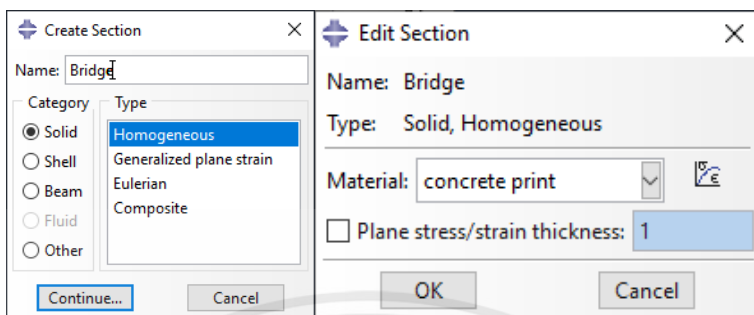
เกรด	1860	
เส้นผ่านศูนย์กลาง	15.24	มม.
พื้นที่หน้าตัด	140	มม. ²
แรงดึงที่จุดประลัย	26580	กก.
แรงดึงที่จุดคูลาก ที่ 1% หน่วยการยึดตัว	23922	กก.

กำหนดคุณสมบัติของวัสดุโดยเลือกที่ Property > Create Material > และกำหนดคุณสมบัติ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.9

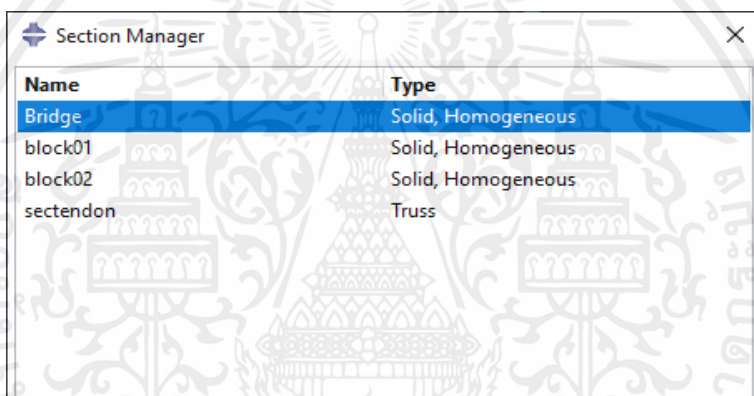


รูปที่ 3.9 ตัวอย่างวิธีกำหนดคุณสมบัติวัสดุที่ใช้วิเคราะห์. โดย ผู้วิจัย, 2565

ทำการสร้าง Section โดยเลือกที่ Create Section > กำหนด Category และ Type > Continue > เลือก Material สำหรับ Section นั้น ๆ > OK ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.10 จากนั้น Assign Section ให้แต่ละ Part



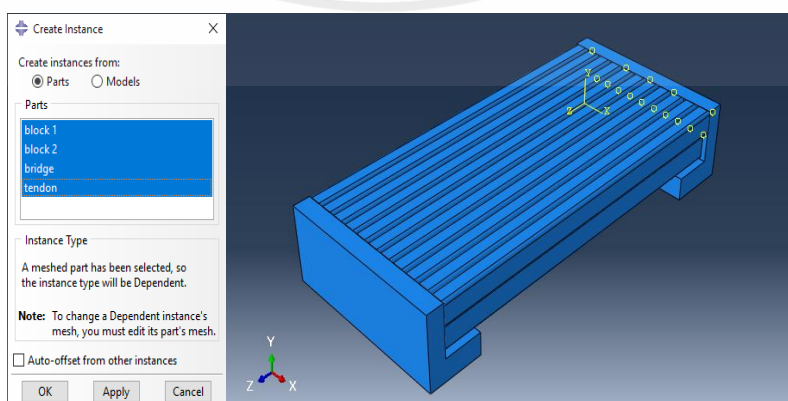
รูปที่ 3.10 กำหนดประเภทและวัสดุให้ section. โดย ผู้วิจัย, 2565



รูปที่ 3.11 ประเภทและวัสดุของทุก section. โดย ผู้วิจัย, 2565

3.4.3 ประกอบ Part เป็นแบบจำลอง (Assembly)

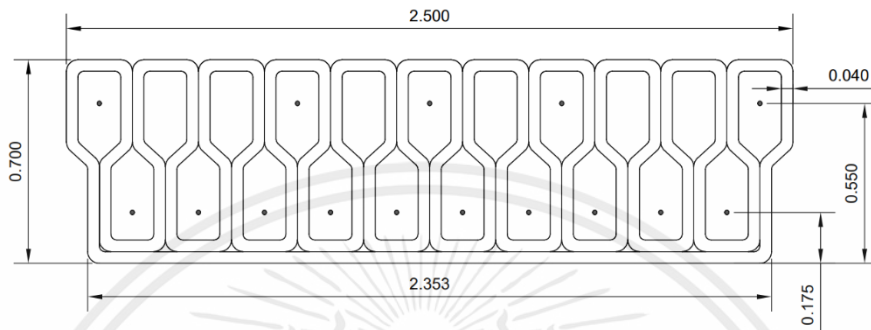
โดยเลือกที่ Assembly > Create Instance > เลือกทุก Part > OK ดังแสดงในรูปที่ 3.12 จะเป็นการนำทุก Part มาประกอบร่วมกัน



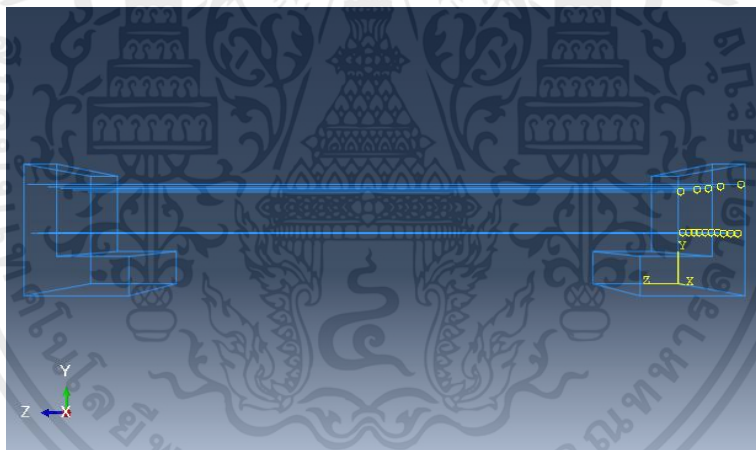
รูปที่ 3.12 ประกอบ Part แบบจำลอง. โดย ผู้วิจัย, 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองสะพานประกอบด้วยลวดอัดแรงจำนวน 15 เส้น โดยกำหนดแนววางลวดในคอร์กลางจำนวน 10 เส้น เพื่อรับแรงดึงที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนล่างของสะพานเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากระทำ ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้สะพานเกิดการแอ่นตัวลงและแตกร้าวบริเวณด้านล่าง ส่วนคอร์ด้านบนใส่ลวดอัดแรงจำนวน 5 เส้น เพื่อต้านทานโมเมนต์ดัด โดยลวดอัดแรงจะฝังตัวในฐานแผ่คอนกรีตทั้งสองด้าน ส่วนเส้นลวดบริเวณที่ลอดผ่านช่องว่างของสะพานจะไม่มีกรวยยึดเหนี่ยว



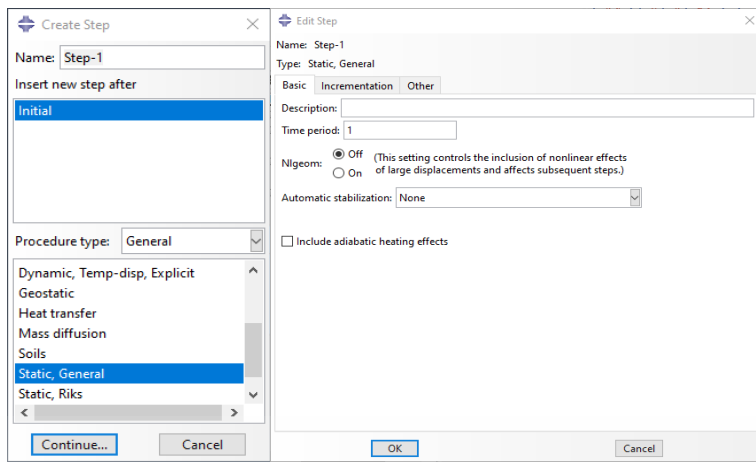
รูปที่ 3.13 แนวการวางลวดอัดแรง. โดย ผู้วิจัย, 2565



รูปที่ 3.14 การวางลวดอัดแรงใน Abaqus CAE. โดย ผู้วิจัย, 2565

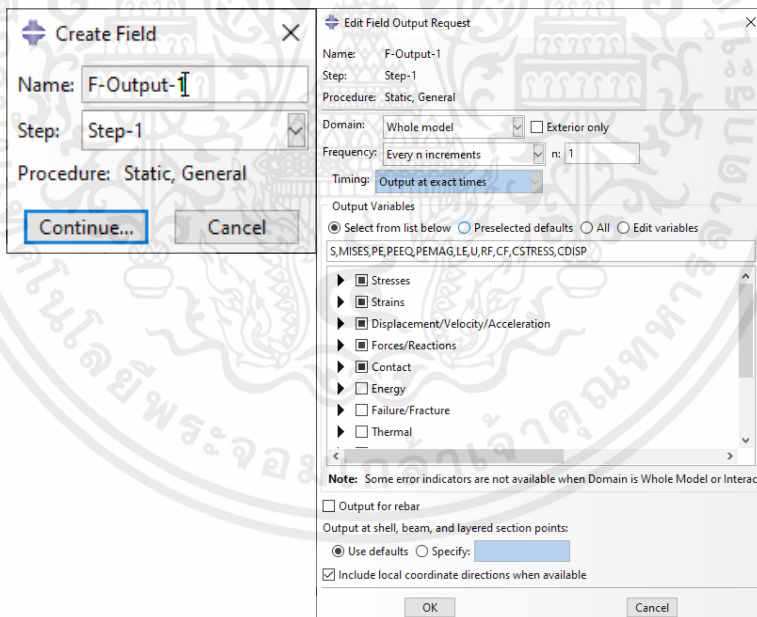
3.4.4 กำหนดรูปแบบการวิเคราะห์และผลลัพธ์ที่ต้องการ (Step)

สะพานคนข้ามจะวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกในรูปแบบน้ำหนักบรรทุกสถิตย์ (Static load) โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาน้ำหนักบรรทุกรูปแบบไดนามิก (Dynamic load) [8] การกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์ทำโดย เลือกที่ Step > Create Step > Static, General > Continue > OK

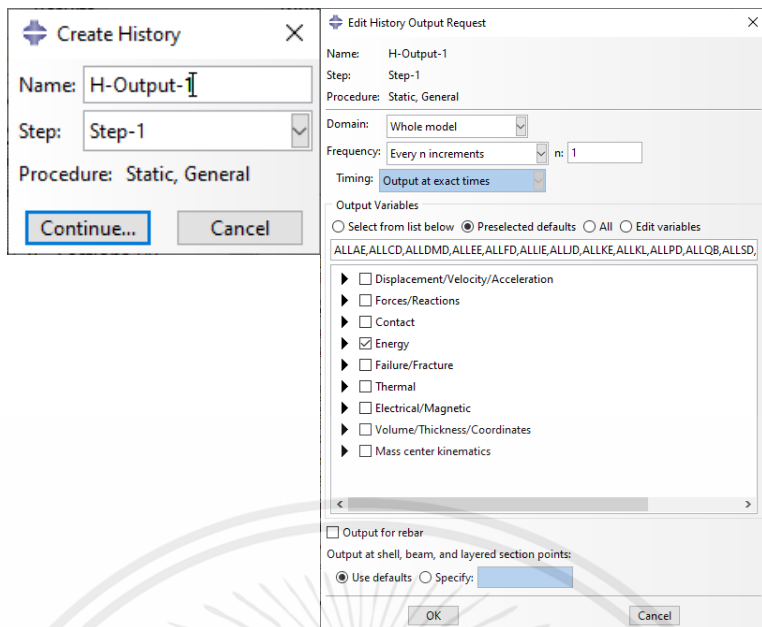


รูปที่ 3.15 กำหนดรูปแบบการวิเคราะห์. โดย ผู้วิจัย, 2565

ผลลัพธ์ที่ต้องการวิเคราะห์จากการทำไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองสะพานประกอบด้วย ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น (Stress) และค่าการแอ่นตัวของสะพาน (Displacement) ซึ่งกำหนดโดยเลือกที่ Create Field Output และ Create History Output ได้ดังรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 ตามลำดับ



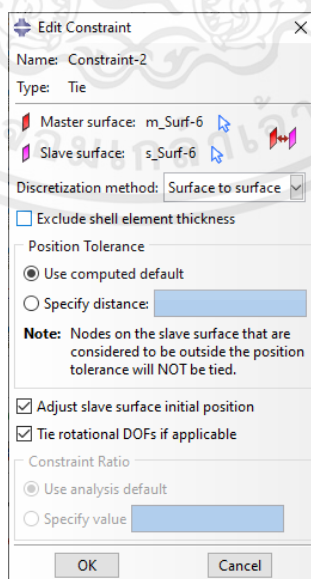
รูปที่ 3.16 กำหนด Field Output. โดย ผู้วิจัย, 2565



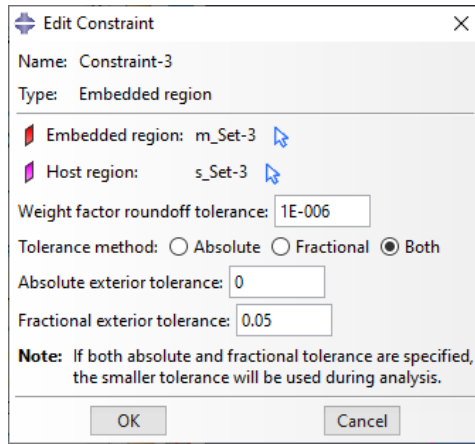
รูปที่ 3.17 กำหนด History Output. โดย ผู้วิจัย, 2565

3.4.5 การเชื่อมต่อ (Interaction)

เลือกที่ Interaction > Create Constraint กำหนดให้พื้นที่เชื่อมต่อระหว่างสะพานกับคอนกรีต End block เป็นประเภท Tie โดยกำหนด End block เป็น Master surface และสะพานเป็น Slave surface ทำเช่นเดียวกันทั้งสองฝั่ง ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.18 ส่วนพื้นที่เชื่อมต่อระหว่างคอนกรีต End block กับลวดอัดแรงเป็นประเภท Embedded region โดยลวดอัดแรงเป็น Embedded region และ End block เป็น Host region ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 การเชื่อมต่อระหว่างสะพานกับคอนกรีต End block. โดย ผู้วิจัย, 2565



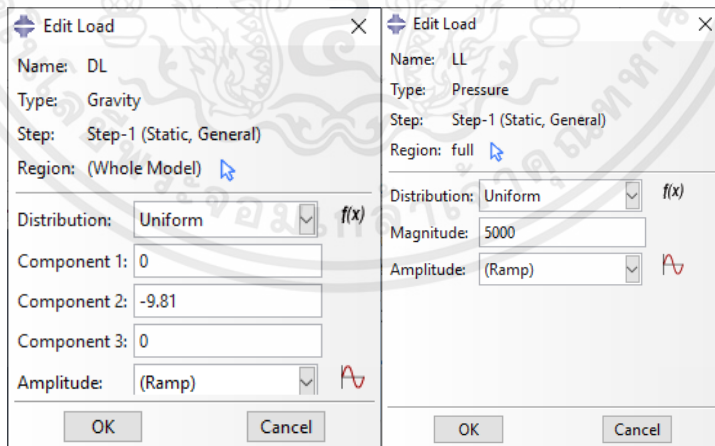
รูปที่ 3.19 การเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีต End block กับลวดอัดแรง. โดย ผู้วิจัย, 2565

3.4.6 กำหนดน้ำหนักบรรทุก (Load)

น้ำหนักบรรทุกประกอบด้วย น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) จากโครงสร้าง และ น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ซึ่งในการออกแบบสะพานคนข้ามกำหนดให้น้ำหนักบรรทุกจรคนเดินเท้า เป็นน้ำหนักบรรทุกแผ่สม่ำเสมอ (Uniform Load) เท่ากับ 90 psf. [8] จึงประมาณค่าเท่ากับ 5000 นิวตัน/ม.² แบบจำลองไม่ได้ถูกออกแบบให้มีราวสะพาน นอกจากนี้ยังไม่พิจารณาน้ำหนักบรรทุกจาก แรงลม และแรงแผ่นดินไหว

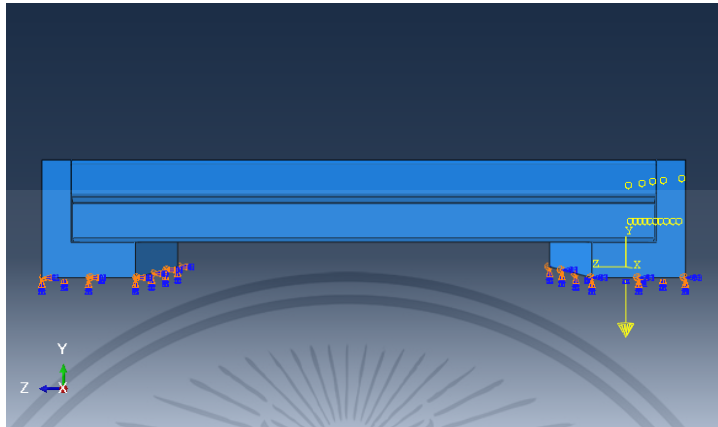
กำหนดโดยเลือกที่ Load > Create Load > กำหนดชื่อ ประเภท และน้ำหนัก ดังรูปที่

3.20



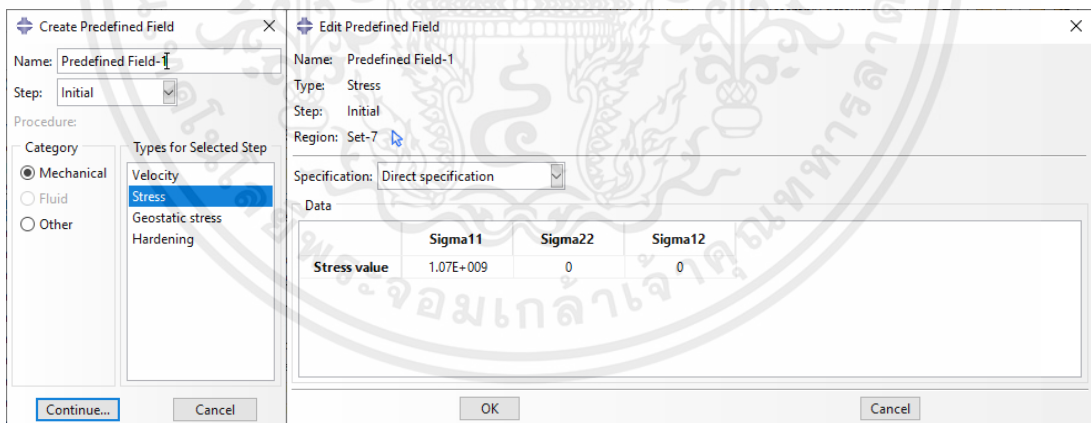
รูปที่ 3.20 กำหนดค่า DL และ LL. โดย ผู้วิจัย, 2565

แบบจำลองสะพานมีลักษณะเป็นคานช่วงเดียว (Single-Span Beam) ส่วนรองรับถูกกำหนดเป็นแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ไม่ได้ (Hinge) และแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ได้ (Roller) โดยเลือกที่ Create Boundary Condition > Displacement/Rotation และเลือกตำแหน่งที่เป็นส่วนรองรับ ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 กำหนดส่วนรองรับ (Supports). โดย ผู้วิจัย, 2565

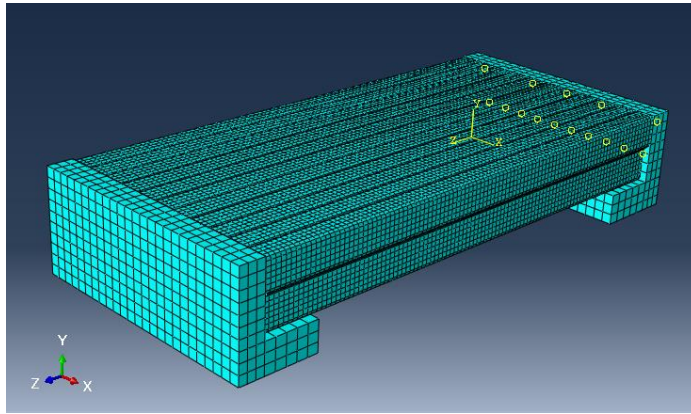
แรงดึงลวดอัดแรงที่ใช้ ได้ปรับลดค่าจากงานวิจัยที่ศึกษา [17] มีค่า 140 กิโลนิวตัน กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรง 1.40×10^{-4} ม.² ดังนั้น ค่าความเค้นที่ใส่ไปในลวดอัดแรงจึงเท่ากับ 1.00×10^9 นิวตัน/ม.² ตามแนวแกน โดยเลือกที่ Create Predefined Field และกำหนดค่าดังรูปที่ 3.22



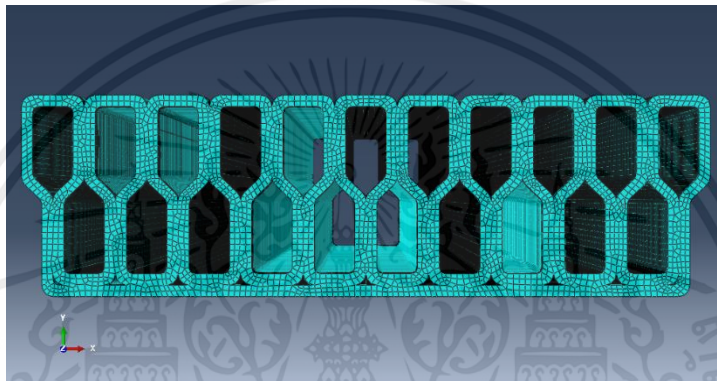
รูปที่ 3.22 กำหนดความเค้นในลวดอัดแรง. โดย ผู้วิจัย, 2565

3.4.7 แบ่งเอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์ (Mesh)

ทำการแบ่งเอลิเมนต์ทั้งสะพาน ฐานแผ่คอนกรีต (End Block) และลวดอัดแรง โดยเลือกที่ Mesh > Part > Seed Part > กำหนด Approximate global size > Apply > OK จากนั้นเลือก Mesh Part > Yes และใช้รูปร่างของ element เป็น Hex



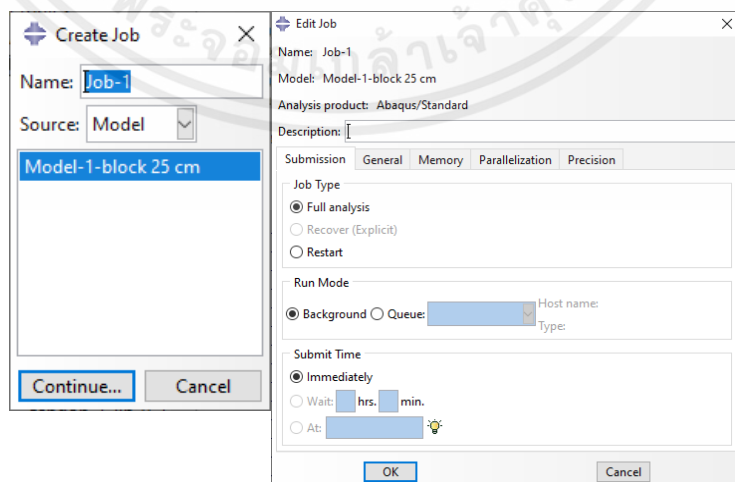
รูปที่ 3.23 การเม็ชแบบจำลอง. โดย ผู้วิจัย, 2565



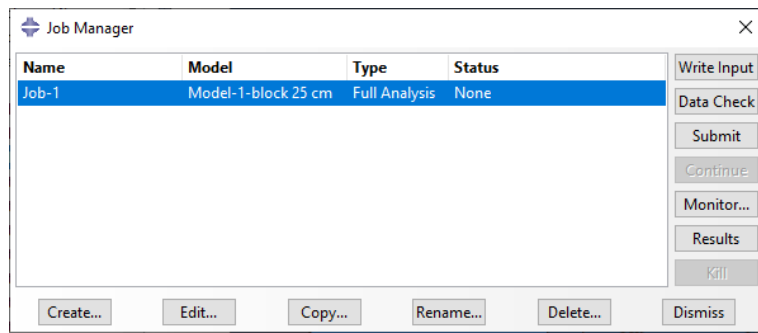
รูปที่ 3.24 การเม็ชหน้าตัดสะพาน. โดย ผู้วิจัย, 2565

3.4.8 กำหนดงานเพื่อส่งไปวิเคราะห์ (Job)

การสร้างงานเพื่อส่งไปวิเคราะห์ผลทำได้โดยเลือกที่ Job > Job Create > Continue > OK จากนั้นไปเลือก Job Manager > เลือกงาน แล้วเลือก Data Check ก่อน หรือจะ Submit ก็ได้เช่นกัน



รูปที่ 3.25 กำหนดงาน. โดย ผู้วิจัย, 2565



รูปที่ 3.26 ส่งงานไปวิเคราะห์ผล. โดย ผู้วิจัย, 2565

3.4.9 ตูมผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ (Visualization)

ผลของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จะพิจารณาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น (Stress) และค่าการแอ่นตัว (Displacement) ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองสะพาน โดยจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้และค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้ ในสภาวะการใช้งาน (Service Limit State) ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง (วสท.) เพื่อให้สะพานที่ออกแบบมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและเป็นไปตามมาตรฐานทางวิศวกรรม

3.4.9.1 ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้

สำหรับคอนกรีตอัดแรงที่สภาวะการใช้งาน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจะต้องมีค่าไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2)

หน่วยแรงอัด :

$$f_c = -0.45f'_c \quad (1)$$

หน่วยแรงดึง :

$$f_t = +1.60f'_c \quad (2)$$

โดยที่ f_c คือ ค่าหน่วยแรงอัดในคอนกรีต

f_t คือ ค่าหน่วยแรงดึงในคอนกรีต

f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน

สำหรับลวดอัดแรงที่สภาวะการใช้งานภายหลังการสูญเสียแรงดึง หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงจะต้องมีค่าไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ดังสมการที่ (3)

$$f_{pe} = +0.8f_{py} \quad (3)$$

โดยที่ f_{pe} คือ ค่าหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงที่สภาวะการใช้งานภายหลังการสูญเสียแรงดึง
 f_{py} คือ ความต้านทานแรงดึงที่จุดครากของลวดอัดแรง

3.4.9.2 ค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้

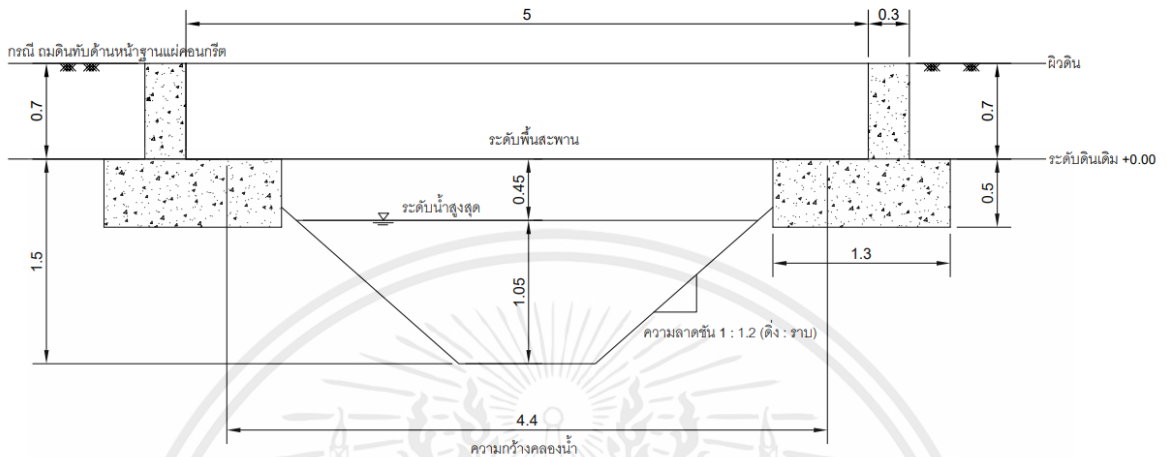
สำหรับโครงสร้างที่ไม่ใช้คานยื่น ค่าการแอ่นตัวสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกต้องมีค่าไม่เกินค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ $L/360$ เมื่อ L คือ ความยาว (Span)

3.5 การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับฐานรองรับที่ปลายสะพาน (End Block)

ฐานคอนกรีตแผ่ที่รองรับปลายสะพานคอนกรีตพิมพ์ทั้งสองด้าน ถูกออกแบบเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา มีน้ำหนักกดทับประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกคงที่จากสะพานคอนกรีตพิมพ์ยาว 5 m น้ำหนัก 10,182 kg ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 5000 N/m^2 หรือเท่ากับ 510 kg/m^2 และข้อมูลผลสำรวจดินของพื้นที่ใกล้เคียงตำแหน่งที่เลือกวางสะพาน ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบจึงประกอบด้วย

1. ดินเหนียวปนซิลต์แข็งถึงปานกลาง สมมติให้หน่วยน้ำหนักดิน $\gamma_s = 2.0 \text{ t/m}^3$
2. ค่า N (SPT) = 0 ครั้ง/ฟุต ค่ามุมแรงเสียดทานภายในของดินโดยประมาณ $\phi = 25^\circ$
3. ค่า cohesive ของดินโดยประมาณ $c = 0 \text{ t/m}^3$
4. กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$
5. $f_c = 0.45 f'_c = 108 \text{ kg/cm}^2$
6. หน่วยน้ำหนักคอนกรีต $\gamma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$
7. $f_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$
8. $f_s = 0.5 f_y = 1500 \text{ kg/cm}^2$
9. $E_c = 4270w^{1.5} \sqrt{f'_c} = 245952 \text{ kg/cm}^2$
10. $E_s = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
11. $n = \frac{E_s}{E_c} = 9$
12. $k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = 0.393$
13. $j = 1 - \frac{k}{3} = 0.869$
14. $R = \frac{1}{2} f_c k j = 18.45 \text{ kg/cm}^2$
15. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กใช้ตามหลักการของ Working Stress

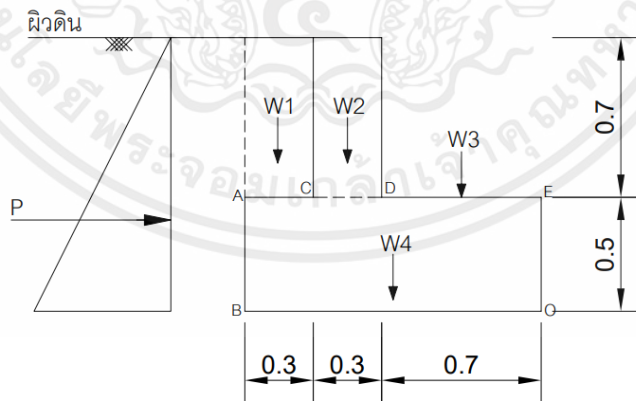
เนื่องจากการออกแบบให้ฐานแผ่รองรับสะพานเป็นหน้าตัดตัวแอล (L-Shape) ไม่เพียงพอต่อความต้านทานการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดิน การเพิ่มความกว้างของฐานมีข้อจำกัดจากรูปตัดของคลองน้ำ จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนรูปหน้าตัดของฐานเป็นตัวที (T-Shape) เพื่อขยายความกว้างของฐานไปฝั่งด้านหลังทดแทน ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 การออกแบบฐานรองรับที่ปลายสะพาน. โดย ผู้วิจัย, 2565

3.5.1 การออกแบบขั้นต้น

โดยการกำหนดขนาดและสัดส่วนของฐานรองรับ ดังรูปที่ 3.28 ในกรณีที่มีการถมดินด้านหลังฐานเพียงฝั่งเดียวและพิจารณาที่ความยาวฐาน $L = 1$ เมตร



รูปที่ 3.28 ขนาดและสัดส่วนของฐานรองรับ. โดย ผู้วิจัย, 2565

ตารางที่ 3.3 การคำนวณแรงในแนวตั้งและโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาการอบจุด O

ลำดับ	รายการ	คำนวณ	น้ำหนัก (kg/m)	แขนโมเมนต์ (m)	โมเมนต์ (kg-m)
W1	น้ำหนักดินทับหลังฐาน	2000 × 0.3 × 0.7	420	1.15	483
W2	น้ำหนักส่วนกำแพง	2400 × 0.3 × 0.7	504	0.85	428.4
W3	น้ำหนักสะพาน	(10182/5)	2036.4		
	น้ำหนักบรรทุกจร	510 × 2.5	1275		
	รวม		3311.4	0.35	1158.99
W4	น้ำหนักฐาน	2400 × 1.3 × 0.5	1560	0.65	1014
	รวม		5795.4		3084.39

การคำนวณแรงในแนวราบและโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกาการอบจุด O

$$\text{สัมประสิทธิ์แรงดันดินเชิงรุก } K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \frac{1 - \sin(25)}{1 + \sin(25)} = 0.406$$

$$\text{แรงดันดินด้านหลังฐาน } P = \frac{1}{2} K_a \gamma_s H^2 = \frac{1}{2} (0.406)(2000)(1.2)^2 = 584.64 \text{ kg/m}$$

$$\text{โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกาการอบจุด O} = (584.64) \left(\frac{1}{3} \times 1.2 \right) = 233.86 \text{ kg-m/m}$$

ตรวจสอบความมั่นคงต่อการพลิกคว่ำ (Overturning)

$$\text{โมเมนต์ต้านการพลิกคว่ำ} = \Sigma M_{\text{ทวน}}$$

$$\text{โมเมนต์ทำให้พลิกคว่ำ} = \Sigma M_{\text{ตาม}}$$

ดังนั้น อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำของฐาน เท่ากับ

$$F.S. = \frac{\Sigma M_{\text{ทวน}}}{\Sigma M_{\text{ตาม}}} = \frac{3084.39}{233.86} = 13.19 > 2 \text{ ใช้ได้}$$

ตรวจสอบความมั่นคงต่อการเลื่อนไถล (Sliding)

การเลื่อนไถลเกิดจากแรงดันด้านข้างในแนวนอน (P) ในขณะที่แรงเสียดทานต้านการเลื่อนไถล (F_f) เกิดจากน้ำหนักทั้งหมดในแนวตั้ง

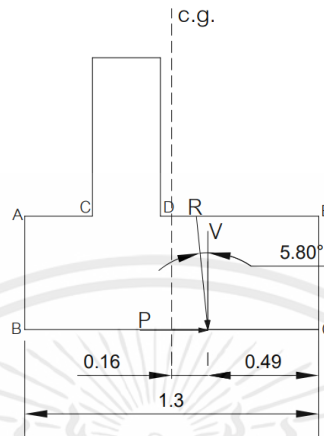
$$F_f = \Sigma V \tan \left(\frac{2}{3} \phi \right) = (5795.4) \tan \left(\frac{2}{3} (25) \right) = 1735.03 \text{ kg/m}$$

ดังนั้น อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถลของฐาน เท่ากับ

$$F.S. = \frac{F_f}{P} = \frac{1735.03}{584.64} = 2.97 > 1.5 \text{ ใช้ได้}$$

ตรวจสอบความต้านทานการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดิน (Bearing Capacity)

ตำแหน่ง (x) ของแนวแรงรวม (R) ที่เกิดจากแรงกระทำในแนวนอน (P) และแรงในแนวตั้ง (V) ตามหลักการ Middle Third โดยไม่ต้องการให้เกิดหน่วยแรงดึง (Tensile Stress) ได้ฐาน ซึ่งในที่นี้พิจารณาจากโมเมนต์รอบจุด O ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 ตำแหน่งของแนวแรงรวม. โดย ผู้วิจัย, 2565

$$\text{จะได้ ระยะ } x = \frac{\sum M_{\text{วน}} - \sum M_{\text{ตาม}}}{\sum W} = \frac{3084.39 - 233.86}{5795.4} = 0.49 \text{ m (จากจุด O)}$$

$$\text{ระยะเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity : e)} = \frac{B}{2} - x = \frac{1.3}{2} - 0.49 = \pm 0.16 \text{ m}$$

$$\text{ช่วง Middle Third} = \frac{B}{6} = \frac{1.3}{6} = \pm 0.22 > e \text{ ดังนั้น ระยะเยื้องศูนย์กลางอยู่ในช่วง Middle}$$

Third จึงเกิดหน่วยแรงอัดตลอดความกว้างฐาน

$$\text{หาหน่วยแรงอัดได้ฐานจากสูตร } q = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}$$

$$\text{ในที่นี้ } P = \text{น้ำหนักทั้งหมดในแนวตั้ง } (\Sigma V) = 5795.4 \text{ kg}$$

$$A = \text{ขนาดพื้นที่ของฐาน} = BL = B(1.0) \text{ ซึ่ง } B = 1.3 \text{ m}$$

$$M = \text{โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักเยื้องศูนย์กลาง} = (\Sigma V)(e) \text{ ซึ่ง } e = 0.16 \text{ m}$$

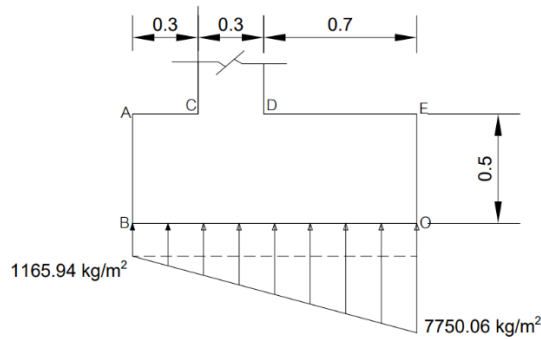
$$c = \text{ระยะกึ่งกลางฐานถึงขอบริมสุด} = \frac{B}{2}$$

$$I = \text{โมเมนต์อินเนอร์เซียของฐาน} = \frac{1}{12} LB^3 = \frac{(1)(1.3)^3}{12}$$

$$\text{ดังนั้น หน่วยแรงอัด } q = \frac{\Sigma V}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) = \frac{5795.4}{1.3} \left(1 \pm \frac{6(0.16)}{1.3} \right)$$

$$\text{หน่วยแรงอัดสูงสุดที่ด้านหน้าฐาน} = 7750.06 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{หน่วยแรงอัดสูงสุดที่ด้านหลังฐาน} = 1165.94 \text{ kg/m}^2$$



รูปที่ 3.30 หน่วยแรงอัดใต้ฐาน. โดย ผู้วิจัย, 2565

คำนวณค่าหน่วยแรงต้านทานสูงสุดของชั้นดินใต้ฐาน (Ultimate Bearing Capacity of Soil)

ตามสมการของ Brinch Hansen (1970) หน่วยแรงต้านทานสูงสุดของชั้นดินใต้ฐาน

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

โดย $F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$ = Shape factor

$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$ = Depth factor

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$ = Load inclination factor

เนื่องจากมุมเสียดทานภายในของดิน $\phi = 25^\circ$ ใช้ตาราง Vesic's bearing capacity factor (Das, B.J., 1990)

จะได้ สัมประสิทธิ์ของแรงต้านชั้นดิน $N_c = 20.72$ $N_q = 10.66$ $N_\gamma = 10.88$

ในกรณีที่ไม่มีดินถมทับฐาน จะได้ระดับความลึกจากผิวดินถึงก้นฐาน $D_f = 0.5$ m

หน่วยแรงกดของดินโดยรอบฐานราก $q = \gamma D_f = (2000)(0.5) = 1000$ kg/m²

$$\text{แรงรวมทำมุมกับแนวดิ่ง } \beta = \tan^{-1} \left(\frac{\sum P}{\sum V} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{584.64}{5795.4} \right) = 5.8^\circ$$

เมื่อเกิดโมเมนต์ตัดจากแรงกระทำเอียงศูนย์ 1 ทิศทาง ความกว้างฐานประสิทธิผล $B' = B - 2e = 1.3 - 2(0.16) = 0.98$ m

$$\text{จะได้ } F_{qs} = 1 + \frac{B'}{L} \tan \phi = 1 + \frac{0.98}{1} \tan(25) = 1.457$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \frac{D_f}{B'} = 1 + 2 \tan(25)(1 - \sin(25))^2 \frac{0.5}{0.98} = 1.159$$

$$F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta}{90^\circ} \right)^2 = \left(1 - \frac{5.8^\circ}{90^\circ} \right)^2 = 0.875$$

$$F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B'}{L} = 1 - 0.4 \frac{0.98}{1.0} = 0.608$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 45 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta}{\phi}\right)^2 = \left(1 - \frac{5.8^\circ}{25^\circ}\right)^2 = 0.590$$

$$q_u = 0 + (1000)(10.66)(1.457)(1.159)(0.875) + \frac{1}{2}(2000)(0.98)(10.88)(0.608)(1)(0.590)$$

$$q_u = 19575.82 \text{ kg/m}^2$$

ดังนั้น อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดิน เท่ากับ

$$F.S. = \frac{q_u}{q_{\max}} = \frac{19575.82}{7750.06} = 2.53 > 2.5 \text{ ใช้ได้ (สะพานคนข้ามยอมให้ดินเกิดการทรุด$$

ตัวได้บ้าง)

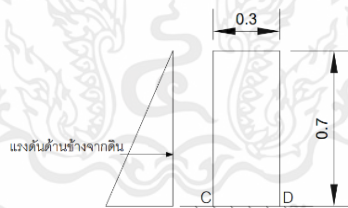
3.5.2 ออกแบบการเสริมเหล็ก

$$\text{หน่วยแรงอัดใต้ฐานจุด C : } q_C = 1165.94 + \frac{0.3}{1.3}(7750.06 - 1165.94) = 2685.35 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{หน่วยแรงอัดใต้ฐานจุด D : } q_D = 1165.94 + \frac{0.6}{1.3}(7750.06 - 1165.94) = 4204.76 \text{ kg/m}^2$$

3.5.2.1 ปริมาณเหล็กเสริมส่วนกำแพง

พิจารณาให้ส่วนกำแพงเสมือนเป็นคานยื่นกว้าง 1 m ยาว 0.7 m ให้ส่วนที่ยึดกับฐานเป็นแบบยึดแน่น ดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 ส่วนกำแพงเสมือนเป็นคานยื่น. โดย ผู้วิจัย, 2565

$$\text{แรงดันด้านข้างจากดิน} = \frac{1}{2}(0.406 \times 2000 \times 0.7) \times 1 \times 0.7 = 198.94 \text{ kg}$$

$$M = 198.94 \times \frac{0.7}{3} = 46.42 \text{ kg-m (โมเมนต์บวก)}$$

$$V = 198.94 \text{ kg}$$

$$\text{ความลึกประสิทธิภาพที่ต้องการ } d_m = \sqrt{\frac{M}{Rb}} = \sqrt{\frac{46.42 \times 100}{18.45 \times 100}} = 1.59 \text{ cm}$$

covering = 5 cm และสมมติ ใช้เหล็กเสริม DB16 จะได้

$$\text{ความลึกประสิทธิภาพ } d = 30 - 5 - \frac{1.6}{2} = 24.2 \text{ cm} > d_m \text{ ใช้ได้}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 46 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบแรงเฉือน : $V_c = 0.29\sqrt{f'_c}bd$
 $= 0.29\sqrt{240} \times 100 \times 24.2 = 10872.24 \text{ kg} > V$ ใช้ได้

ปริมาณเหล็กเสริม : $A_s = \frac{M}{f_s j d} = \frac{46.42 \times 100}{1500 \times 0.869 \times 24.2} = 0.15 \text{ cm}^2$

เหล็กเสริมขั้นต่ำ : $A_{s,temp} = \rho b h = 0.002 \times 100 \times 30 = 6 \text{ cm}^2 > A_s$ ใช้ $A_{s,temp}$
ด้านรับแรงดันจากดิน

เลือกใช้เหล็ก DB12 @ 15 cm ($A_s = 7.92 \text{ cm}^2$, $\Sigma O = 26.39 \text{ cm}$)

ผลรวมเส้นรอบรูปเหล็กเส้นที่ต้องการ $= \frac{V}{ujd}$ โดย $u = \frac{3.23\sqrt{f'_c}}{d_b} = 41.7 \text{ kg/cm}^2$
 $= \frac{198.94}{41.7 \times 0.869 \times 24.2} = 0.23 \text{ cm} < \Sigma O$ ใช้ได้

ด้านติดกับสะพาน

ปริมาณเหล็กเสริม : $A_s = \frac{2}{3} A_{s,temp} = \frac{2}{3} (6) = 4 \text{ cm}^2$

เลือกใช้เหล็ก DB12 @ 25 cm ($A_s = 4.52 \text{ cm}^2$)

ปริมาณเหล็กเสริมกันร้าวตามแนวยาวของฐาน : $A_s = 0.0025bh$
 $= 0.0025 \times 70 \times 30 = 5.25 \text{ cm}^2$

ด้านรับแรงดันจากดิน : ต้องการปริมาณเหล็กเสริม $= \frac{2}{3} A_s = \frac{2}{3} (5.25) = 3.5 \text{ cm}^2$

เลือกใช้เหล็ก 5-DB10 @ 15 cm ($A_s = 3.93 \text{ cm}^2$)

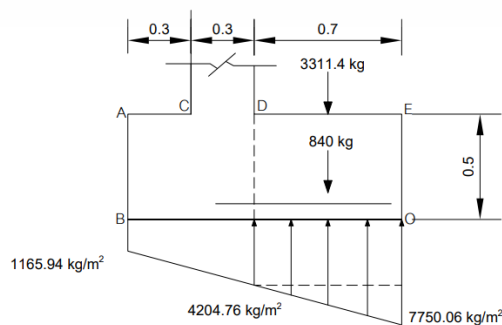
ด้านติดกับสะพาน : ต้องการปริมาณเหล็กเสริม $= \frac{1}{3} A_s = \frac{1}{3} (5.25) = 1.75 \text{ cm}^2$

เลือกใช้เหล็ก 3-DB10 @ 30 cm ($A_s = 2.36 \text{ cm}^2$)

3.5.2.2 ปริมาณเหล็กเสริมส่วนยื่นรองรับสะพาน

พิจารณาให้ส่วนยื่นรองรับปลายสะพานเสมือนเป็นคานายื่นกว้าง 1 m ยาว 0.7 m

โดยมีระนาบที่ตัดผ่านจุด D เป็นแบบยึดแน่น ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 การกระจายหน่วยแรงอัดใต้ฐานสำหรับออกแบบส่วนยื่นรองรับสะพาน. โดย ผู้วิจัย, 2565

น้ำหนักสะพาน = 2036.4 kg

น้ำหนักบรรทุกจร = 1275 kg

น้ำหนักของฐานส่วนยื่น = $2400 \times 0.7 \times 0.5 \times 1 = 840$ kg

รวมน้ำหนักที่กดลง = $2036.4 + 1275 + 840 = 4151.4$ kg

$$M = \left(4204.76 \times 0.7 \times \frac{0.7}{2} \right) + \left(\frac{1}{2} \times (7750.06 - 4204.76) \times 0.7 \times \left(\frac{2}{3} \times 0.7 \right) \right) - \left(4151.4 \times \frac{0.7}{2} \right) = 156.24 \text{ kg-m (โมเมนต์บวก)}$$

$$V = (4204.76 \times 0.7) + \left(\frac{1}{2} \times (7750.06 - 4204.76) \times 0.7 \right) - 4151.4 = 32.79 \text{ kg}$$

$$\text{ความลึกประสิทธิภาพที่ต้องการ } d_m = \sqrt{\frac{M}{Rb}} = \sqrt{\frac{156.24 \times 100}{18.45 \times 100}} = 2.91 \text{ cm}$$

covering = 7.5 cm และสมมติ ใช้เหล็กเสริม DB20 จะได้

$$\text{ความลึกประสิทธิภาพ } d = 50 - 7.5 - \frac{2.0}{2} = 41.5 \text{ cm} > d_m \text{ ใช้ได้}$$

$$\begin{aligned} \text{ตรวจสอบแรงเฉือน : } V_c &= 0.29 \sqrt{f'_c} b d \\ &= 0.29 \sqrt{240} \times 100 \times 41.5 = 18644.54 \text{ kg} > V \text{ ใช้ได้} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณเหล็กเสริม : } A_s = \frac{M}{f_s j d} = \frac{156.24 \times 100}{1500 \times 0.869 \times 41.5} = 0.29 \text{ cm}^2$$

$$\text{เหล็กเสริมขั้นต่ำ : } A_{s,temp} = \rho b h = 0.002 \times 100 \times 50 = 10 \text{ cm}^2 > A_s \text{ ใช้ } A_{s,temp}$$

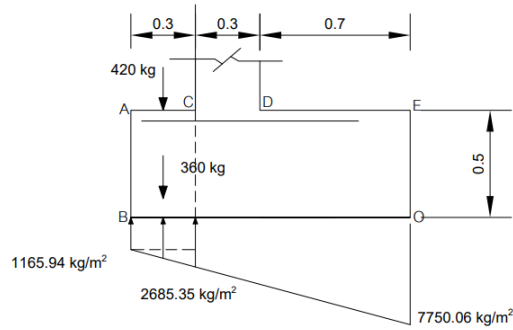
ผิวล่างของฐาน

เลือกใช้เหล็ก DB20 @ 30 cm ($A_s = 12.57 \text{ cm}^2$, $\Sigma O = 25.13 \text{ cm}$)

$$\begin{aligned} \text{ผลรวมเส้นรอบรูปเหล็กเส้นที่ต้องการ} &= \frac{V}{u j d} \text{ โดย } u = \frac{2.29 \sqrt{f'_c}}{d_b} = 17.74 \text{ kg/cm}^2 \\ &= \frac{32.79}{17.74 \times 0.869 \times 41.5} = 0.05 \text{ cm} < \Sigma O \text{ ใช้ได้} \end{aligned}$$

3.5.2.3 ปริมาณเหล็กเสริมส่วนยื่นด้านหลังฐาน

พิจารณาให้ส่วนยื่นด้านหลังฐานเสมือนเป็นคานยื่นกว้าง 1 m ยาว 0.3 m โดยมี
ระนาบที่ตัดผ่านจุด C เป็นแบบยึดแน่น ในกรณีที่มีดินถมทับส่วนยื่นหน้าฐาน ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 การกระจายหน่วยแรงอัดใต้ฐานสำหรับออกแบบส่วนยื่นด้านหลังฐาน. โดย ผู้วิจัย, 2565

$$\text{น้ำหนักฐานส่วนยื่น} = 2400 \times 0.3 \times 0.5 \times 1 = 360 \text{ kg}$$

$$\text{น้ำหนักดินที่ทับส่วนยื่น} = 2000 \times 0.3 \times 0.7 \times 1 = 420 \text{ kg}$$

$$\text{รวมน้ำหนักที่กดลง} = 360 + 420 = 780 \text{ kg}$$

$$M = \left(-780 \times \frac{0.3}{2} \right) + \left(\frac{1}{2} \times (2685.35 - 1165.94) \times 0.3 \times \left(\frac{1}{3} \times 0.3 \right) \right) + \left(1165.94 \times 0.3 \times \frac{0.3}{2} \right) = 41.74 \text{ kg-m (โมเมนต์ลบ)}$$

$$V = (1165.94 \times 0.3) + \left(\frac{1}{2} \times (2685.35 - 1165.94) \times 0.3 \right) - 780 = 202.31 \text{ kg (เฉือนลง)}$$

$$\text{ความลึกประสิทธิภาพที่ต้องการ } d_m = \sqrt{\frac{M}{Rb}} = \sqrt{\frac{41.74 \times 100}{18.45 \times 100}} = 1.50 \text{ cm}$$

covering = 5 cm และสมมติ ใช้เหล็กเสริม DB20 จะได้

$$\text{ความลึกประสิทธิภาพ } d = 50 - 5 - \frac{2.0}{2} = 44 \text{ cm} > d_m \text{ ใช้ได้}$$

$$\text{ตรวจสอบแรงเฉือน : } V_c = 0.29 \sqrt{f'_c} b d$$

$$= 0.29 \sqrt{240} \times 100 \times 44 = 19767.71 \text{ kg} > V \text{ ใช้ได้}$$

$$\text{ปริมาณเหล็กเสริม : } A_s = \frac{M}{f_s j d} = \frac{41.71 \times 100}{1500 \times 0.869 \times 44} = 0.07 \text{ cm}^2$$

$$\text{เหล็กเสริมขั้นต่ำ : } A_{s,temp} = \rho b h = 0.002 \times 100 \times 50 = 10 \text{ cm}^2 > A_s \text{ ใช้ } A_{s,temp}$$

ผิวบนของฐาน

$$\text{เลือกใช้เหล็ก DB20 @ 30 cm } (A_s = 12.57 \text{ cm}^2, \Sigma O = 25.13 \text{ cm})$$

$$\text{ผลรวมเส้นรอบรูปเหล็กเส้นที่ต้องการ } = \frac{V}{u j d} \text{ โดย } u = \frac{2.29 \sqrt{f'_c}}{d_b} = 17.74 \text{ kg/cm}^2$$

$$= \frac{202.31}{17.74 \times 0.869 \times 44} = 0.30 \text{ cm} < \Sigma O \text{ ใช้ได้}$$

เหล็กเสริมกันร้าวตามแนวยาวของฐาน กว้าง 1.3 เมตร หนา 0.5 เมตร

ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ : $A_s = \rho b h = 0.002 \times 130 \times 50 = 13 \text{ cm}^2$

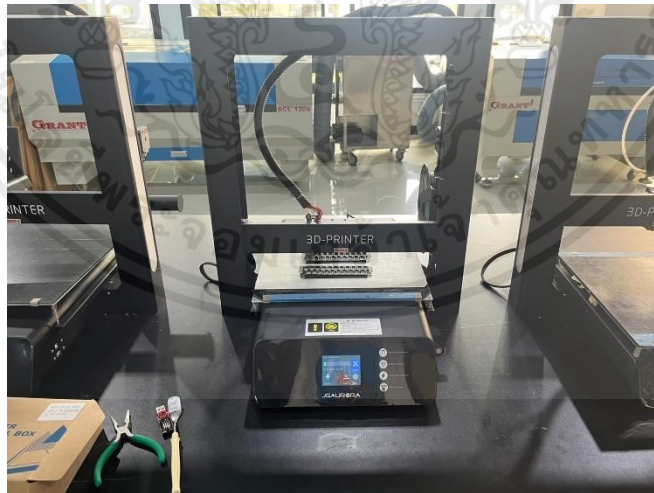
เลือกใช้เหล็ก 10-DB16 @ 15 cm ($A_s = 20.11 \text{ cm}^2$)

ดังนั้น ฐานแผ่คอนกรีตมีรายละเอียดดังที่กล่าวข้างต้น และกำหนดความยาวของฐาน $L = 3$ เมตร

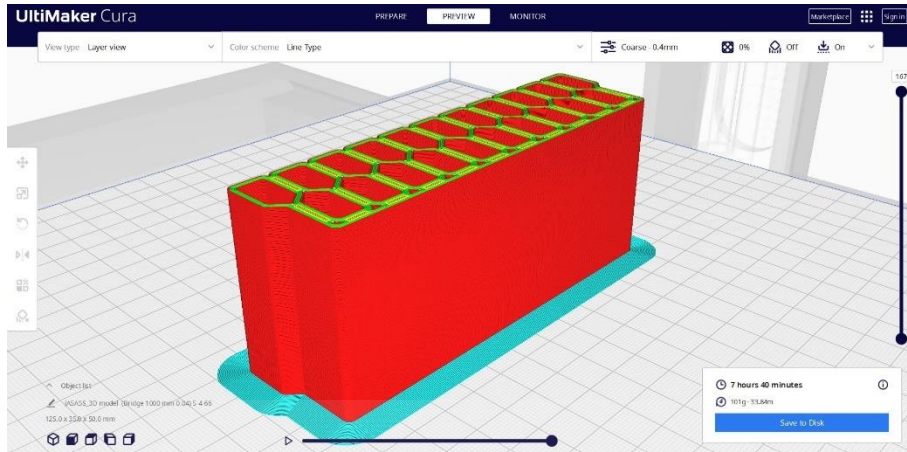
3.6 ทดลองพิมพ์แบบจำลองสะพานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

หลังจากวิเคราะห์และออกแบบสะพานคอนกรีตพิมพ์ให้เป็นไปตามมาตรฐานทางวิศวกรรม รวมทั้งได้รายละเอียดการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับส่วนรองรับที่ปลายสะพาน (End Block) จึงทดลองนำแบบจำลองสะพานไปพิมพ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ระบบ Fused Deposition Modeling (FDM) ซึ่งใช้วัสดุ PLA มาหลอมเป็นเส้น Filament แล้วฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทีละชั้น เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการพิมพ์ขึ้นรูปก่อนการพิมพ์จริงด้วยวัสดุคอนกรีต

แบบจำลองสะพานถูกลดขนาดลงในอัตราส่วน 1 : 20 ด้วยโปรแกรม Ultimaker Cura ตามขอบเขตความสามารถของเครื่องพิมพ์สามมิติและข้อจำกัดของเวลาที่ใช้พิมพ์ ใช้วัสดุพลาสติกชนิด PLA Filament 1.75 มม. ขนาดหัวพิมพ์ 0.4 มม. อุณหภูมิในการพิมพ์ 215 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิฐานรองรับ 60 องศาเซลเซียส แบ่งพิมพ์สะพานเป็นจำนวน 5 ท่อน โดยแต่ละท่อนมีขนาด 125 x 35 x 50 มม. มีทั้งหมด 167 layer ซึ่งแต่ละ layer สูง 0.3 มม.



รูปที่ 3.34 เครื่องพิมพ์สามมิติ JGAurora. โดย ผู้วิจัย, 2565



รูปที่ 3.35 เส้นทางการพิมพ์และจำนวนชั้นของแต่ละท่อน. โดย ผู้วิจัย, 2565



รูปที่ 3.36 การพิมพ์ชิ้นส่วนสะพาน. โดย ผู้วิจัย, 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 51อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

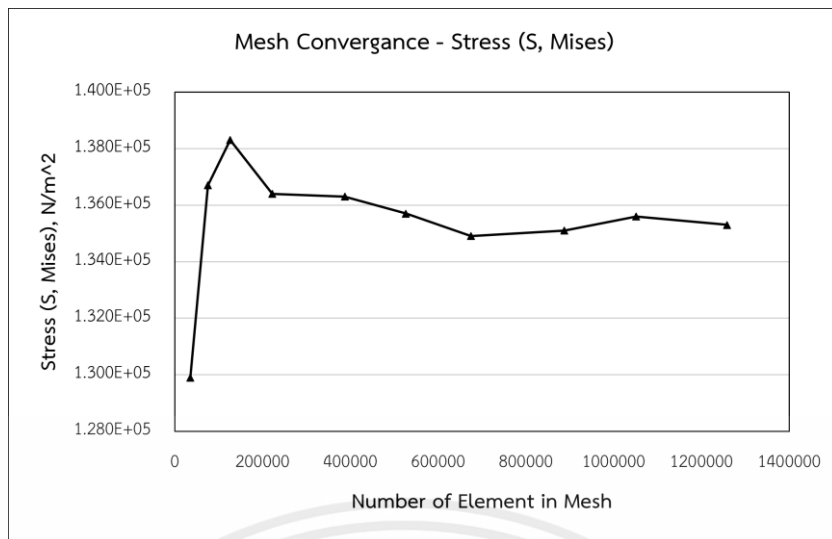
จากขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแต่ละขั้นตอน เพื่อมุ่งเน้นการวิจัยและทดลองออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ได้ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

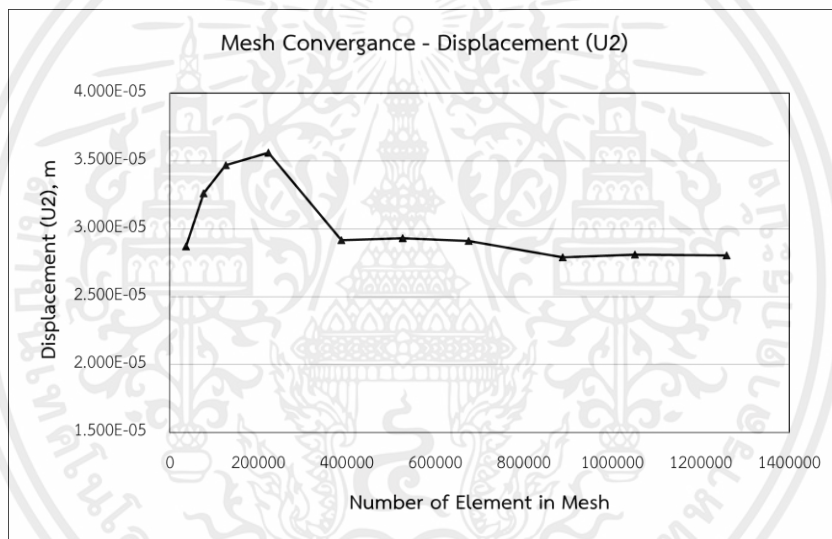
แบบจำลองสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ใช้น้ำหนักบรรทุกคงที่จากน้ำหนักโครงสร้างและน้ำหนักบรรทุกจรแผ่สม่ำเสมอ (Uniform Load) เท่ากับ 5000 นิวตัน/ม.^2 กระทำบนสะพานเป็น 2 กรณี ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบเต็มส่วน (Full span) และแบบครึ่งส่วน (Half span) พิจารณาในรูปแบบน้ำหนักบรรทุกสถิตย์ (Static load) ซึ่งแบบจำลองไม่มีราวสะพาน และไม่พิจารณาน้ำหนักบรรทุกจากแรงลม และแรงแผ่นดินไหว ผลที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงและค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ ในสภาวะการใช้งาน (Service Limit State) ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง (วสท.) เพื่อให้สะพานที่ออกแบบมีความปลอดภัยตามมาตรฐานทางวิศวกรรม ซึ่งผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 กราฟ Mesh Convergence

การทำกราฟ Mesh Convergence มีจุดประสงค์เพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ เพื่อสร้างความมั่นใจว่าคำตอบที่ได้จะเป็นคำตอบที่ยอมรับได้ ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากการแบ่งเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์แต่ละครั้ง ไม่ควรเกิน 5% โดยได้ทำกราฟตรวจสอบทั้งค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น (Stress) และค่าการแอ่นตัว (Displacement) ทั้งนี้หากผลของค่าการแอ่นตัวค่อนข้างคงที่แล้ว อาจเป็นไปได้ว่าค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะไม่คงที่ตาม ซึ่งผลของการทำกราฟ Mesh Convergence พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ควรแบ่งประมาณ 800,000 เอลิเมนต์ขึ้นไปจึงจะได้ผลการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างยอมรับได้



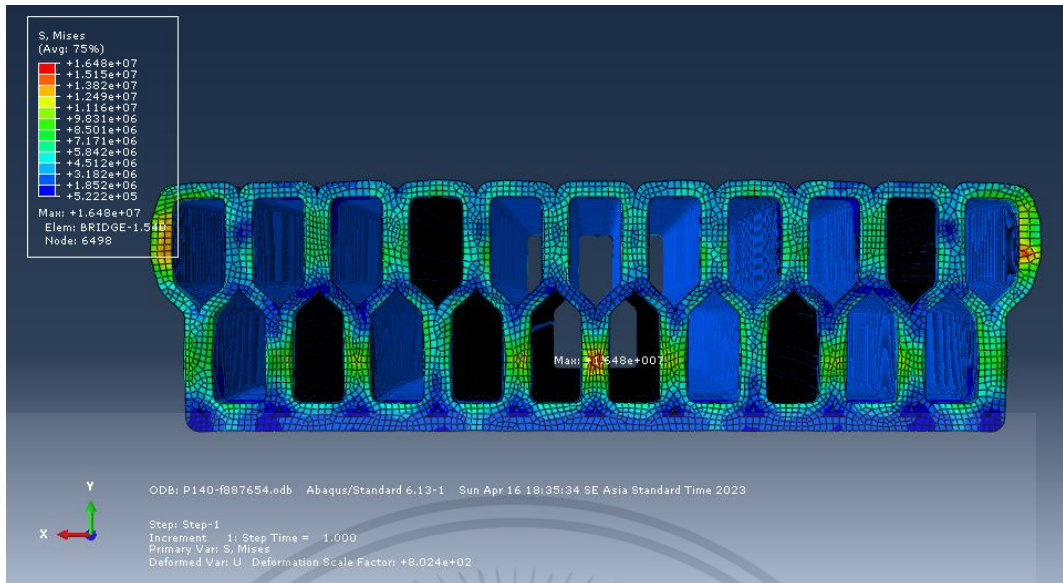
รูปที่ 4.1 กราฟ Convergence ของค่าหน่วยแรงกับจำนวนเอลิเมนต์. โดย ผู้วิจัย, 2565



รูปที่ 4.2 กราฟ Convergence ของค่าการแอ่นตัวกับจำนวนเอลิเมนต์. โดย ผู้วิจัย, 2565

4.1.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้น

สำหรับส่วนสะพานคอนกรีตพิมพ์ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกจรในแต่ละกรณี พบว่า กรณีรับน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบเต็มส่วน มีค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 1.648×10^7 นิวตัน/ม.² หรือ 167.99 กก./ชม.² กรณีรับน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบครึ่งส่วน มีค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 1.648×10^7 นิวตัน/ม.² หรือ 167.99 กก./ชม.² ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ไม่เกินค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ยอมให้ในคอนกรีตที่มีค่าเท่ากับ 180 กก./ชม.²



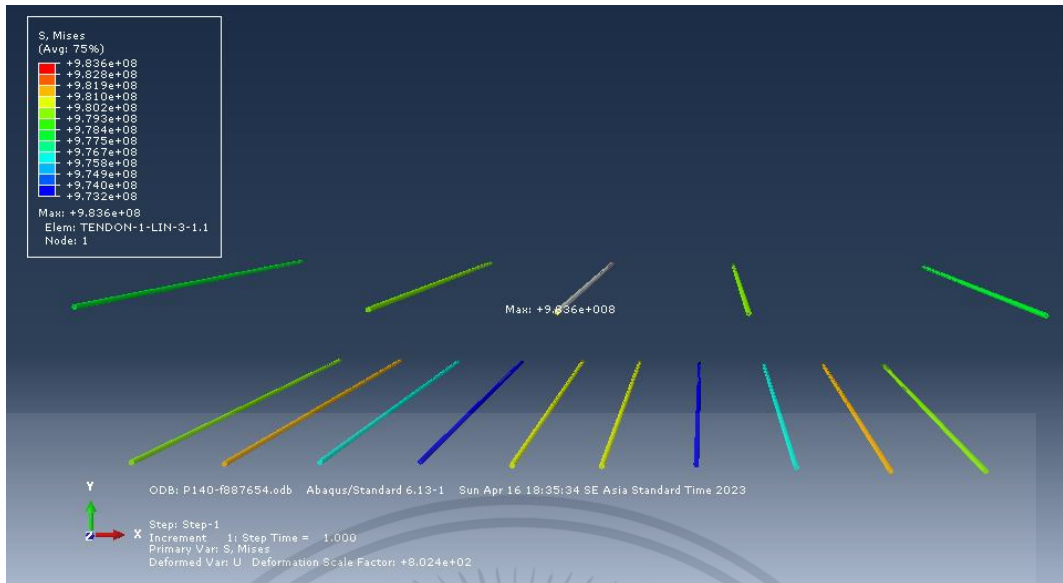
รูปที่ 4.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบเต็มส่วน. โดย ผู้วิจัย, 2565



รูปที่ 4.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบครึ่งส่วน. โดย ผู้วิจัย, 2565

หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงภายหลังการสูญเสียแรงดึง เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกจรในแต่ละกรณี พบว่า ทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยกรณีรับน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบเต็มส่วน มีค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดในลวดอัดแรงเท่ากับ 9.836×10^8 นิวตัน/ม.² หรือ 10,026.50 กก./ชม.² กรณีรับน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบครึ่งส่วน มีค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดในลวดอัดแรงเท่ากับ 9.837×10^8 นิวตัน/ม.² หรือ 10,027.52 กก./ชม.² ซึ่งไม่เกินค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดในลวดอัดแรงที่ยอมให้เท่ากับ 13,669.71 กก./ชม.²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 54 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 หน่วยแรงดึงที่เกิดในลวดอัดแรงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบเต็มส่วน. โดย ผู้วิจัย, 2565

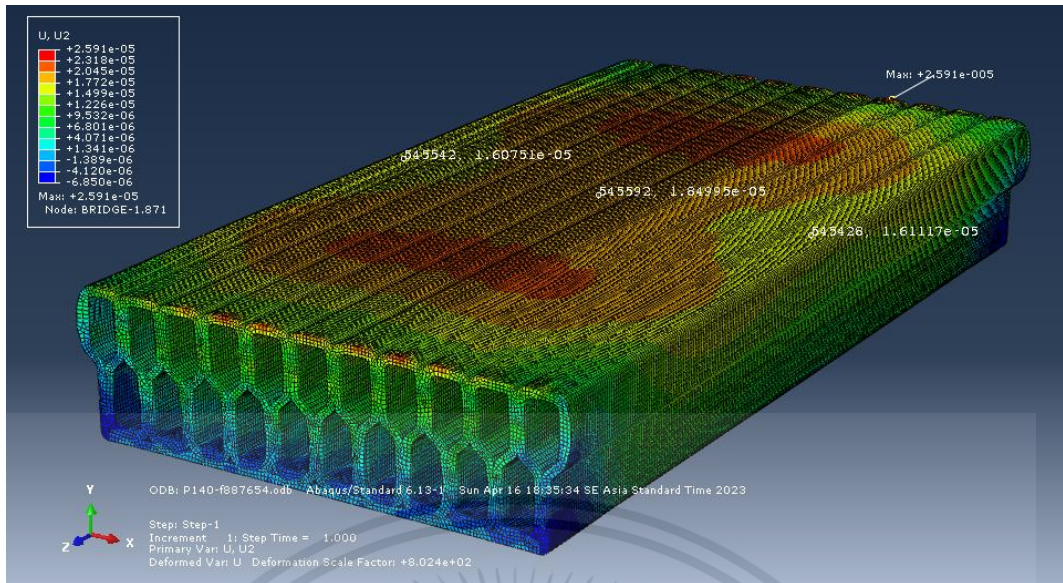


รูปที่ 4.6 หน่วยแรงดึงที่เกิดในลวดอัดแรงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบครึ่งส่วน. โดย ผู้วิจัย, 2565

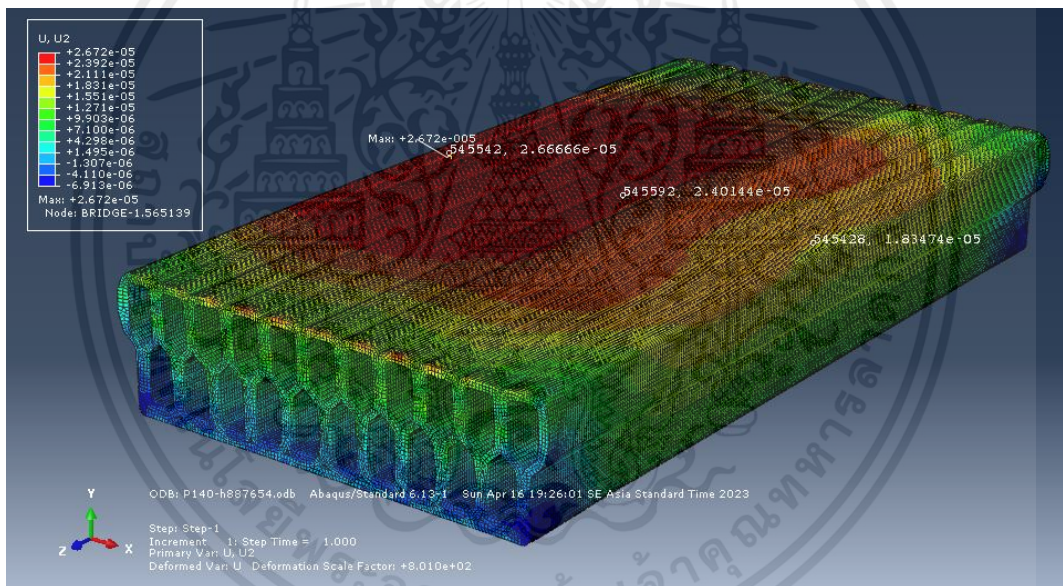
4.1.3 ค่าการแอ่นตัว

ค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นสูงสุดของสะพาน เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกในแต่ละกรณี พบว่า กรณีรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบเต็มส่วน มีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเท่ากับ 2.591×10^{-5} เมตร หรือ 0.00259 เซนติเมตร กรณีรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบครึ่งส่วน มีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเท่ากับ 2.672×10^{-5} เมตร หรือ 0.00267 เซนติเมตร ซึ่งไม่เกินค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้ที่มีค่าเท่ากับ 1.389 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 55 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การแอนตัวของสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบเต็มส่วน. โดย ผู้วิจัย, 2565



รูปที่ 4.8 การแอนตัวของสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบครึ่งส่วน. โดย ผู้วิจัย, 2565

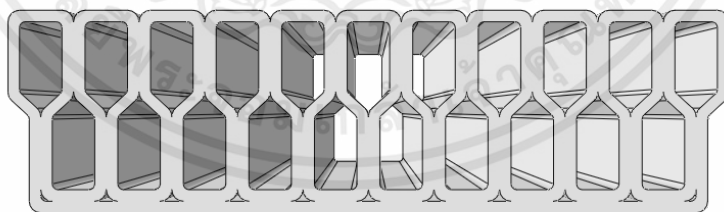
การวิเคราะห์ผลตอบสนองของแบบจำลองโครงสร้างสะพานคอนกรีตพิมพ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ทั้งค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนสะพานคอนกรีตพิมพ์ ลวดอัดแรง และค่าการแอนตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นของแบบจำลองสะพานไม่เกินค่ามาตรฐานที่ยอมให้ แนวคิดการสร้างแบบจำลองสะพานคนข้ามด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิตินี้ จึงประมาณการได้ว่ามีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและเป็นไปตามมาตรฐานทางวิศวกรรม

4.2 รายละเอียดการออกแบบ

การออกแบบหน้าตัดของฐานแม่คอนกรีตเสริมเหล็กที่ปลายสะพานทั้งสองด้านเป็นรูปตัวแอล (L-Shape) ไม่เพียงพอต่อความต้านทานการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดิน ซึ่งจำเป็นต้องเพิ่มความกว้างของฐาน แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของรูปตัดคลองและลักษณะพื้นที่ที่วางสะพานที่ได้พิจารณาเลือกไว้ หลังจากการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองจึงถูกนำมาปรับเปลี่ยนการออกแบบฐานแม่คอนกรีตเสริมเหล็กที่ปลายสะพานเป็นหน้าตัดรูปตัวที (T-Shape) จะได้แนวทางในการออกแบบสะพานสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 การออกแบบสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

แบบจำลองสะพานได้รับการออกแบบให้มีขนาดความกว้าง 2.5 เมตร ความยาว 5.0 เมตร ความลึกของหน้าตัด 0.7 เมตร ขนาดหัวพิมพ์สำหรับพิมพ์จริงด้วยวัสดุคอนกรีต กำหนดใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพิมพ์เท่ากับ 0.04 เมตร รูปหน้าตัดของสะพานถูกออกแบบให้การเคลื่อนตัวของหัวพิมพ์สร้างเส้นทางการพิมพ์มาจบที่จุดเริ่มต้นได้ จึงมีลักษณะเป็นช่องกลางที่คอร์ดบนและล่าง ดังรูปที่ 4.9 เพื่อใช้สอดลวดอัดแรง (Post-Tension) ซึ่งเป็นลวดเกลียวอัดแรงชนิด ลวด 7 เส้น (7-wire) การคลายแรงดึงต่ำ (Low relaxation) ตามมาตรฐาน มอก. 420-2534 กำหนดให้สอดผ่านคอร์ดบนจำนวน 5 เส้น และสอดผ่านคอร์ดล่างจำนวน 10 เส้น ซึ่งแสดงแนวการวางลวดไว้ตามรูปที่ 3.13 ในบทที่ 3 โดยลวดอัดแรงจะถูกยึดรั้งกับฐานแม่คอนกรีต (End Block) ที่ปลายทั้งสองฝั่งของสะพาน ซึ่งเป็นวิธีการเสริมแรงสำหรับโครงสร้างสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ

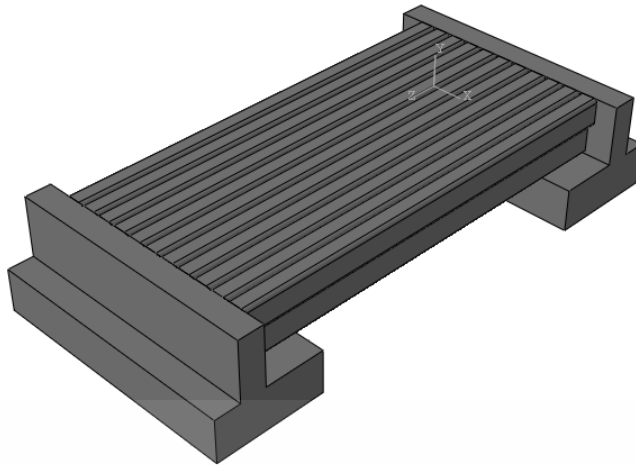


รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางแสดงหน้าตัดของแบบจำลองสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ. โดย ผู้วิจัย, 2565



รูปที่ 4.10 ด้านข้างของแบบจำลองสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติ. โดย ผู้วิจัย, 2565

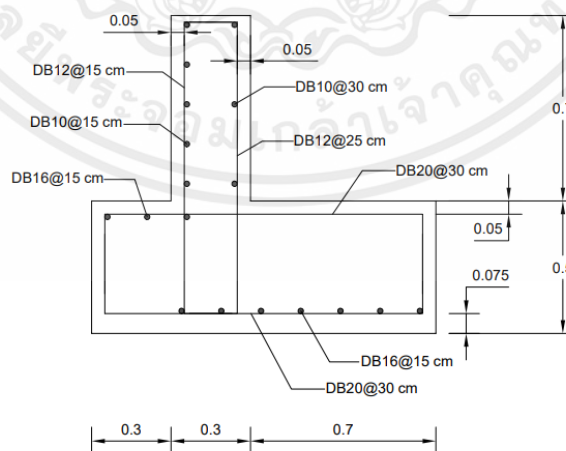
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 57 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แบบจำลองสะพานคอนกรีตสามมิติ. โดย ผู้วิจัย, 2565

4.2.2 การออกแบบฐานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปลายสะพาน (End Block)

ฐานแผ่คอนกรีตเสริมเหล็กที่ปลายสะพานถูกออกแบบและคำนวณให้ได้มาซึ่งขนาดและรูปแบบของฐานให้มีลักษณะสอดคล้องกับพื้นที่วางสะพานที่ได้พิจารณาเลือกไว้ อีกทั้งได้รับการตรวจสอบความมั่นคงต่อการพลิกคว่ำ (Overturning) ความมั่นคงต่อการลื่นไถล (Sliding) และความต้านทานการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดิน (Bearing Capacity) พบว่า ฐานคอนกรีตเสริมเหล็กมีความปลอดภัยต่อทั้ง 3 กรณี ดังนั้น ฐานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปลายสะพาน (End Block) มีความหนาของส่วนกำแพงสำหรับยึดตรึงลวดอัดแรงเท่ากับ 0.3 เมตร ความสูง 0.7 เมตร ตัวฐานมีความกว้าง 1.3 เมตร ความยาว 3 เมตร ซึ่งแสดงรายละเอียดการออกแบบทั้งขนาดและปริมาณเหล็กเสริมแรง แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 รายละเอียดการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก. โดย ผู้วิจัย, 2565

สำหรับงานวิจัยนี้ ในส่วนของการออกแบบฐานแม่คอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ผู้วิจัยไม่ได้พิจารณา ออกแบบการเสริมเหล็กสำหรับป้องกันการแตกร้าวของกำแพงคอนกรีต (End Block) อันเนื่องมาจาก แรงอัดที่จะเกิดขึ้นหลังจากตัดลวดอัดแรงสำหรับการก่อสร้างจริง

4.3 แบบจำลองสะพานพิมพ์สามมิติ

หลังจากได้รายละเอียดการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สาม มิติ ทั้งส่วนของสะพานคอนกรีตพิมพ์และฐานคอนกรีตเสริมเหล็กรองรับที่ปลายสะพาน แบบจำลอง สะพานถูกนำไปพิมพ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ระบบ Fused Deposition Modeling (FDM) ใช้วัสดุ พิมพ์ เส้น Filament ชนิด PLA 1.75 มม. เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของการพิมพ์แบบสะพานก่อนจะ นำไปพิมพ์จริงด้วยวัสดุคอนกรีต โดยพิมพ์แบบจำลองสะพานขนาดย่อในสัดส่วน 1 : 20 ลดทอนความยาว ของสะพานเป็นจำนวน 5 ท่อน ซึ่งแต่ละท่อนมีขนาดหน้าตัด 125 x 35 x 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างหน้าตัดแบบจำลองจากเครื่องพิมพ์สามมิติ. โดย ผู้วิจัย, 2565



รูปที่ 4.14 ชิ้นส่วนแบบจำลองที่ขึ้นรูปด้วยวัสดุ Filament ขนาด 125x35x50 มม. โดย ผู้วิจัย, 2565

ชิ้นส่วนของแบบจำลองสะพานจำนวน 5 ท่อน ถูกนำมาประกอบเป็นแบบจำลองสะพาน โดยใช้เส้นลวดขนาดเล็กจำนวน 15 เส้น เป็นตัวยึดรั้งระหว่างชิ้นส่วนของสะพานกับฐานรองรับที่ปลายสะพาน (End Block) ทั้งสองฝั่ง ในตำแหน่งตามที่ออกแบบไว้ จะได้แบบจำลองสะพานคนข้ามขนาดเล็กแบบอัดแรง ในสัดส่วน 1 : 20 ตามแนวคิดการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แบบจำลองสะพาน scale 1:20 ขึ้นรูปด้วยวัสดุ Filament. โดย ผู้วิจัย, 2565

แบบจำลองสะพานจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ได้แสดงให้เห็นว่า แนวคิดการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ โดยใช้การอัดแรงที่ผู้วิจัยได้ศึกษา รวบรวม วิเคราะห์ และออกแบบขึ้นมา นั้น มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปพิมพ์จริงด้วยวัสดุคอนกรีตต่อไป

4.4 ประมาณราคาก่อสร้างเบื้องต้น

การคำนวณประมาณราคาก่อสร้างสำหรับสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ได้อ้างอิงจากบัญชีราคากลางวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงาน ประจำปี 2566 และราคาการพิมพ์คอนกรีตสามมิติจากบริษัท CPAC ในเครือบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ซึ่งคิดเป็นราคาเหมาต่อพื้นที่การพิมพ์ มีราคา 45,000 บาทต่อตารางเมตร

สำหรับแบบก่อสร้างสะพานคนข้ามขนาดเล็กในงานวิจัยนี้ การถอดแบบราคาวัสดุและค่าแรงที่ใช้ในการก่อสร้าง ได้แสดงรายละเอียดทั้งรายการวัสดุที่ใช้ ปริมาณวัสดุ ราคาวัสดุและค่าแรง ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่า ต้นทุนค่าใช้จ่ายสุทธิในการก่อสร้างสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ มีราคาประมาณ 601,205.27 บาท ซึ่งถือว่าเป็นค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงสำหรับงานก่อสร้างสะพานขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับต้นทุนในการก่อสร้างสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยวิธีการก่อสร้างแบบดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องมาจากเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์ยังคงไม่แพร่หลายในวงการก่อสร้างในประเทศไทย ส่งผลให้ต้นทุนค่าใช้จ่าย ทั้งค่าวัสดุคอนกรีตพิมพ์ ซอฟต์แวร์ควบคุม และค่าเครื่องพิมพ์คอนกรีตมีราคาสูง

ตารางที่ 4.1 บัญชีแสดงปริมาณและราคา

บัญชีแสดงปริมาณและราคา	
(BILL OF QUANTITIES)	
สะพานคนข้ามคอนกรีตพิมพ์สามมิติขนาดเล็ก	จัดทำโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์
เจ้าของโครงการ : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
แบบก่อสร้าง : สะพานคอนกรีตพิมพ์	

ลำดับที่	รายการ	หน่วย	ปริมาณ	ราคาค่าวัสดุ		ราคาค่าแรง		ราคารวม	หมายเหตุ
				ต่อหน่วย	เป็นเงิน	ต่อหน่วย	เป็นเงิน	ค่าวัสดุ+ค่าแรง	
A	หมวดงานสะพานคอนกรีตพิมพ์ 3 มิติ								
	ค่าพิมพ์บล็อกสะพาน 2.5 x 5.0 ม.	ตร.ม.	12.5	45,000.00	562,500.00	-	-	562,500.00	
	ลวดเหล็กเสริมคอนกรีตอัดแรง								
	- ชนิดคิเกลียว (PC STRAND) 7 เส้น สก.15.24 มม.	ตัน	0.10	47,500.00	4,706.78	-	-	4,706.78	
B	หมวดงานฐานคอนกรีตเสริมเหล็กปลายสะพาน (End Block)								
	ไม้แบบ	ตร.ม.	17.84	190.00	3,389.60	125.00	2,230.00	5,619.60	
	เหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย SD.40 (ยาวเส้นละ 10.00 เมตร)								
	- เหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย DB Ø 10 มม.	เส้น	6	226.00	1,356.00	10.00	60.00	1,416.00	
	- เหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย DB Ø 12 มม.	เส้น	11	235.00	2,585.00	30.00	330.00	2,915.00	
	- เหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย DB Ø 16 มม.	เส้น	8	416.00	3,328.00	13.00	104.00	3,432.00	
	- เหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย DB Ø 20 มม.	เส้น	10	646.00	6,460.00	72.00	720.00	7,180.00	
	คอนกรีต fc' 240 ksc.(Cylinder)	ลบ.ม.	5.16	2,420.00	12,487.20	306.00	306.00	12,793.20	
	ลวดผูกเหล็ก	กก.	14.61	33.00	482.13	-	-	482.13	
	ตะปู	กก.	4.46	36.00	160.56	-	-	160.56	
	รวม				597,455.27		3,750.00	601,205.27	

หมายเหตุ. ราคาค้านี้เป็นประมาณการค่าวัสดุและค่าแรงที่ใช้ในการก่อสร้าง. โดย ผู้วิจัย, 2565

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลที่ได้จากการดำเนินงาน เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อสรุปของงานวิจัยตามวัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยสามารถแบ่งเป็นประเด็นต่าง ๆ ได้ดังนี้

5.1 ข้อสรุปจากงานวิจัย

5.1.1 เทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติมีศักยภาพในการนำมาใช้ในงานก่อสร้างได้ ด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานและสามารถรับน้ำหนักได้ดี สามารถแก้ปัญหาและข้อจำกัดในงานก่อสร้างในหลาย ๆ ด้าน ด้วยหลักการควบคุมและสั่งการผ่านซอฟต์แวร์ จึงเกิดความแม่นยำ ลดระยะเวลาการก่อสร้างและจำนวนแรงงาน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความยั่งยืนให้แก่วงการก่อสร้าง ปัจจุบันเทคโนโลยีนี้จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้างในหลายประเทศ โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้กับงานโครงสร้างพื้นฐานอย่างสะพาน สามารถออกแบบให้เป็นสะพานคอนกรีตพิมพ์สามมิติแบบอัดแรง แต่ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของเทคโนโลยี คือ คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตต้องคำนึงถึงการฉีดอัดและการก่อตัว การขึ้นรูปชิ้นงานในขนาดที่จำกัด ข้อจำกัดทางด้านความซับซ้อนของรูปทรงที่เครื่องพิมพ์สามมิติสามารถพิมพ์ขึ้นรูปได้

5.1.2 การออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ มีแนวทางในการออกแบบ คือ สะพานมีขนาดความกว้าง 2.5 เมตร ความยาว 5.0 เมตร ความลึกของหน้าตัด 0.7 เมตร โดยยึดติดชิ้นส่วนพิมพ์สามมิติเข้ากับฐานรากแม่คอนกรีตด้วยลวดอัดแรง ซึ่งค่าผลตอบสนองของแบบจำลองโครงสร้างสะพานคอนกรีตพิมพ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ทั้งค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนสะพานคอนกรีตพิมพ์ ลวดอัดแรง และค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นของแบบจำลองสะพานไม่เกินค่ามาตรฐานที่ยอมให้

5.1.3 แบบจำลองสะพานขนาดย่อส่วนจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ได้แสดงให้เห็นว่า แนวคิดการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ โดยใช้วิธีการอัดแรง มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปพิมพ์จริงด้วยวัสดุคอนกรีตต่อไป

5.1.4 ต้นทุนค่าใช้จ่ายสุทธิในการก่อสร้างสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ มีราคาประมาณ 601,205.27 บาท ซึ่งถือว่าเป็นค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงสำหรับงานก่อสร้างสะพานขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับต้นทุนในการก่อสร้างสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยวิธีการก่อสร้างแบบดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องมาจากเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์ยังคงไม่แพร่หลายในวงการก่อสร้างในประเทศไทย

ส่งผลให้ต้นทุนค่าใช้จ่าย ทั้งค่าวัสดุคอนกรีตพิมพ์ ซอฟต์แวร์ควบคุม และค่าเครื่องพิมพ์คอนกรีตสามมิติมีราคาสูง

จากการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า การนำเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานอย่างสะพานคนข้ามขนาดเล็กนั้นมีความเป็นไปได้ แต่ผู้ออกแบบจะต้องมีความรู้ ความเข้าใจในหลักการของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติตั้งแต่ต้น โดยเฉพาะข้อจำกัดของเทคโนโลยี จึงจะสามารถมองภาพรวมของแนวทางในการออกแบบได้ และสามารถออกแบบในรูปแบบที่มีความเหมาะสมกับการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้กับงานก่อสร้าง ซึ่งแนวคิดการออกแบบจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสะพานคนข้ามขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติได้ต่อไปในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

หากมีการนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาต่อในอนาคต ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.2.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเพียงวิธีทางอ้อมเพื่อประมาณค่าผลตอบสนองของโครงสร้างสะพานที่ออกแบบ อีกทั้งการวิเคราะห์ผลยังอยู่ภายในขอบเขตที่จำกัดเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมและศึกษา ดังนั้น แบบจำลองสะพานคนข้ามขนาดเล็กนี้จำเป็นต้องพิมพ์ขึ้นจริงด้วยวัสดุคอนกรีต และทำการทดสอบจริง เพื่อเปรียบเทียบผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการวิเคราะห์ จึงจะสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ออกแบบเป็นไปตามมาตรฐานทางวิศวกรรมและมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้

5.2.2 ฐานแผ่คอนกรีตเสริมเหล็กที่ปลายสะพานทั้งสองด้าน จำเป็นต้องได้รับการพิจารณาออกแบบการเสริมเหล็กสำหรับป้องกันการแตกร้าวของกำแพงคอนกรีต (End Block) อันเนื่องมาจากแรงอัดที่จะเกิดขึ้นหลังจากตัดลวดอัดแรงสำหรับการก่อสร้างจริง

5.2.3 การออกแบบโครงสร้างด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ยังต้องคำนึงถึงการอุดรอยต่อระหว่างชิ้นส่วน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตพิมพ์สามมิติ ดังนั้น จำเป็นต้องพิจารณาเลือกวัสดุยาแนวหรือการฉาบปูนทับผิวเพื่อป้องกันในส่วนนี้

บรรณานุกรม

หนังสือ

- [1] คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. (2549). มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง. กรุงเทพฯ ฯ : บริษัท โกลบอล กราฟฟิค จำกัด.
- [2] ธนาตล คงสมบูรณ์. (2548). วิศวกรรมฐานราก. ม.ป.ท. : ม.ป.พ.
- [3] นเรศ พันธราธร. (2540). การออกแบบคอนกรีตอัดแรง. กรุงเทพฯ ฯ : ไลบรารี นาย.
- [4] บัญชีราคาค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงาน ประจำปี 2566 กลุ่มออกแบบและก่อสร้าง สำนักอำนวยการ
- [5] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2546). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ ฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] สันติ ทองพำนัก. (2555). ตัวอย่างการออกแบบอาคารในคลองส่งน้ำ. ม.ป.ท. : ม.ป.พ.
- [7] อมร พิมาณมาศ. (ม.ป.ป). การออกแบบสะพานคอนกรีตอัดแรง. ม.ป.ท. : ม.ป.พ.
- [8] AASHTO. (2009). LRFD Guide Specifications for The Design of Pedestrian Bridges.
- [9] Ipv Delft. (2015). Brief Dutch Design Manual for Bicycle and Pedestrian Bridges. English summary of the CROW design guide.

บทความ

- [10] ชนม์วิษณุ ัญญะสุขวิชชย์. (2564). การศึกษาอัตราส่วนผสมและทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [11] ธนัท ศักดานรเศรษฐ์, (2559). แนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์: กรณีศึกษา การออกแบบศาลาอเนกประสงค์. วิทยานิพนธ์ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [12] วรณพล สดากร. (2561). แนวทางการออกแบบและก่อสร้างผนังรับน้ำหนักที่มีลวดลายเรขาคณิตเป็นองค์ประกอบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์: กรณีศึกษา ต้นแบบบ้านพักอาศัยขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

- [13] Behzad Nematollahia, Ming Xiab, Jay Sanjayanc. (2017). Current Progress of 3D Concrete Printing Technology. Center for Sustainable Infrastructure, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia
- [14] Gieljan Vantighem, Wouter De Corte, Emed Shakour, Oded Amir. (2020). 3D Printing of a Post-Tensioned Concrete Girder Designed by Topology Optimization. Department of Structural Engineering, Ghent University, Belgium and Faculty of Civil and Environmental Engineering, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, Israel.
- [15] Qiang Zhan, Xinjie Zhou, Philip F. Yuan. (2021). Digital design and fabrication of a 3D concrete printed prestressed bridge. Tongji University, China.
- [16] S. El-Sayegh, L. Romdhane, S. Manjikian. (2020). A critical review of 3D printing in construction: benefit, challenges, and risks. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Wroclaw University of Science and Technology, Poland.
- [17] Theo A. M. Salet, Zeeshan Y., Ahmed, Freek P. Bos, Hans L. M. Laagland. (2018). Design of a 3D Printed Concrete Bridge by Testing. Department of the Built Environment, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
- [18] Zhengyu Wu, Ali M. Memari, Jose P. Duarte. (2021). State of the Art Review of Reinforcement Strategies and Technologies for 3D Printing of Concrete. University Park, PA 16802, USA.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

- [19] อรวรรณ จารุวัฒนะถาวร. (2562). เทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ เทรนด์ก่อสร้างยุคใหม่. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.posttoday.com/property/582512>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 1 สิงหาคม 2565).
- [20] Techsauce. (2561). 3 Construction Technology ที่จะเข้ามาพลิกโฉมอุตสาหกรรมก่อสร้าง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [Teamhttps://techsauce.co/tech-and-biz/interesting-3-constructiontechnologies](https://techsauce.co/tech-and-biz/interesting-3-constructiontechnologies). (วันที่สืบค้นข้อมูล: 1 สิงหาคม 2565).

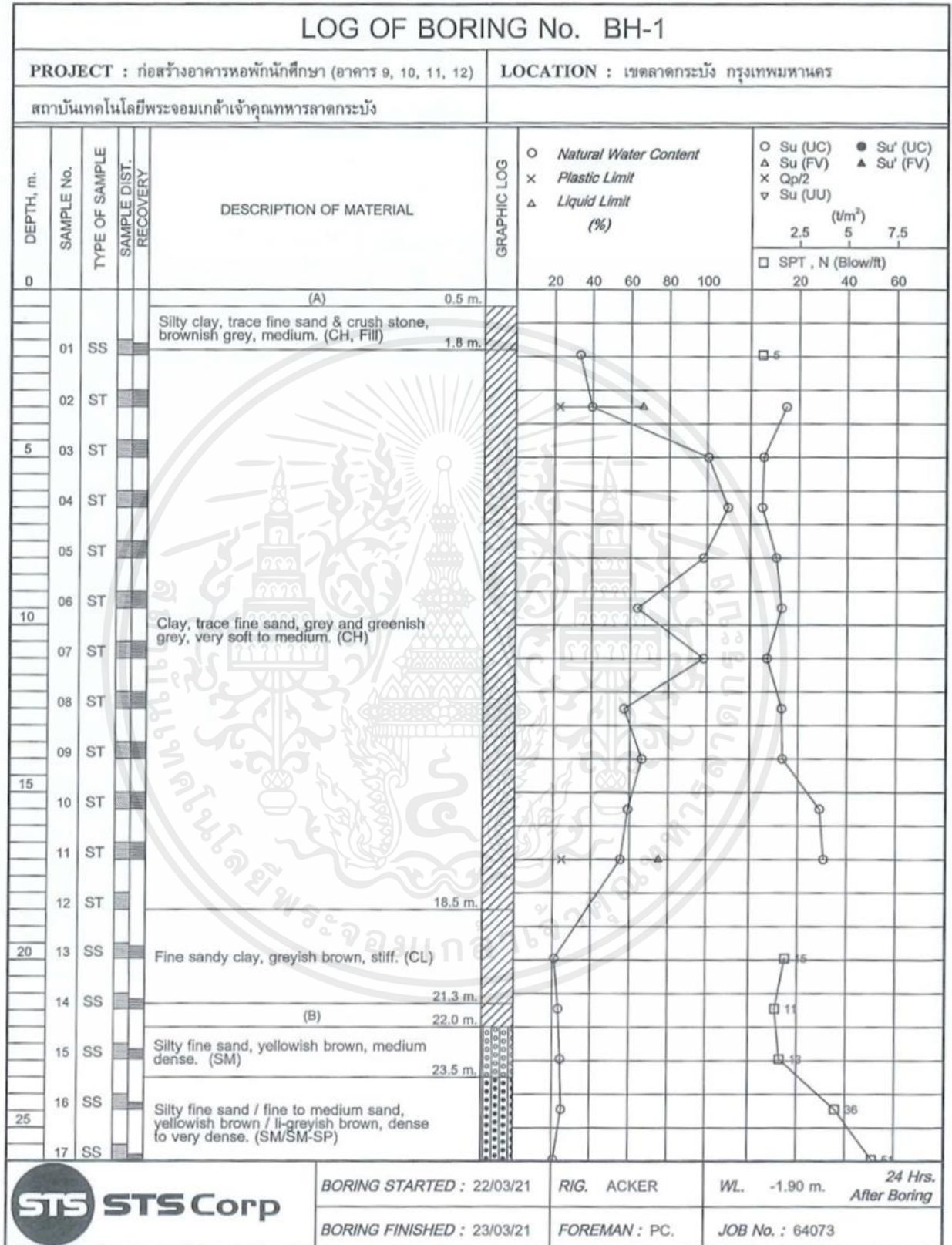


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ตาราง SUMMARY OF TEST RESULTS หลุมเจาะ BH-1

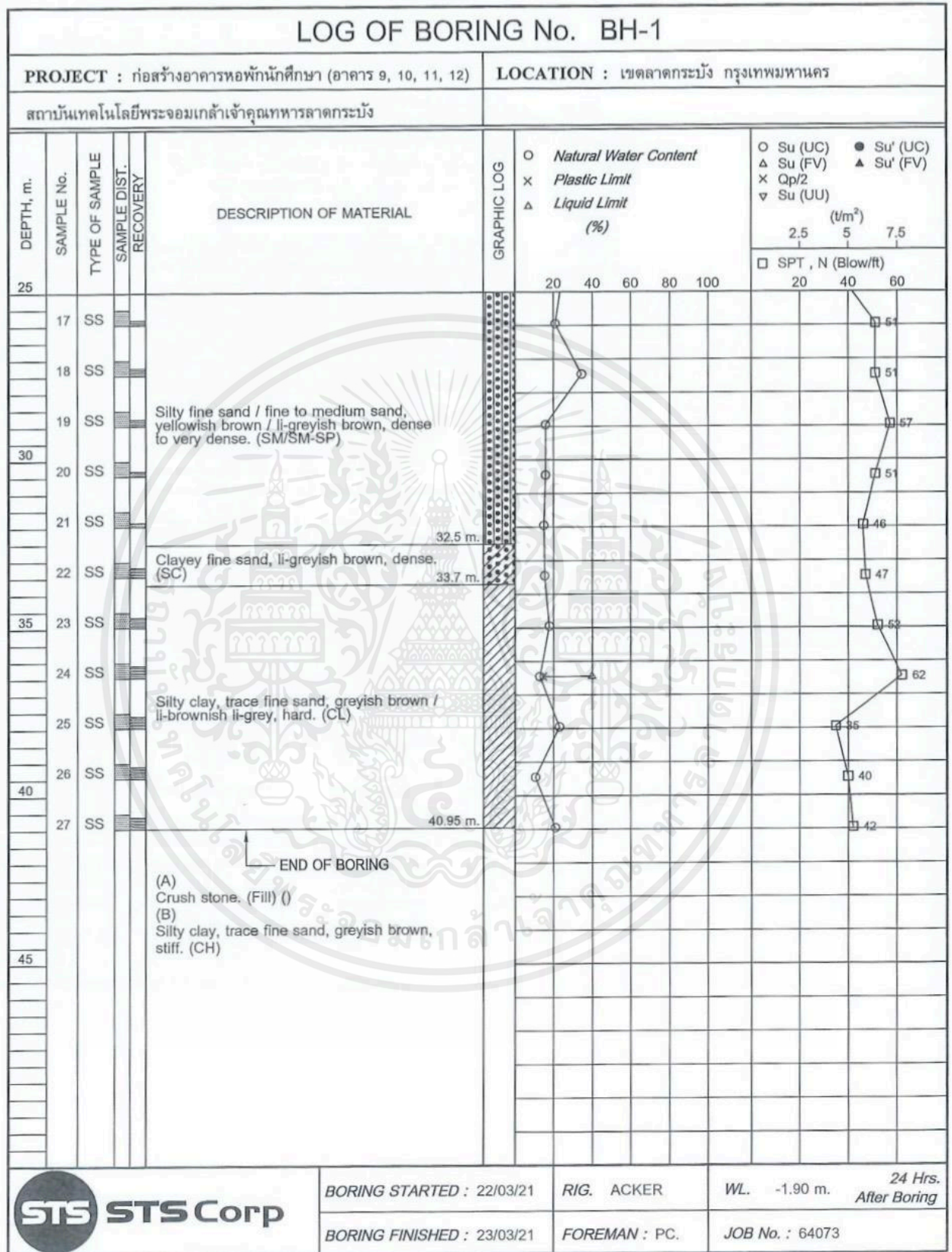
STS CORPORATION COMPANY LIMITED																				
SUMMARY OF TEST RESULTS																				
PROJECT ก่อสร้างอาคารหอพักนักศึกษา (อาคาร 9, 10, 11, 12) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง															LOCATION เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร					
DATE 5/4/2564			BORING No. BH-1				JOB No. 64073				BY NC		OBSERVED W.L. -1.90 m.							
SAMPLE No.	DEPTH		WATER CONTENT %	ATTERBERG LIMIT			WET UNIT WEIGHT t/m^3	SIEVE ANALYSIS					CLASSIFICATION	UNDRAINED SHEAR STRENGTH t/m^2					STANDARD PENETRATION(N) (blow/ft)	
	M.			%				% FINER						UNCONFINED SHEAR		TORVANE SHEAR		UU TEST		POCKET PENETRATION
	FROM	TO		LL.	PL.	PI.		No. 3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200		Qu/2	Qu'/2	Qv	Qv'	Su		
SS-01	1.50	1.95	33.4				1.66						CH						1.3	5
ST-02	3.00	3.50	39.8	66.4	22.7	43.7	1.61						CH	1.85					3.8	
ST-03	4.50	5.00	100.6				1.45					100	CH	0.71						
ST-04	6.00	6.50	110.9				1.37						CH	0.63						
ST-05	7.50	8.00	98.2				1.43						CH	1.36						
ST-06	9.00	9.50	63.9				1.58				100	98	CH	1.65						
ST-07	10.50	11.00	98.4				1.41						CH	0.91					1.3	
ST-08	12.00	12.50	57.0				1.64						CH	1.66						
ST-09	13.50	14.00	66.4				1.59				100	99	CH	1.71					1.3	
ST-10	15.00	15.50	59.2				1.64						CH	3.65					1.3	
ST-11	16.50	17.00	55.4	75.4	24.7	50.7	1.65						CH	3.86					2.5	
ST-12	18.00	18.50		(No Recovery)									(CH)							
SS-13	19.50	19.95	21.1								100	66	CL						5.0	15
SS-14	21.00	21.45	23.3				1.99			(B)	100	97	CL/CH							11
SS-15	22.50	22.95	24.5								100	30	SM							13
SS-16	24.00	24.45	25.1										SM							36
SS-17	25.50	25.95	21.1								100	28	SM							51
SS-18	27.00	27.45	34.6							100	92	10	SM-SP							51
SS-19	28.50	28.95	16.0										SM-SP							57
SS-20	30.00	30.45	16.0							100	95	54	7	SM-SP						51
SS-21	31.50	31.95	15.1							100	94	60	11	SM-SP						46

ตารางที่ ก-2 ตาราง LOG OF BORING หลุมเจาะ BH-1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 70 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ตาราง LOG OF BORING หลุมเจาะ BH-1 (ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 71 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ตาราง Vesic's bearing capacity factor (Das,B.J,1990)

ϕ	N_c	N_q	N_γ	N_q/N_c	$\tan \phi$	ϕ	N_c	N_q	N_γ	N_q/N_c	$\tan \phi$
0	5.14	1.00	0.00	0.20	0.00	26	22.25	11.85	12.54	0.53	0.49
1	5.38	1.09	0.07	0.20	0.02	27	23.94	13.20	14.47	0.55	0.51
2	5.63	1.20	0.15	0.21	0.03	28	25.80	14.72	16.72	0.57	0.53
3	5.90	1.31	0.24	0.22	0.05	29	27.86	16.44	19.34	0.59	0.55
4	6.19	1.43	0.34	0.23	0.07	30	30.14	18.40	22.40	0.61	0.58
5	6.49	1.57	0.45	0.24	0.09	31	32.67	20.63	25.99	0.63	0.60
6	6.81	1.72	0.57	0.25	0.11	32	35.49	23.18	30.22	0.65	0.62
7	7.16	1.88	0.71	0.26	0.12	33	38.64	26.09	35.19	0.68	0.65
8	7.53	2.06	0.86	0.27	0.14	34	42.16	29.44	41.06	0.70	0.67
9	7.92	2.25	1.03	0.28	0.16	35	46.12	33.30	48.03	0.72	0.70
10	8.35	2.47	1.22	0.30	0.18	36	50.59	37.75	56.31	0.75	0.73
11	8.80	2.71	1.44	0.31	0.19	37	55.63	42.92	66.19	0.77	0.75
12	9.28	2.97	1.69	0.32	0.21	38	61.35	48.93	78.03	0.80	0.78
13	9.81	3.26	1.97	0.33	0.23	39	67.87	55.96	92.25	0.82	0.81
14	10.37	3.59	2.29	0.35	0.25	40	75.31	64.20	109.41	0.85	0.84
15	10.98	3.94	2.65	0.36	0.27	41	83.86	73.90	130.22	0.88	0.87
16	11.63	4.34	3.06	0.37	0.29	42	93.71	85.38	155.55	0.91	0.90
17	12.34	4.77	3.53	0.39	0.31	43	105.11	99.02	186.54	0.94	0.93
18	13.10	5.26	4.07	0.40	0.32	44	118.37	115.31	224.64	0.97	0.97
19	13.93	5.80	4.68	0.42	0.34	45	133.88	134.88	271.76	1.01	1.00
20	14.83	6.40	5.39	0.43	0.36	46	152.10	158.51	330.35	1.04	1.04
21	15.82	7.07	6.20	0.45	0.38	47	173.64	187.21	403.67	1.08	1.07
22	16.88	7.82	7.13	0.46	0.40	48	199.26	222.31	496.01	1.12	1.11
23	18.05	8.66	8.20	0.48	0.42	49	229.93	265.51	613.16	1.15	1.15
24	19.32	9.60	9.44	0.50	0.45	50	266.89	319.07	762.89	1.20	1.19
25	20.72	10.66	10.88	0.51	0.47						

*After Vesic (1973)

ตารางที่ ก-4 ค่า Shape, Depth and Inclination factor ที่แนะนำให้ใช้

Factor	Relationship	Source
Shape ^a	$F_{cs} = 1 + \frac{B N_q}{L N_c}$ $F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi$ $F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$ <p>where L = length of the foundation ($L > B$)</p>	De Beer (1970)
Depth ^b	<p>Condition (a): $D_f/B \leq 1$</p> $F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{D_f}{B}$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \frac{D_f}{B}$ $F_{\gamma d} = 1$ <p>Condition (b): $D_f/B > 1$</p> $F_{cd} = 1 + (0.4) \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right)$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right)$ $F_{\gamma d} = 1$	Hansen (1970)
Inclination	$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ} \right)^2$ $F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta}{\phi} \right)^2$ <p>where β = inclination of the load on the foundation with respect to the vertical</p>	Meyerhof (1963); Hanna and Meyerhof (1981)
<p>^a These shape factors are empirical relations based on extensive laboratory tests. ^b The factor $\tan^{-1} (D_f/B)$ is in radians.</p>		

ตารางที่ ก-4 ค่า Shape, Depth and Inclination factor ที่แนะนำให้ใช้ (ต่อ)

Factor	Relationship	Source
Shape ^a	<p>For $\phi = 0$:</p> $F_{cs} = 1 + 0.2 \left(\frac{B}{L} \right)$ $F_{qs} = 1$ $F_{\gamma s} = 1$ <p>For $\phi \geq 10^\circ$:</p> $F_{cs} = 1 + 0.2 \left(\frac{B}{L} \right) \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$ $F_{qs} = F_{\gamma s}$ $= 1 + 0.1 \left(\frac{B}{L} \right) \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$	Meyerhof (1953)
Depth	<p>For $\phi = 0$:</p> $F_{cd} = 1 + 0.2 \left(\frac{D_f}{B} \right)$ $F_{qd} = F_{\gamma d} = 1$ <p>For $\phi \geq 10^\circ$:</p> $F_{cd} = 1 + 0.2 \left(\frac{D_f}{B} \right) \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$ $F_{qd} = F_{\gamma d}$ $= 1 + 0.1 \left(\frac{D_f}{B} \right) \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$	Meyerhof (1963)
Inclination	$F_{ci} = F_{qi} - \frac{(1 - F_{qi})}{(N_q - 1)}$ $F_{qi} = \left[1 - \frac{(0.5)(Q_u) \sin \beta}{Q_u \cos \beta + BLc \cot \phi} \right]^5$ $F_{\gamma i} = \left[1 - \frac{(0.7)(Q_u) \sin \beta}{Q_u \cos \beta + BLc \cot \phi} \right]^5$	Hansen (1970)
^a $L = \text{length} (\geq B)$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 74 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายเจษฎา ภูมิภักดิ์
วัน เดือน ปีเกิด 11 เมษายน 2543
ที่อยู่ 17 หมู่ 1 ตำบลดงตวน อำเภอนาคูน จังหวัดมหาสารคาม 44180
ประวัติการศึกษา 2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ - นามสกุล นายชัชมา สิทธิสาร
วัน เดือน ปีเกิด 12 มกราคม 2544
ที่อยู่ 160 หมู่ 8 ตำบลเสื่อโก้ก อำเภอบ้านดง จังหวัดมหาสารคาม 44120
ประวัติการศึกษา 2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ - นามสกุล นางสาวน้ำเพชร แซ่อึ้ง
วัน เดือน ปีเกิด 28 มิถุนายน 2543
ที่อยู่ 8 หมู่ 1 ตำบลตระแสง อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ 32000
ประวัติการศึกษา 2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง