

การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของอุโมงค์ที่เสริมกำลังด้วย Shotcrete และ Rock Bolt โดยใช้การทดสอบด้วยโมเดลขนาดเล็กและวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

นราวิชญ์ แดงเขียว^{1*} พงศกร พวงชมพู²

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น^{1*2}

อีเมลล์ : domenarawit2543@gmail.com^{1*}

วันที่รับบทความ 16 พฤษภาคม 2568

วันแก้ไขบทความ 7 สิงหาคม 2568

วันตอบรับบทความ 18 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของอุโมงค์โดยการทดสอบด้วยโมเดลขนาดเล็กควบคู่กับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยพิจารณารูปทรงของอุโมงค์หลากหลายรูปแบบ โดยเฉพาะรูปทรงเกือกม้า (Horseshoe) ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนค่าความชะลุดของช่องเปิด (Slenderness Ratio) และประยุกต์ใช้เทคนิคการเสริมกำลังด้วย Shotcrete และ Rock Bolt ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการชี้ให้เห็นว่า อุโมงค์รูปทรงเกือกม้าที่มีความสูงช่องเปิดอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสามารถรับแรงอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งยังให้ความปลอดภัยแก่ช่องเปิดและพื้นที่ใช้งานที่เหมาะสม ขณะเดียวกัน การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ยังแสดงผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการทดลอง ทั้งในด้านรูปแบบการกระจายความเค้น (Stress Distribution) และค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของโครงสร้าง (Maximum Total Displacement) งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่า การผสมผสานการทดสอบด้วยโมเดลขนาดเล็กเข้ากับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการประเมินเสถียรภาพของอุโมงค์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างอุโมงค์ที่มีการเสริมกำลังได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ : อุโมงค์รูปทรงเกือกม้า แบบจำลองขนาดเล็ก การเสริมกำลัง วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

Load-Bearing Behavior of Tunnels Reinforced with Shotcrete and Rock Bolts Using Small-Scale Model Testing and the Finite Element Method

Naravit Kheaphukhio ^{1*}, Pongsagorn Pongchompu ²

Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

Khon Kaen Campus ^{1*,2}

E – mail : domenarawit2543@gmail.com ^{1*}

Received 16 May 2025

Revised 7 August 2025

Accepted 18 August 2025

Abstract

This study aims to investigate the load-bearing behavior of tunnels through small-scale model testing combined with numerical analysis using the Finite Element Method (FEM). Various tunnel cross-sectional geometries were examined, with particular focus on the horseshoe-shaped tunnel. The study considers the influence of modifying the slenderness ratio of the tunnel opening and the application of reinforcement techniques using shotcrete and rock bolts. Laboratory testing results revealed that horseshoe-shaped tunnels with optimally proportioned opening heights can efficiently withstand compressive loads while providing structural safety and adequate usable space. Concurrently, numerical analyses using FEM exhibited results consistent with experimental observations, particularly in terms of stress distribution and maximum total displacement of the tunnel structure. The findings demonstrate that the integration of small-scale physical testing and FEM analysis provides a reliable approach for evaluating tunnel stability and offers practical insights for the structural design of reinforced tunnels

Keywords : Horseshoe-shaped tunnel, Small-scale model, Structural reinforcement, Finite Element Method (FEM)

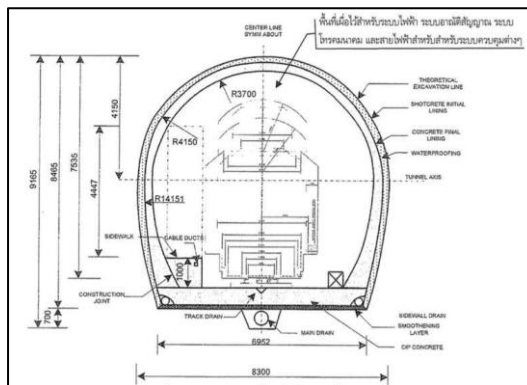
1. บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยประสบเหตุการณ์อุโมงค์ถล่มระหว่างการก่อสร้างหลายกรณี โดยเฉพาะในโครงการโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ เช่น รถไฟฟ้าใต้ดิน ระบบระบายน้ำในเขตเมือง และรถไฟความเร็วสูง ซึ่งหนึ่งในกรณีที่ได้รับความสนใจอย่างมากคือการถล่มของอุโมงค์ระหว่างการก่อสร้างโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีนในจังหวัดนครราชสีมา เมื่อเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2567 ดังรูปที่ 1 เหตุการณ์ดังกล่าวไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดความสูญเสียด้านชีวิตและทรัพย์สินเท่านั้น ดังนั้น ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของอุโมงค์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในประเด็นด้านรูปทรงของอุโมงค์ ลักษณะของช่องเปิด และเทคนิคการเสริมกำลัง ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพของโครงสร้างโดยตรง



รูปที่ 1 เหตุการณ์อุโมงค์รถไฟความเร็วสูงถล่มที่นครราชสีมา
ที่มา: JS100. (2024)

อุโมงค์รูปทรงเกือกม้าหรือ Horseshoe Tunnel ดังรูปที่ 2 เป็นหนึ่งในรูปแบบที่ได้รับความนิยมในการออกแบบโครงสร้างใต้ดิน เนื่องจากสามารถรองรับแรงกระทำด้านข้างจากดินได้ดี มีพื้นที่ใช้สอยที่เหมาะสมกับระบบสาธารณูปโภค และมีความยืดหยุ่นในการออกแบบมากกว่ารูปทรงอื่น อย่างไรก็ตาม เมื่ออุโมงค์ถูกก่อสร้างในพื้นที่ที่มีสภาพทางธรณีวิทยาที่อ่อนแอหรือไม่แน่นอน เช่น ชั้นดินอ่อน อาจทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเสียรูปหรือวิบัติของโครงสร้างได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีอัตราส่วนความขรุขระของช่องเปิด (Slenderness Ratio) มีค่าสูง ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างมีแนวโน้มเกิดการโก่งตัวภายใต้แรงอัด การเสริมกำลังด้วยเทคนิคทางวิศวกรรม เช่น การพ่นคอนกรีต (Shotcrete) ดังรูปที่ 3 (ก) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและกระจายแรงบนผิวผนังอุโมงค์ และการติดตั้ง Rock Bolt ดังรูปที่ 3 (ข) เพื่อช่วยยึดดินโดยรอบและลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง จึงเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มเสถียรภาพของอุโมงค์ ซึ่งจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้างให้มีความมั่นคงในด้านความปลอดภัย



รูปที่ 2 อุโมงค์รูปทรงเกือกม้า (Horseshoe Tunnel)
ที่มา: ITD-RT. (2020)



3 (ก) การพ่นคอนกรีต (Shotcrete)



3 (ข) การติดตั้ง Rock Bol

รูปที่ 3 การเสริมกำลังด้วยเทคนิคทางวิศวกรรม
ที่มา: (ก) (Sika Thailand. 2014) และ (ข) (CAN Geotechnical Ltd. 2017)

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของอุโมงค์ งานวิจัยนี้ได้้นำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักด้วยโมเดลขนาดเล็กมาใช้ โดยสร้างโครงสร้างอุโมงค์จากอิฐมวลเบา (Q-CON) โดยสามารถขึ้นรูปและตัดแต่งให้ได้ขนาดตามที่กำหนดได้อย่างแม่นยำและสะดวก อีกทั้งยังมีคุณสมบัติการรับแรงอัดที่สม่ำเสมอและเหมาะสมสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับอุโมงค์รูปทรงอื่น ได้แก่ สี่เหลี่ยม วงรี และครึ่งวงกลม เพื่อประเมินอิทธิพลของรูปทรงที่แตกต่างกันต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนัก การเสียรูปและเสถียรภาพของโครงสร้าง โดยเฉพาะในรูปทรงเกือกม้า ได้มีการปรับระดับความสูงของช่องเปิดเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) ต่อความมั่นคง และทำการเสริมกำลังด้วยเทคนิค Shotcrete และ Rock Bolt เพื่อประเมินผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยรวมของโครงสร้าง การทดสอบดำเนินการด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) เพื่อวัดค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดก่อนเกิดการวิบัติ ส่วนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขใช้วิธี Finite Element Method (FEM) ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D ผ่าน License ของ Dr. Pongsagorn Pongchompu เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้าง ได้แก่ การกระจายความเค้น (Stress Distribution) และค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของโครงสร้าง (Maximum Total Displacement) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงเสถียรภาพของโครงสร้างในแต่ละกรณี จากการศึกษาที่ผ่านมา โดย Frank (2024) ได้ทำการวิเคราะห์การกระจายความเค้นใน Shotcrete ของอุโมงค์ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน และพบว่าอุโมงค์รูปทรงเกือกม้ามีระดับความเค้นสูงสุดต่ำกว่ารูปทรงวงกลมและวงรี ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการลดการกระจาย

ความเค้น (Stress Distribution) ได้ดีกว่า ขณะที่ Mohammed และ Hruběšová (2018) ศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์รูปทรงเกือกม้าโดยใช้โปรแกรม MIDAS GTS NX ภายใต้แรงสถิตและพลศาสตร์ พบว่ารูปทรงเกือกม้าให้การกระจายความเค้นและรูปแบบการเสียรูปที่สมดุลที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปทรงอื่น ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายเฉพาะจุด ในขณะที่ Clay และ Takacs (1996) ได้เสนอแนวคิดเชิงวิศวกรรมเกี่ยวกับรูปทรงของอุโมงค์ในชั้นดินอ่อน โดยเน้นความสำคัญของการออกแบบช่องเปิดที่มีความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและพื้นที่ใช้งาน เพื่อเพิ่มความมั่นคงและลดความเสี่ยงต่อการทรุดตัวของโครงสร้าง ทั้งนี้งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักของอุโมงค์ผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักและรูปแบบการเสียรูปของอุโมงค์รูปทรงต่าง ๆ โดยเน้นที่อุโมงค์รูปทรงเกือกม้า ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดและเสริมกำลังด้วย Shotcrete และ Rock Bolt โดยดำเนินการผ่านการทดสอบกำลังรับน้ำหนักด้วยโมเดลขนาดเล็กและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ผ่านโปรแกรม Plaxis 2D

3. วิธีการวิจัย

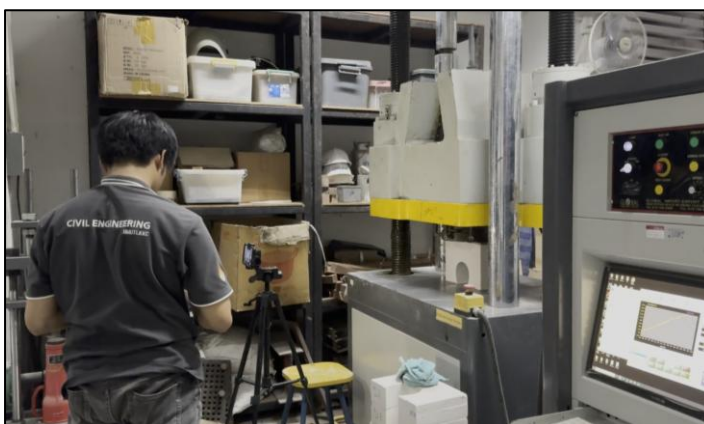
3.1 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักของอุโมงค์ด้วยโมเดลขนาดเล็ก

3.1.1 โมเดลขนาดเล็กอุโมงค์ใช้วัสดุอิฐมวลเบา (Q-CON) ขนาด $30 \times 20 \times 7.5$ เซนติเมตร โดยให้มีรูปทรงของช่องเปิดอุโมงค์ที่แตกต่างกันออกไป โดยเฉพาะอุโมงค์รูปทรงเกือกม้าที่อ้างอิงในโครงการก่อสร้าง รถไฟความเร็วสูงช่วงมาบะเขว-ชุมทางถนนจิระ เพื่อให้ได้สัดส่วนและพฤติกรรมที่สอดคล้องกับภาคสนาม และมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของช่องเปิด เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าความขรุขระ รวมถึงการศึกษากการเสริมกำลังด้วย Shotcrete และ Rock Bolt โดยกำหนดรายละเอียดรูปแบบของตัวอย่างทดสอบ ดังตารางที่ 1

3.1.2 จัดตำแหน่งโมเดลขนาดเล็กวางบนฐานรับแรงของเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) โดยมีการวางแผ่นเหล็กไว้ระหว่างฐานของเครื่องกับตัวอย่าง เพื่อให้การกระจายแรงกระทำเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และติดตั้งกล้องถ่ายภาพเพื่อใช้ร่วมกับระบบ Digital Image Correlation (DIC) สำหรับวิเคราะห์การเสียรูปของโครงสร้างในระหว่างการทดสอบ ดังรูปที่ 4

3.1.3 การทดสอบใช้วิธี โหลดแรงแนวตั้งแบบต่อเนื่อง (Continuous Loading) โดยอาศัยความเร็วคงที่ในการเพิ่มแรงที่ $54,000 \text{ N/min}$ ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของเครื่องทดสอบ UTM เพื่อให้โครงสร้างรับแรงอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งเกิดจุดวิบัติ (Failure) หรือแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการเสียรูปอย่างชัดเจน

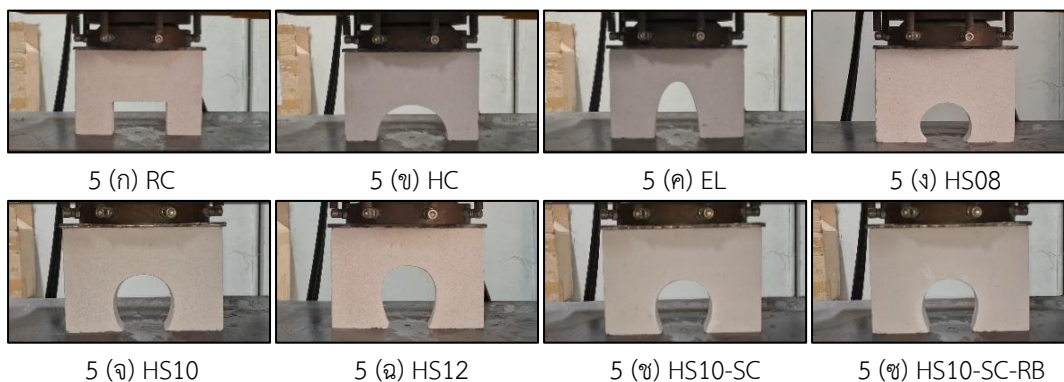
3.1.4 การทดสอบทั้งหมดดำเนินการอ้างอิง มาตรฐาน ASTM C109/C109M ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลสำหรับการทดสอบแรงอัดของวัสดุคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักและรูปแบบการเสียรูปโดยเริ่มต้นจากการทดสอบ Solid Block (SB) ที่ไม่มีช่องเปิดเพื่อใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงเบื้องต้นสำหรับเปรียบเทียบกับอุโมงค์แต่ละแบบ โดยทดสอบจนเกิดการวิบัติ เพื่อให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางโครงสร้างของอุโมงค์แต่ละรูปทรง ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักด้วยเครื่องทดสอบ UTM

ตารางที่ 1 รายละเอียดรูปแบบของตัวอย่างทดสอบ

รูปทรงอุโมงค์	รหัสตัวอย่าง	รูปที่แสดง	หมายเหตุ
Solid Block	SB		ตัวควบคุมอ้างอิงสำหรับค่ากำลังรับแรงอัด
Rectangular	RC	5 (ก)	
Half-Circle	HC	5 (ข)	
Elliptical	EL	5 (ค)	
Horseshoe H = 8 cm	HS08	5 (ง)	อุโมงค์รูปทรงเกือกม้า ความสูงช่องเปิด 10 ซม. อ้างอิงรูปทรงที่ใช้ในโครงการจริง
Horseshoe H = 10 cm	HS10	5 (จ)	
Horseshoe H = 12 cm	HS12	5 (ฉ)	
Horseshoe, Shotcrete	HS10-SC	5 (ช)	Rock Bolt: ใช้แท่งเดียวไฟเบอร์กลาส
Horseshoe, Shotcrete and RockBolt	HS10-SC-RB	5 (ซ)	Shotcrete: ATM107 ผสมหมันโป๊วอะครีลิค Wire Mesh: ใช้ตาข่ายไฟเบอร์เมช Weber



รูปที่ 5 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักของอุโมงค์ด้วยโมเดลขนาดเล็กในแต่ละรูปทรง

3.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite Element Method)

3.2.1 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ของงานวิจัยนี้ผ่านโปรแกรม Plaxis 2D เพื่อจำลองพฤติกรรมทางโครงสร้างของอุโมงค์ในลักษณะสองมิติ กำหนดให้เป็น Plane Strain Condition ซึ่งเหมาะสมกับอุโมงค์ที่มีความยาวมากเมื่อเทียบกับหน้าตัด และสามารถลดความซับซ้อนของโมเดลในขณะที่ยังคงความแม่นยำในการวิเคราะห์ไว้ได้อย่างเหมาะสม โดยรายละเอียดแบบจำลองอิงตามรูปทรงของอุโมงค์ของโมเดลขนาดเล็ก

3.2.2 วัสดุของโครงสร้างอุโมงค์ถูกจำลองด้วย โมเดลวัสดุ Mohr–Coulomb เพื่อสะท้อนพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและการเสียรูปได้ใกล้เคียงกับอิฐมวลเบาที่ใช้การทดสอบกำลังรับน้ำหนักของอุโมงค์ด้วยโมเดลขนาดเล็ก โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ทางกล ได้แก่ Young’s Modulus และ Poisson’s Ratio ของวัสดุ ดังตารางที่ 2

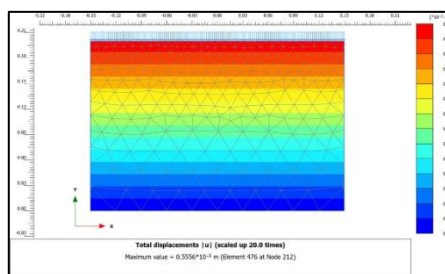
3.2.3 ขนาดของพื้นที่จำลองได้รับการออกแบบให้มีความกว้างและความสูงอย่างเหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากขอบเขตของแบบจำลอง (Boundary Effect) และการสะท้อนของคลื่นความเค้น (Stress Reflection) โดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ใกล้ช่องเปิดของอุโมงค์ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สะท้อนพฤติกรรมของโครงสร้างได้อย่างเหมาะสม

3.2.4 การวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ใช้การแบ่ง Mesh ในระดับหยาบ (Coarse Mesh) เพื่อเพิ่มความเร็วในการคำนวณเชิงตัวเลข อย่างไรก็ตาม ได้มีการเพิ่มความหนาแน่นของ Mesh เฉพาะบริเวณที่มีความสำคัญทางโครงสร้าง เช่น บริเวณผิวสัมผัสระหว่างดินกับโครงสร้างอุโมงค์ และบริเวณแนวโค้งหรือจุดที่คาดว่าจะเกิดการเสียรูปหรือสะสมความเค้นสูง เพื่อให้สามารถติดตามพฤติกรรมของโครงสร้างในจุดวิกฤตได้

3.2.5 กำหนดแรงกระทำในแนวดิ่งเป็นแบบกระจายสม่ำเสมอ (Uniform Load) เลือกที่ -1000 กิโลนิวตันต่อเมตร โดยพิจารณาจากผลการทดสอบด้วยโมเดลขนาดเล็กรูปทรง Solid Block ซึ่งแสดงค่าการเสียรูปประมาณ 0.50 มิลลิเมตร การเลือกค่าโหลดนี้เพื่อให้ผลการการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แสดงค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของโครงสร้าง (Maximum Total Displacement) และรูปแบบการกระจายความเค้น (Stress Distribution) อย่างเหมาะสม ดังรูปที่ 6

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Plaxis 2D

วัสดุ	E (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	ν	แบบจำลองวัสดุ
คอนกรีตอุโมงค์ (Q-CON)	2.00×10^6	5.88	0.25	Mohr Coulomb
Shotcrete	3.00×10^7	17.60	0.45	Mohr Coulomb
Rock Bolt	5.00×10^4	21.57	0.25	Linear Elastic
Mesh	8.00×10^8	20.00	0.23	Linear Elastic



รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แสดงค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของโครงสร้าง (Maximum Total Displacement) และรูปแบบการกระจายความเค้น (Stress Distribution)

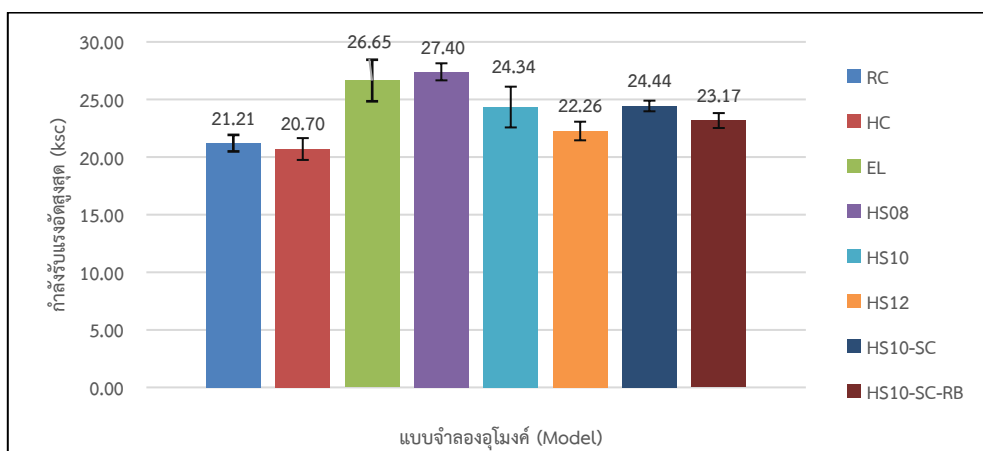
4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 จากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของอุโมงค์ด้วยโมเดลขนาดเล็กตามรูปที่ 7 ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (FEM) ซึ่งในการศึกษาอุโมงค์รูปทรงต่าง ๆ ได้แก่ RC, HC และ EL มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุด 21.21, 20.70 และ 26.65 ksc ตามลำดับ โดยอธิบายผลการวิเคราะห์ด้วย FEM ร่วมกับรูปแบบการวิบัติหลังจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักในลักษณะเส้นที่อยู่บนโมเดลขนาดเล็ก พบว่าค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของโครงสร้าง (Maximum Total Displacement) แสดงอยู่ที่ 1.055×10^{-3} , 0.4029×10^{-3} และ 0.8408×10^{-3} เมตร ตามลำดับ ในขณะที่รูปแบบการกระจายความเค้น (Stress Distribution) ของรูปทรง RC ดังรูปที่ 8 (ก) แสดงการกระจายที่ไม่สมดุล ความเค้นถูกสะสมบริเวณกลางและมุมบนของช่องเปิด ส่งผลมีแนวโน้มเกิดรอยวิบัติเริ่มต้นที่มุมนั้น และเกิดการวิบัติในลักษณะรอยร้าวแนวเฉียงจากมุมช่องเปิดพาดขึ้นสู่ด้านบน สำหรับอุโมงค์รูปทรง HC ดังรูปที่ 8 (ข) แสดงการสะสมอยู่บริเวณยอดโค้ง ซึ่งเป็นจุดรับแรงแนวดิ่งในที่ที่ไม่มีโครงสร้างด้านข้างมาช่วยรองรับ ส่งผลให้ความสามารถกำลังรับแรงอัดต่ำ และแสดงการวิบัติในลักษณะออกด้านข้างของแนวโค้งสำหรับ ในส่วนของอุโมงค์รูปทรง EL ดังรูปที่ 8 (ค) มีการกระจายความเค้นจากแรงกดถูกส่งต่อมายังผนังด้านข้างที่ลาดเอียงและฐานที่แคบ ทำให้เกิดการบวมออกทางด้านข้างและการสะสมความเค้นสูงในบริเวณผนังมากกว่าฐาน และแสดงการวิบัติในลักษณะบวมออกด้านข้าง

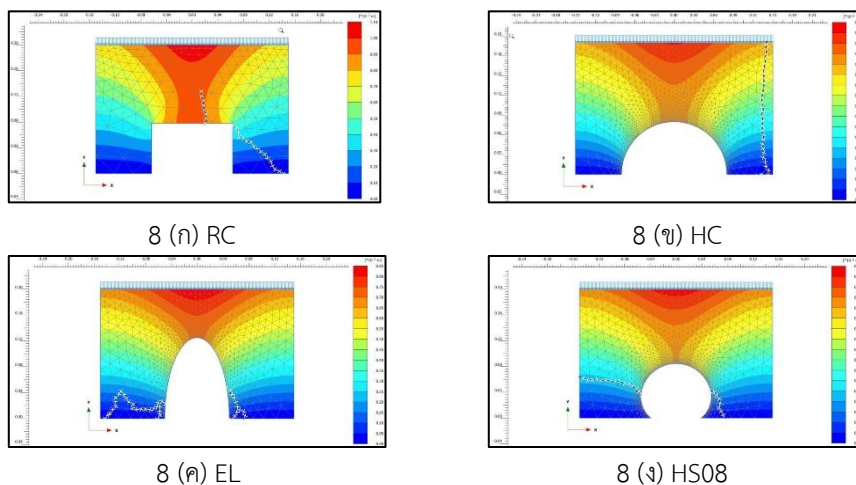
4.2 ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 ในกรณีการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดในอุโมงค์รูปทรงเกือกม้า ได้แก่ HS08, HS10 และ HS12 พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดลดลงจาก 27.40, 24.34 และ 22.26 ksc ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM พบว่า ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของโครงสร้าง (Maximum Total Displacement) อยู่ที่ 0.8265×10^{-3} , 1.074×10^{-6} และ 1.184×10^{-6} เมตร ตามลำดับ แม้ว่า HS08 ดังรูปที่ 8 (ง) มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดแต่รูปแบบการกระจายความเค้น (Stress Distribution) แสดงบริเวณห่างจากช่องเปิดไปยังส่วนบนของโครงสร้าง ซึ่งชี้ว่าจุดที่เคลื่อนตัวไม่กระทบต่อความมั่นคงของช่องเปิดจึงยังสามารถรับแรงได้ดี ขณะที่ HS10 ดังรูปที่ 8 (จ) และ HS12 ดังรูปที่ 8 (ฉ) แม้มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ต่ำกว่าแต่เกิดบริเวณใกล้กับขอบด้านบนของช่องเปิด ซึ่งเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดการวิบัติ ลักษณะนี้สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังรับน้ำหนักของด้วยโมเดลขนาดเล็กที่พบว่า HS08 แม้เกิดการเสียรูปมากแต่พฤติกรรมการแตกร้าวแสดงถึงความสมดุลของแรงและยังสามารถรับแรงได้ดี ในขณะที่ HS12 มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่น้อยกว่าแต่เกิดบริเวณที่ใกล้ช่องเปิดเด่นชัด จึงสะท้อนว่าตำแหน่งของการเคลื่อนตัวมีผลสำคัญต่อความปลอดภัยของโครงสร้างและ HS10 ที่มีความสูงและพื้นที่ของช่องเปิดอยู่ในระดับที่เหมาะสมทำให้สามารถกระจายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแสดงการวิบัติในลักษณะรอยร้าวแนวเฉียงจากบริเวณฐานและมุมช่องเปิดพาดขึ้นสู่ด้านบนในระดับที่เหมาะสม ในส่วนของ HS08 มีความสูงของช่องเปิดน้อยจึงทำให้พื้นที่ช่องเปิดในแนวราบมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้รับกำลังอัดได้ดี โดยแสดงลักษณะการวิบัติจากมุมช่องเปิดสู่ฐานและด้านข้างในทางกลับกัน HS12 มีความสูงช่องเปิดมาก ทำให้แรงอัดที่กระทำจากด้านบนไม่สามารถถ่ายลงฐานได้อย่างสมดุล โดยแสดงลักษณะการวิบัติเช่นเดียวกันที่มีแนวเฉียงจากฐานขึ้นสู่มุมบนของช่องเปิดบริเวณด้านข้างและฐานอุโมงค์อย่างชัดเจน

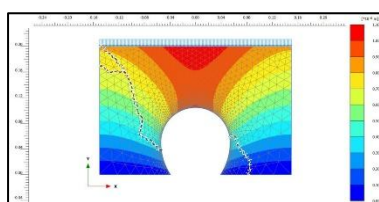
4.3 ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 เมื่อพิจารณาผลของการเสริมกำลังในอุโมงค์รูปทรงเกือกม้า ได้แก่ HS10-SC และ HS10-SC-RB พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดลดลงจาก 24.436 และ 23.17 ksc ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าการเสริมกำลังด้วย Shotcrete เพียงอย่างเดียวจะช่วยค้ำยันผิว (Lining) และเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวของช่องเปิดทำให้ควบคุมการเกิดรอยร้าว ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมากกว่ารูปที่ไม่เสริมกำลัง (HS10) เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเสริมกำลังร่วมกับ Rock Bolt จึงเกิดความไม่ต่อเนื่องทำให้มีการสะสมของความเค้น (Stress Concentration) บริเวณรอยต่อส่งผลให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่ารูปทรงที่ไม่เสริมกำลัง (HS10) แต่การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญคือพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบเหนียว (Ductile) มากขึ้นโดย Rock Bolt ทำหน้าที่คล้ายเสาสมอช่วยยึดเหนี่ยววัสดุไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถรักษารูปทรงและเสถียรภาพโดยรวมไว้ได้ ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM พบว่า

ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของโครงสร้าง (Maximum Total Displacement) ลดลงจาก 0.4544×10^{-3} และ 0.1319×10^{-3} เมตร ตามลำดับ ในกรณีของ HS10-SC ดังรูปที่ 8 (ข) มีลักษณะการวิบัติคล้ายกับรูปแบบที่ไม่มีการเสริมกำลัง (HS10) แต่การแตกร้าวที่บริเวณผิวของช่องเปิดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายความเค้น (Stress Distribution) มีการลดความเข้มข้นและกระจายตัวออกจากขอบช่องเปิดมากขึ้น แสดงถึงประสิทธิภาพของ Shotcrete ในการเสริมผิวโครงสร้างและลดการเสียรูป ในส่วนของ HS10-SC-RB ดังรูปที่ 8 (ข) มีลักษณะการวิบัติคล้ายกับรูปแบบที่ผ่านมา แต่ความรุนแรงของการวิบัติบริเวณผิวของช่องเปิดลดลงอย่างชัดเจน โดยมีรูปแบบการกระจายความเค้น (Stress Distribution) ที่ครอบคลุมทั่วแนวโค้งด้านข้าง แสดงถึงความสามารถในการลดการเสียรูปแบบเฉพาะจุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทของ Rock Bolt ในการควบคุมการถ่ายแรงภายใน แม้ค่ากำลังอัดลดลงแต่ในภาพรวมการเสริมกำลังด้วย Shotcrete และ Rock Bolt ร่วมกันมีส่วนสำคัญต่อการเพิ่มเสถียรภาพของอุโมงค์ ซึ่งในทางปฏิบัติหมายถึงความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

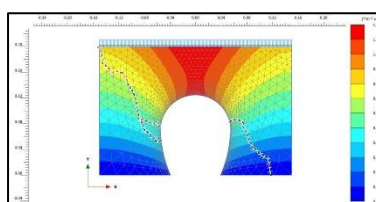


รูปที่ 7 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุโมงค์แต่ละรูปทรง

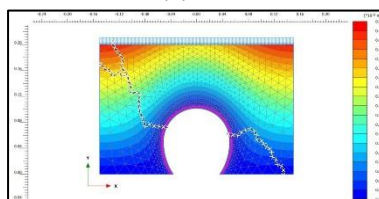




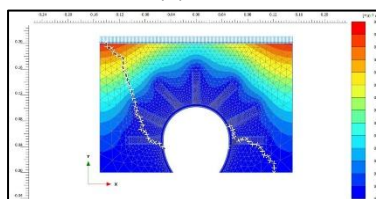
8 (จ) HS10



8 (ฉ) HS12



8 (ช) HS10-SC



8 (ซ) HS10-SC-RB

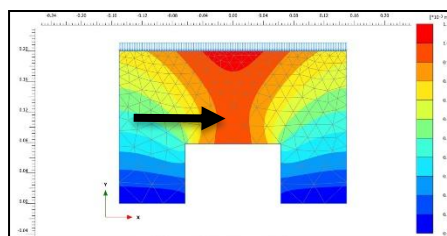
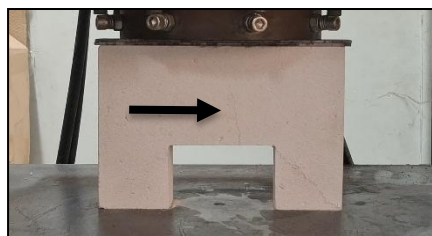
รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM และลักษณะการวิบัติของอุโมงค์แต่ละรูปทรง

5. อภิปรายผลและสรุปผล

จากการศึกษาด้วยการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของอุโมงค์ด้วยโมเดลขนาดเล็กและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ารูปทรงของอุโมงค์มีอิทธิพลโดยตรงต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักและรูปแบบการวิบัติ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับผลการจำลองได้ดังรูปที่ 9

เมื่อพิจารณาอุโมงค์รูปทรงสี่เหลี่ยม (RC) พบความสอดคล้องโดยภาพถ่ายผลการทดสอบ ดังรูปที่ 9 (ก) จะเห็นแนวการวิบัติขยายตัวในแนวตั้งด้านบนของช่องเปิด ตำแหน่งดังกล่าวสอดคล้องโดยตรงกับผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 9 (ข) ที่แสดงให้เห็นว่าบริเวณด้านบนของช่องเปิดมีการกระจายของความเค้น (Stress Distribution)

การวิเคราะห์นี้ช่วยยืนยันว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายตำแหน่งและแนวโน้มการวิบัติของโครงสร้างได้และชี้ให้เห็นรูปทรงที่มีมุมเป็นจุดอ่อนสำคัญทางโครงสร้างที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการรับน้ำหนัก ซึ่งพฤติกรรมการวิบัตินี้ยังพบในลักษณะที่คล้ายคลึงกันในอุโมงค์รูปทรงอื่น ๆ ที่มีมุมเป็นส่วนประกอบ โดยแสดงการเริ่มต้นของการวิบัติจากบริเวณดังกล่าวอย่างชัดเจน ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในผลการวิจัยข้างต้น



9 (ก) ลักษณะการวิบัติจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนัก 9 (ข) รูปแบบการกระจายความเค้นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 9 แสดงลักษณะการวิบัติและรูปแบบการกระจายความเค้นที่สอดคล้องกัน

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า อุโมงค์รูปทรงเกือกม้า (HS10) มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 24.34 ksc รองจากรูปทรงวงรี (EL) แต่ให้ความสมดุลที่ดีกว่าในด้านความปลอดภัยของช่องเปิดและประสิทธิภาพในการใช้งานพื้นที่ภายใน ขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อุโมงค์รูปทรงเกือกม้า (HS10) แสดงค่าการเคลื่อนตัว

สูงสุดต่ำที่สุด (1.074×10^{-6} เมตร) และมีการกระจายความเค้นอย่างต่อเนื่องจากแนวโค้งด้านบนลงสู่ฐานโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงถึงความเหมาะสมทั้งในด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการใช้งานจริง

การเปรียบเทียบความสูงของช่องเปิดระหว่าง HS08, HS10 และ HS12 แสดงให้เห็นว่า HS10 มีสัดส่วนความสูงของช่องเปิดที่สมดุลที่สุด โดยมีพื้นที่แนวราบและแนวตั้งที่เพียงพอต่อการใช้งาน และสามารถถ่ายแรงลงสู่ฐานได้ดี ในขณะที่ HS08 แม้มีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด แต่พื้นที่ใช้งานจำกัด และ HS12 แม้มีพื้นที่ภายในมากขึ้นแต่ค่าการเคลื่อนตัวกลับเพิ่มขึ้นในบริเวณที่อาจส่งผลต่อความปลอดภัยของช่องเปิด จึงไม่เหมาะสมในการใช้งานจริง

การเสริมกำลังด้วย Shotcrete และ Rock Bolt ในอุโมงค์รูปทรงเกือกม้ายังแสดงผลที่ชัดเจนในการเพิ่มความมั่นคงให้กับโครงสร้าง โดย HS10-SC-RB ให้ค่าการเคลื่อนตัวต่ำ (0.1319×10^{-3} เมตร) และแม้ว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดจะลดลงจากการเกิดความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้าง แต่ประโยชน์ที่สำคัญคือพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบเหนียว (Ductile) มากขึ้นโดย Rock Bolt ช่วยยืดเหนียววัสดุไว้ด้วยกันทำให้โครงสร้างสามารถรักษาสภาพและเสถียรภาพโดยรวมไว้ได้ ส่งผลให้เพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

ทั้งนี้ข้อมูลทั้งหมดสอดคล้องกับรูปแบบอุโมงค์จากรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม (EIA) ของโครงการรถไฟฟ้าช่วงมาบตาพุด-ชุมทางถนนจิระ ซึ่งเลือกใช้รูปทรงเกือกม้าความสูงช่องเปิดใกล้เคียงกับอุโมงค์รูปทรงเกือกม้า (HS10) และมีการเสริมกำลังในลักษณะเดียวกัน ยืนยันถึงความเหมาะสมของผลการศึกษานี้ในการนำไปใช้ในงานก่อสร้างอุโมงค์ในพื้นที่จริง

แนวคิดพื้นฐานในการออกแบบอุโมงค์มุ่งเน้นไปที่การสร้างสมดุลระหว่างความแข็งแรงของโครงสร้างและพื้นที่ใช้งานที่เพียงพอ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและลดความเสี่ยงในการทรุดตัวตามที่เสนอโดย Clay และ Takacs (1996) ในบริบทนี้อุโมงค์รูปทรงเกือกม้าได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เนื่องจากประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างที่สามารถตอบโจทย์ดังกล่าวได้ดี งานวิจัยเชิงตัวเลขของ Frank (2024) ได้วิเคราะห์และยืนยันว่ารูปทรงเกือกม้าสามารถกระจายความเค้นได้ดีกว่ารูปทรงวงกลมและวงรี ซึ่งส่งผลให้ระดับความเค้นสูงสุดในโครงสร้างต่ำกว่า ในขณะที่เดียวกันการศึกษาของ Mohammed และ Hrubesová (2018) ก็ได้ข้อสรุปที่สอดคล้องกันว่ารูปทรงเกือกม้าให้การกระจายความเค้นและรูปแบบการเสียรูปที่สมดุลที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเพิ่มเติมคือการใช้โมเดลขนาดเล็กเพื่อยืนยันพฤติกรรมดังกล่าวและแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วย Shotcrete และ Rock Bolt ในการเพิ่มเสถียรภาพซึ่งเป็นการขยายขอบเขตความรู้และให้ข้อมูลเชิงประจักษ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรมได้จริง

6. ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอุโมงค์ให้มีเสถียรภาพมากขึ้น โดยเฉพาะในด้านการเลือกขนาดช่องเปิดที่เหมาะสม เพื่อลดความเสี่ยงจากการวิบัติและเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของโครงสร้างได้ต้น อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ภายใต้แรงเค้นเฉียง และพัฒนาแบบจำลองในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น มีแรงดันน้ำใต้ดินหรือแรงกระทำแบบไม่สมมาตร

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่นที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- บุญเทพ นาเนกรังสรรค์. (2552). *วิศวกรรมฐานรากและการก่อสร้างอุโมงค์*. สำนักพิมพ์วิศวกรรมขอนแก่น.
- พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกุล. (2563). *คู่มือวิศวกรรมฐานราก*. สำนักพิมพ์วิศวกรรมโยธา.
- สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. (2550). *วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ITD-RT. (2563). รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการระบบรถไฟทางคู่เพื่อการขนส่งและการจัดการโลจิสติกส์ (ระยะที่ 1) แนวเส้นทางช่วงมาบะเปา-ชุมทางถนนจิระ. การรถไฟแห่งประเทศไทย.
- JS100. (2567, 29 สิงหาคม). รายงานดินถล่ม อุโมงค์รถไฟความเร็วสูงไทย-จีน.
<https://www.js100.com/en/site/news/view/143295>
- Sika Thailand. (2014). *Shotcrete products and Sika's tunneling and mining solutions*.
<https://tha.sika.com/en/construction/concrete-admixtures/shotcrete-products.html>
- ASTM International. (2023). *ASTM C109/C109M-23: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars*. ASTM International.
- CAN Geotechnical Ltd. (2017). *Shute Shelve Tunnel: De-vegetation & rock bolting*.
<https://www.can.ltd.uk/casestudies/shute-shelve-tunnel-de-vegetation-rock-bolting>
- Clay, R. B., & Takacs, A. P. (1996, March 25). *Contractual aspects of testing shotcrete and rock bolts*. Dar Al Handasah. <https://www.academia.edu/11326129>
- Frank, E. (2024, September 9). *Evaluating the impact of tunnel shape on shotcrete lining stress: Implications for tunnel design and construction*. EasyChair Preprint No. 14756
<https://easychair.org/publications/preprint/dqR4>
- Mohammed, K., & Hrubešová, E. (2018, January). *Assessment of static and dynamic stresses in horse-shoe tunnel with connecting gallery using finite element method: A case study*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/330442419>
- Plaxis. (2022). *PLAXIS 2D reference manual (Version 22.01)*. Bentley Systems.
<https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46097/download-plaxis-manuals>

คุณค่าทางวิชาการ

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการรับน้ำหนักของอุโมงค์รูปทรงต่าง ๆ กับการเสริมกำลังด้วยเทคนิค Shotcrete และ Rock Bolt ผ่านการทดสอบโมเดลขนาดเล็กและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จะทำให้เข้าใจประมาณพฤติกรรมของโครงสร้างได้มากยิ่งขึ้น ประโยชน์ที่ได้จะเป็นฐานข้อมูลทางวิศวกรรมเพื่อสนับสนุนการออกแบบอุโมงค์ให้มีความมั่นคง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีชั้นดินอ่อนหรือมีข้อจำกัดด้านพื้นที่และความปลอดภัย ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างอุโมงค์ในโครงการระบบขนส่งหรือระบบสาธารณูปโภคในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ