

การประเมินเสถียรภาพอุโมงค์เชิงปริมาณด้วยดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI)

พงศกร พวงชมพู^{1*} นราวิชญ์ แคนูเขียว²

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น^{1*2}

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

วันที่รับบทความ 12 กันยายน 2568

วันแก้ไขบทความ 22 ตุลาคม 2568

วันที่รับบทความ 2 พฤศจิกายน 2568

บทคัดย่อ

การประเมินเสถียรภาพของอุโมงค์โดยอาศัยเพียงค่าความแข็งแรงไม่สามารถสะท้อนถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทแรงของโครงสร้างได้ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประเมินเชิงปริมาณ "ดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด" (Stability of Opening Index - SOI) ซึ่งเป็นดัชนีไร้มิติที่คำนวณจากอัตราส่วนของพลังงานที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพรูปบริเวณช่องเปิดต่อพลังงานทั้งหมดที่โครงสร้างได้รับ โดยอาศัยข้อมูลการเคลื่อนที่รวมสะสมจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์กับพฤติกรรมการวิบัติที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบที่มีความเหมาะสมและมีเสถียรภาพเชิงโครงสร้างสูงที่สุดคือ อุโมงค์รูปทรงเกือบวงรีที่มีอัตราส่วนความขรุขระปานกลาง (HS10) ซึ่งได้รับการเสริมกำลังร่วมด้วย Shotcrete และ Rock Bolt (HS10-SC-RB) จากความสัมพันธ์เชิงปริมาณที่สอดคล้องกับเสถียรภาพของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น SOI จึงเป็นเครื่องมือเชิงปริมาณที่มีประสิทธิภาพสำหรับวิศวกรในการเปรียบเทียบการออกแบบอุโมงค์ทั้งในด้านรูปทรงและระบบเสริมกำลังได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ : ดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI) เสถียรภาพอุโมงค์ ประสิทธิภาพการถ่ายเทแรง วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Quantitative Stability Assessment of Tunnels Using the Stability of Opening Index (SOI)

Pongsagorn Pongchompu ^{1*}, Naravit Kheaphukhio ²

Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Isan
Khon Kaen Campus ^{1*,2}

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

Received 12 September 2025

Revised 22 October 2025

Accepted 2 November 2025

Abstract

This research aims to present the Stability of Opening Index (SOI), which is a quantitative criterion developed for evaluating the stability and load transfer efficiency of tunnels. The study compares the load-bearing behavior of basic tunnel shapes, horseshoe shapes with different slenderness ratios, and evaluates the effectiveness of reinforcement systems using small-scale model testing in the laboratory coupled with finite element method analysis. The research results indicate that the SOI can clearly differentiate the behavior of each tunnel model. The horseshoe tunnel with a moderate slenderness ratio (HS10), reinforced with both Shotcrete and Rock Bolt (HS10-SC-RB), demonstrated the best stability and load transfer efficiency, reflected by the lowest SOI value, which significantly enhances the safety of the structure.

Keywords : Stability of Opening Index (SOI), Tunnel Stability, Load Transfer Efficiency, Finite Element Method (FEM)

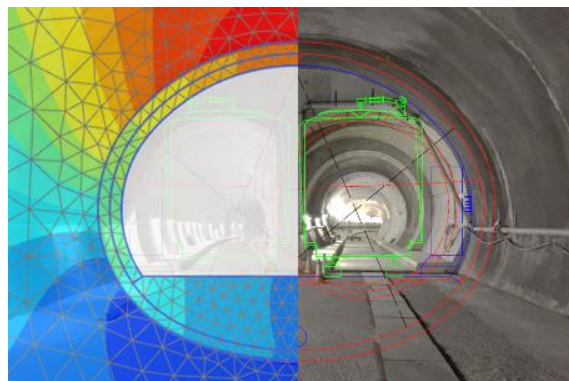
1. บทนำ

การออกแบบโครงสร้างอุโมงค์ ถือเป็นส่วนสำคัญของการพัฒนาเมืองและระบบคมนาคม ความมั่นคงและเสถียรภาพของอุโมงค์จึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากการประเมินที่ผิดพลาดหรือไม่ครอบคลุมอาจนำไปสู่เหตุการณ์ที่สร้างความเสียหายดังที่เคยเกิดขึ้นในหลายโครงการ ดังรูปที่ 1 โดยทั่วไปการประเมินเสถียรภาพจะพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สื่อได้ถึงถึงความแข็งแรงหรือค่าการเคลื่อนตัว ณ จุดวิกฤต (Maximum Displacement) ที่แสดงถึงการเสียรูปของโครงสร้าง อย่างไรก็ตามก็มีข้อจำกัดในการสะท้อนถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทแรง (Load Transfer Efficiency) ของโครงสร้างโดยรวมได้ทั้งหมด อุโมงค์ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงยังอาจมีความเสี่ยงจากการวิบัติแบบเปราะ (Brittle Failure) หรือในทางกลับกัน อุโมงค์ที่มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดต่ำก็อาจไม่ได้หมายถึงความปลอดภัยเสมอไป หากการออกแบบรูปทรงไม่เอื้อต่อการกระจายความเค้นอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 เหตุการณ์ดินทรุดตัวภายในอุโมงค์
ที่มา: Bangkokbiznews. (2024)

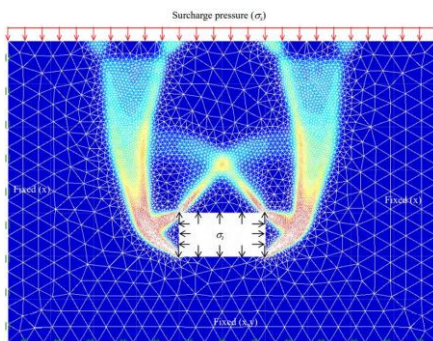
งานวิจัยจำนวนมากได้แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการรับแรงของอุโมงค์ โดยเฉพาะรูปทรงของอุโมงค์, อัตราส่วนความชะลูดของช่องเปิด (Slenderness Ratio) และประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมการกระจายความเค้นและการเสียรูปของโครงสร้าง ดังรูปที่ 2 แต่ในทางปฏิบัติยังขาดเกณฑ์การประเมินเชิงปริมาณที่เรียบง่าย สำหรับใช้เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างการออกแบบที่มีความซับซ้อนและหลากหลายได้อย่างเป็นรูปธรรมซึ่งถือเป็นช่องว่างสำคัญที่งานวิจัยนี้มุ่งมั่นที่จะแก้ไข



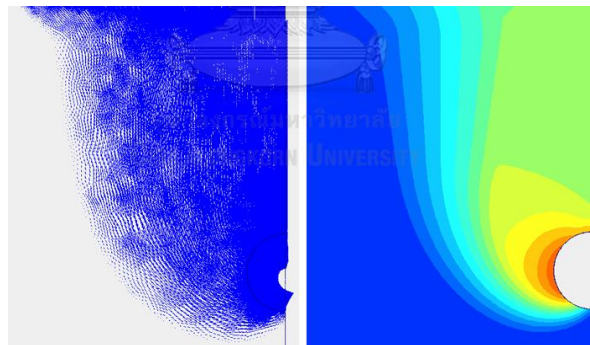
รูปที่ 2 การวิเคราะห์ที่แสดงการกระจายความเค้นในโครงสร้างอุโมงค์
ที่มา: Ingeoexpert. (2023)

เพื่อตอบสนองต่อข้อกำหนดและช่องว่างของงานวิจัยดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอเครื่องมือประเมินเชิงปริมาณในชื่อ “ดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด” (Stability of Opening Index - SOI) เป็นดัชนีไร้มิติที่พัฒนาขึ้นเพื่อวัดสมรรถนะองค์รวมของอุโมงค์ หลักการสำคัญคือการประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทแรง (Load Transfer Efficiency) ของโครงสร้างว่าสามารถถูกถ่ายเทออกจากช่องเปิดไปสู่ฐานรองรับได้ โดยอาศัยข้อมูลการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) เพื่อจำลองพฤติกรรมและการกระจายความเค้นและการเสียรูป จากนั้นพิจารณาความสอดคล้องกับผลพฤติกรรมการวิบัติที่ได้จากการทดสอบโมเดลขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ

งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการประเมินเสถียรภาพอุโมงค์ กงกิจ ยิ่งเจริญกิจขจร (2556) ได้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อประเมินเสถียรภาพของหัวอุโมงค์ในชั้นดินเหนียว ดังรูปที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับ ธนชนม์ พรหมวิชัย (2564) ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแผนภูมิออกแบบสำหรับอุโมงค์สี่เหลี่ยมเพื่อหาค่าความปลอดภัย ดังรูปที่ 4 ซึ่งแม้ว่างานวิจัยเหล่านี้จะให้ข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญต่อการออกแบบในสภาวะเฉพาะทาง แต่ยังคงขาดเกณฑ์การประเมินเชิงปริมาณที่เรียบง่ายสำหรับใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพองค์รวมของการออกแบบที่หลากหลาย ดังนั้น ในบทความนี้จะนิยามหลักการและวิธีการคำนวณดัชนี จากนั้นประยุกต์ใช้กับผลการทดสอบด้วยโมเดลขนาดเล็กและการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของอุโมงค์ในหลากหลายกรณีศึกษา เพื่ออธิบายความสอดคล้องและความสามารถของ SOI ในการเป็นเครื่องมือสนับสนุนการออกแบบทางวิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพต่อไป



รูปที่ 3 แบบจำลองเชิงวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของมวลดิน
ที่มา: กงกิจ ยิ่งเจริญกิจขจร (2556)



รูปที่ 4 รูปแบบการวิบัติและทิศทางการเคลื่อนตัว
ที่มา: ธนชนม์ พรหมวิชัย (2564)

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อนำเสนอและนิยามหลักการของดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI) สำหรับใช้เป็นเกณฑ์การประเมินเชิงปริมาณเพื่อวัดประสิทธิภาพการถ่ายเทแรงและเสถียรภาพของโครงสร้างอุโมงค์

2.2 เพื่อประยุกต์ใช้ดัชนี SOI กับผลการวิเคราะห์อุโมงค์หลากหลายรูปทรง อัตราส่วนความขรุขระ และระบบการเสริมกำลัง เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของดัชนีในการจำแนกประสิทธิภาพของแต่ละการออกแบบ

2.3 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI) โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับพฤติกรรมการวิบัติและกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบด้วยโมเดลขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ

3. วิธีการวิจัย

3.1 การทดสอบด้วยโมเดลขนาดเล็กและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

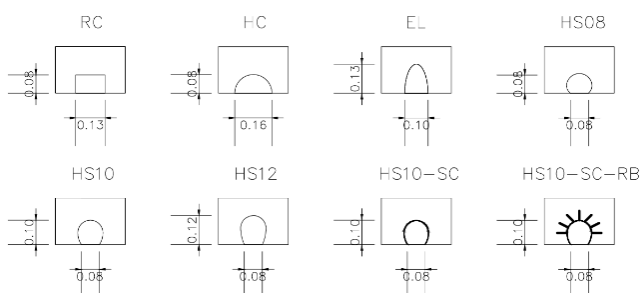
3.1.1 การเตรียมและทดสอบโมเดลขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ

โมเดลขนาดเล็กสร้างจากอิฐมวลเบา (Q-CON) ดังรูปที่ 5 ซึ่งใช้เป็นวัสดุหลักเพื่อจำลองพฤติกรรมของมวลหินคุณภาพต่ำถึงปานกลาง วัสดุเสริมกำลังประกอบด้วย ATM107 ผสมหินโปวอะครีลิกสำหรับจำลอง Shotcrete และแท่งเดือยไฟเบอร์กลาสสำหรับจำลอง Rock Bolt โดยกรณีศึกษา ดังรูปที่ 6 ครอบคลุมตัวแปรดังนี้

- รูปทรงพื้นฐาน ได้แก่ รูปทรงสี่เหลี่ยม (RC), ครึ่งวงกลม (HC), และวงรี (EL)
- ศึกษาอัตราส่วนความชะลุดในรูปทรงเกือกม้า ได้แก่ HS08 (ความชะลุดต่ำ), HS10 (ความชะลุดปานกลางเป็นสัดส่วนอ้างอิงจากโครงการก่อสร้างจริง) และ HS12 (ความชะลุดสูง)
- ระบบเสริมกำลังพิจารณาเฉพาะรูปทรงเกือกม้าอ้างอิง คือ การเสริมกำลังด้วย Shotcrete (HS10-SC) และการเสริมกำลังร่วมกับ Rock Bolt (HS10-SC-RB)



รูปที่ 5 การเตรียมโมเดลขนาดเล็ก



รูปที่ 6 รูปทรงของช่องเปิดอุโมงค์ที่ศึกษา

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M ดังรูปที่ 7 เนื่องจากการทดสอบทางกายภาพมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถแสดงพฤติกรรมภายในได้อย่างการกระจายความเค้นหรือการเคลื่อนตัวภายในโครงสร้าง จึงจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยอธิบายและแสดงผลร่วมกัน

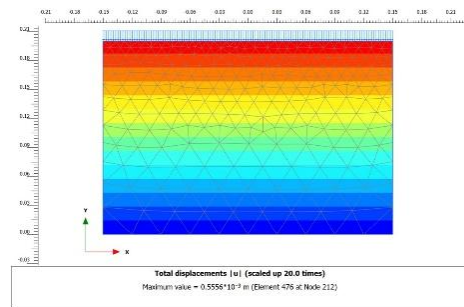
3.1.1 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM)

การวิเคราะห์ดำเนินการด้วยโปรแกรม Plaxis 2D (Stand-alone Version) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เฉพาะสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างดินและโครงสร้างใต้ดิน โดยกำหนดใช้การวิเคราะห์ในลักษณะ Plane Strain ซึ่งเหมาะสมกับการวิเคราะห์โครงสร้างอุโมงค์ที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอและความยาวมาก

แบบจำลองของอิฐมวลเบาและวัสดุเสริมกำลังใช้ Mohr-Coulomb และ Linear Elastic เพื่อจำลองพฤติกรรมการวิบัติจากแรงเฉือนให้ใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในการจำลองแรงกระทำใช้แรงกระทำ Uniform Load โดยอิงจากค่าการรับแรงของโมเดล SB ตามหลักการออกแบบเชิงอนุรักษ์ (Conservative Design) เพื่อสร้างเงื่อนไขแรงภายนอกที่สอดคล้องกับการทดสอบโมเดลขนาดเล็กทำให้สามารถสะท้อนพฤติกรรมได้อย่างเหมาะสม โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะแสดงในรูปของค่าการเคลื่อนตัวรวมสูงสุด (Maximum Total Displacement) และรูปแบบการกระจายความเค้น (Stress Distribution) ดังรูปที่ 8 เพื่อใช้ในการคำนวณดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI)



รูปที่ 7 การทดสอบกำลังรับน้ำหนัก



รูปที่ 8 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 การนิยามและการคำนวณดัชนี SOI

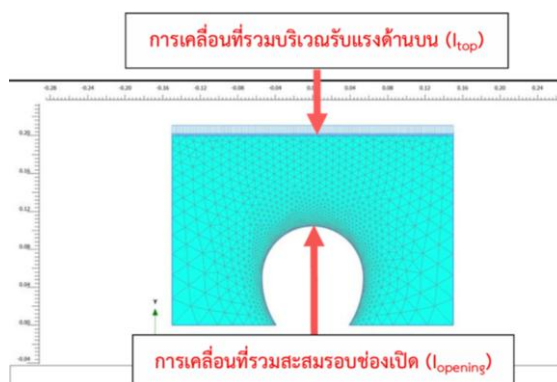
ดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI) เป็นเกณฑ์การประเมินเชิงปริมาณที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะ เพื่อวัดประสิทธิภาพการถ่ายเทแรงและเสถียรภาพของโครงสร้างอุโมงค์ หลักการพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่รวมสะสม (Cumulative Displacement) ซึ่งใช้เป็นตัวแทนเชิงปริมาณของพลังงานที่โครงสร้างได้รับและกระจายออกไป โดยผลจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะแสดงการเคลื่อนที่สูงสุดเป็นลักษณะของแถบสี (Color Contour) ที่แสดงขนาดของการเคลื่อนตัว โดยบริเวณที่มีสีเข้มหรือสีโทนร้อน (เช่น สีแดง) จะหมายถึงบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวหรือเสียรูปมากที่สุด ในขณะที่สีโทนเย็น (เช่น สีน้ำเงิน) จะหมายถึงบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวน้อย โดยมีองค์ประกอบในการคำนวณดังต่อไปนี้ ดังรูปที่ 9

การเคลื่อนที่รวมสะสมบริเวณรับแรงด้านบน (I_{top}) เป็นตัวแทนของพลังงานทั้งหมดที่โครงสร้างได้รับจากแรงกดภายนอก คำนวณได้จากการหาผลคูณระหว่างความยาวของแต่ละส่วนย่อย (Segment length) บนผิวที่เป็นบริเวณรับแรงของแบบจำลองกับค่าการเคลื่อนที่สูงสุด (Maximum Displacement) ณ ตำแหน่งของบริเวณส่วนย่อยนั้น โดยค่าที่สูงหมายถึงโครงสร้างมีการเคลื่อนที่มากจึงเกิดการแอ่นตัวหรือรับพลังงานโดยรวมไว้มาก

การเคลื่อนที่รวมสะสมรอบช่องเปิด ($I_{opening}$) เป็นตัวแทนของพลังงานที่โครงสร้างเกิดความเสียหายหรือปริมาณการเสียรูปที่ส่งผลกระทบต่อช่องเปิด คำนวณด้วยวิธีการเดียวกันกับ I_{top} แต่จะพิจารณาตามแนวของช่องเปิดอุโมงค์ทั้งหมด โดยค่าที่สูงอธิบายได้ว่าพลังงานส่วนใหญ่ไม่ถูกถ่ายเทออกไปช่องเปิด แต่กลับสะสมและก่อให้เกิดการเสียรูปอย่างมีนัยสำคัญบริเวณช่องเปิด

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองอุโมงค์ที่มีความแข็งแรงแตกต่างกัน การพิจารณาเพียงค่ากำลังรับแรงอัด ลักษณะการวิบัติ รวมถึงการเคลื่อนที่สูงสุดเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถใช้อธิบายถึงเสถียรภาพของ

แต่ละกรณีที่ศึกษาได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้หลักการ การนอร์มัลไลซ์ (Normalization) ผ่าน การสร้างดัชนีไร้มิติ (Dimensionless Index) เพื่อสร้างเกณฑ์การประเมินที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน โดยนำค่าการ เคลื่อนที่รวมสะสมบริเวณรับแรง (I_{top}) และค่าการเคลื่อนที่รวมสะสมรอบช่องเปิด ($I_{opening}$) ที่ได้จากการวิเคราะห์ คำนวณเป็นอัตราส่วน ดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (Stability of Opening Index - SOI) ดังสมการที่ 1 ซึ่งเป็นตัวแทนของสัดส่วนพลังงานที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อช่องเปิดเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่โครงสร้างได้รับ กระบวนการนี้เป็นการปรับผลลัพธ์ให้อยู่บนมาตรฐานเดียวกัน ทำให้สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมของอุโมงค์แต่ละ รูปแบบได้โดยตรง โดยไม่ถูกเบี่ยงเบนจากค่าการเคลื่อนที่สัมบูรณ์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 9 การเคลื่อนที่รวมบริเวณรับแรงด้านบนและการเคลื่อนที่รวมสะสมรอบช่องเปิด

จากองค์ประกอบที่กล่าวไป สามารถคำนวณดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI) ได้จากสมการที่ 1

$$\text{เปอร์เซ็นต์ดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI)} = \frac{\text{การเคลื่อนที่รวมสะสมรอบช่องเปิด } (I_{opening})}{\text{การเคลื่อนที่รวมบริเวณรับแรงด้านบน } (I_{top})} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อมีค่าที่ต่ำหมายถึงการเคลื่อนที่รวมรอบช่องเปิดมีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่โดยรวม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าโครงสร้างถ่ายเทแรงออกจากช่องเปิดได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพสูง

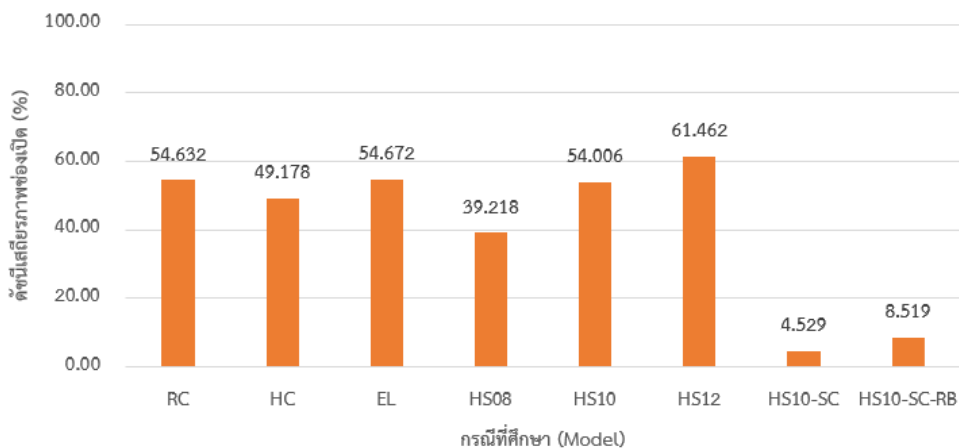
การเลือกใช้ค่าการเคลื่อนที่ (Displacement) เป็นพื้นฐานในการคำนวณและการพัฒนา SOI ขึ้นมา โดยเฉพาะ เนื่องจากความเค้น (Stress) ที่เป็นตัวชี้วัดแรงภายในที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งของโครงสร้าง ซึ่งอาจมีการกระจุกตัวสูงในบางบริเวณ (Stress Concentration) จึงไม่ได้สะท้อนถึงการเสียเสถียรภาพของโครงสร้างโดยรวม ในทางกลับกันค่าการเคลื่อนที่เป็นผลลัพธ์เชิงกายภาพที่มองเห็นและวัดผลได้โดยตรง จากการตอบสนองของโครงสร้างทั้งหมดต่อแรงกระทำ ดังนั้นการใช้ค่าการเคลื่อนที่สะสมจึงสามารถชี้ถึงปริมาณการเสียรูปและประสิทธิภาพในการถ่ายเทแรงออกจากบริเวณช่องเปิดได้อย่างชัดเจนและง่ายต่อการตีความ ซึ่งสอดคล้องกับ วัตถุประสงค์ 2.1 ในการใช้เป็นเกณฑ์การประเมินเชิงปริมาณเพื่อวัดประสิทธิภาพการถ่ายเทแรงและเสถียรภาพของ โครงสร้างอุโมงค์ อย่างไรก็ตามเพื่อให้การวิเคราะห์มีความครอบคลุมจึงต้องพิจารณา SOI ร่วมกับผลการทดสอบ ในห้องปฏิบัติการและผลจากการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกัน

4. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยเชิงปริมาณที่ได้จากการทดสอบโมเดลขนาดเล็กและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะแสดงเป็นกำลังรับแรงอัดสูงสุดและดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI) เพื่อประเมินเสถียรภาพของอุโมงค์ในแต่ละกรณีศึกษา ดังตารางที่ 1 และแสดงการเปรียบเทียบค่า SOI ใน ดังรูปที่ 10

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของอุโมงค์ทุกกรณีศึกษา

รหัสตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (ksc)	ค่าการเคลื่อนที่สูงสุด (m)	การเคลื่อนที่รวมสะสม (มม.-ชม.)		SOI (%)
			I _{top}	I _{opening}	
รูปที่ 11 RC	21.208	1.055×10^{-3}	28.500	15.570	54.632
รูปที่ 12 HC	20.700	0.4029×10^{-3}	11.194	5.505	49.178
รูปที่ 13 EL	26.647	0.8408×10^{-3}	23.413	12.800	54.672
รูปที่ 14 HS08	27.402	0.8265×10^{-3}	22.515	8.830	39.218
รูปที่ 15 HS10	24.343	1.074×10^{-6}	0.030	0.016	54.006
รูปที่ 16 HS12	22.263	1.184×10^{-6}	0.031	0.019	61.462
รูปที่ 17 HS10-SC	24.436	0.4544×10^{-3}	12.187	0.552	4.529
รูปที่ 18 HS10-SC-RB	23.172	0.1319×10^{-3}	3.240	0.276	8.519



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI) ของอุโมงค์ทุกกรณีศึกษา

4.1 ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 2.2 พบว่ารูปทรงของอุโมงค์มีอิทธิพลโดยตรงต่อทั้งความสามารถในการรับแรงและเสถียรภาพของโครงสร้าง ซึ่งสะท้อนผ่านค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI) ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

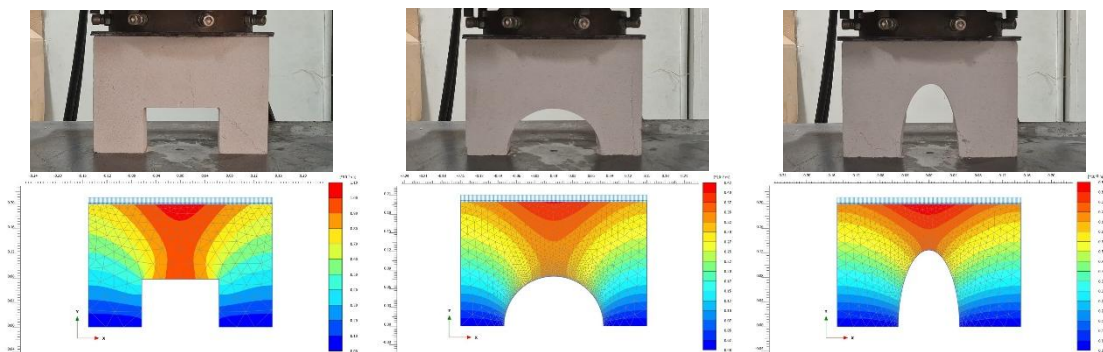
- อุโมงค์รูปทรงสี่เหลี่ยม (RC) ดังรูปที่ 11 ซึ่งเป็นตัวแทนของโครงสร้างมุมฉาก สามารถรับแรงอัดสูงสุด 21.21 ksc และมีค่า SOI สูงถึง 54.63% แสดงถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทแรงที่ต่ำ พฤติกรรมการวิบัติที่สังเกตได้คือ

การแตกร้าวจากการแอ่นตัวบริเวณส่วนบน และการวิบัติเชิงแรงเฉือนที่มุมฐานอันเนื่องมาจากการกระจุกตัวของความเค้น

- อุโมงค์รูปทรงครึ่งวงกลม (HC) ดังรูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทแรงที่ดีกว่า โดยมีค่า SOI ต่ำที่สุดในกลุ่มนี้ที่ 49.18% อย่างไรก็ตามรูปทรงนี้มีความสามารถในการรับแรงอัดต่ำที่สุดเช่นกัน โดยมีค่าเพียง 20.70 ksc การวิบัติเกิดขึ้นในลักษณะการแตกร้าวที่ผนังด้านข้าง (Side Wall Cracking) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงผลักในแนวราบที่โครงสร้างไม่สามารถต้านทานได้

- อุโมงค์รูปทรงวงรี (EL) ดังรูปที่ 13 มีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดในกลุ่มนี้ที่ 26.65 ksc แต่กลับมีเสถียรภาพต่ำโดยมีค่า SOI สูงที่สุดในกลุ่มนี้ที่ 54.67% ซึ่งมีสาเหตุจากฐานที่แคบไม่สามารถถ่ายเทแรงผลักด้านข้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวิบัติเกิดขึ้นในลักษณะการกะเทาะของผิววัสดุ (Spalling) บริเวณส่วนโค้งด้านบน

ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นถึงข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละรูปทรง และชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนารูปทรงที่สามารถผสมผสานประสิทธิภาพการถ่ายเทแรงของส่วนโค้งเข้ากับความมั่นคงของฐานและผนังรับแรง ซึ่งนำไปสู่การวิเคราะห์อุโมงค์รูปทรงเกือกม้าในลำดับถัดไป



รูปที่ 11 RC

รูปที่ 12 HC

รูปที่ 13 EL

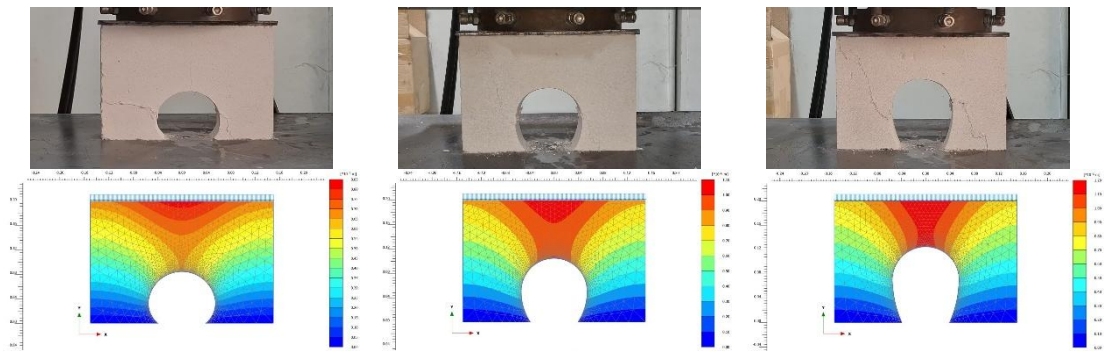
4.2 ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 2.2 พบว่าอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) มีความสัมพันธ์ผกผันกับความแข็งแรงและเสถียรภาพของโครงสร้าง กล่าวคือเมื่อช่องเปิดมีความสูงและแคบมากขึ้นกำลังรับแรงอัดจะลดลง ในขณะที่ค่าดัชนี SOI จะเพิ่มสูงขึ้นแสดงถึงเสถียรภาพที่ลดลง

- อุโมงค์รูปทรง HS08 ดังรูปที่ 14 ซึ่งมีอัตราส่วนความชะลูดต่ำที่สุด มีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดในกลุ่มนี้ที่ 27.40 ksc และมีค่า SOI ต่ำที่สุดเพียง 39.22% ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทแรงและเสถียรภาพเชิงโครงสร้างที่ดี

- เมื่อเพิ่มความสูงของช่องเปิดในอุโมงค์รูปทรง HS10 ที่เป็นสัดส่วนอ้างอิง ดังรูปที่ 15 มีความสามารถในการรับแรงอัดลดลงเหลือ 24.34 ksc และค่า SOI เพิ่มขึ้นเป็น 54.01%

- สำหรับอุโมงค์รูปทรง HS12 ดังรูปที่ 16 ซึ่งมีความชะลูดสูงสุด พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงต่ำที่สุดที่ 22.26 ksc และมีค่า SOI สูงที่สุดถึง 61.46% ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการวิบัติที่รุนแรงและแสดงถึงการเสียเสถียรภาพจากการโก่งเดาะ (Buckling)

ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นถึงการแลกเปลี่ยน (Trade-off) ที่ชัดเจนระหว่างพื้นที่ใช้สอยในแนวตั้งกับเสถียรภาพของอุโมงค์ โดยโมเดล HS10 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ใช้งานจริง แสดงให้เห็นถึงจุดสมดุลที่ยอมรับได้ระหว่างปัจจัยทั้งสอง



รูปที่ 14 HS08

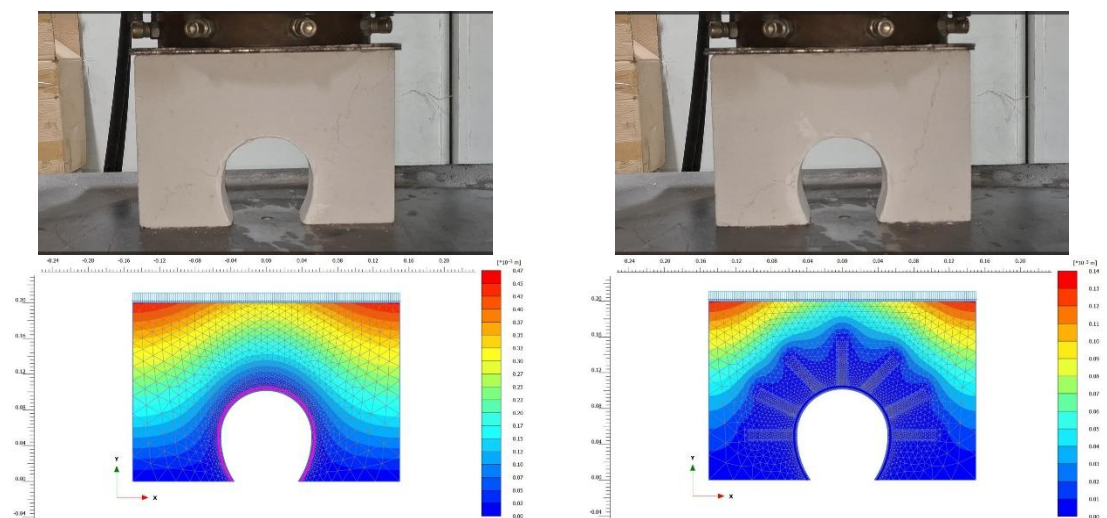
รูปที่ 15 HS10

รูปที่ 16 HS12

4.3 ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 2.2 พบว่าระบบเสริมกำลังมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มเสถียรภาพของโหม่งจากค่าดัชนี SOI ที่ลดลง แม้จะไม่ได้เพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ

- การเสริมกำลังด้วย Shotcrete ในโหม่งรูปทรง HS10-SC ดังรูปที่ 17 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเป็น 24.44 ksc เมื่อเทียบกับโมเดลเกือกม้าที่ไม่เสริมกำลัง อย่างไรก็ตาม เสถียรภาพของโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยค่าดัชนี SOI ลดลง เหลือเพียง 4.53% ซึ่งเป็นผลจาก Shotcrete ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทแรงและรักษาเสถียรภาพของช่องเปิดได้อย่างยอดเยี่ยม

- สำหรับโหม่งรูปทรง HS10-SC-RB ดังรูปที่ 18 ที่เสริมกำลังร่วมด้วย Shotcrete และ Rock Bolt พบว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 23.17 ksc และมีค่า SOI ที่ 8.52% ซึ่งยังคงอยู่ในระดับที่ต่ำมาก และยืนยันถึงเสถียรภาพที่สูง ประเด็นสำคัญที่สุดคือลักษณะการวิบัติได้เปลี่ยนจากแบบเปราะ (Brittle) ที่พังทลายทันที ไปสู่พฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile) โดยโครงสร้างยังคงรักษารูปทรงและเสถียรภาพโดยรวมไว้ได้แม้จะเกิดรอยร้าวแล้วก็ตาม ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังร่วมไม่เพียงแต่เพิ่มเสถียรภาพ แต่ยังเพิ่มความปลอดภัยของโครงสร้างได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 17 HS10-SC

รูปที่ 18 HS10-SC-RB

5. อภิปรายผลและสรุปผล

5.1 ดัชนี SOI ที่เป็นเกณฑ์การประเมินเชิงปริมาณตามวัตถุประสงค์ 2.1 และ 2.3 แสดงให้เห็นว่าการประเมินเสถียรภาพโดยอาศัยเพียงกำลังรับแรงอัดสูงสุดอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ กรณีศึกษาของอุโมงค์รูปทรงวงรี (EL) เป็นตัวอย่างที่ชัดเจนที่สุด โดยมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดในกลุ่มรูปทรงพื้นฐานแต่กลับมีค่า SOI สูงที่สุดแสดงถึงเสถียรภาพที่ต่ำ ยืนยันได้ว่าความแข็งแรงไม่ได้หมายถึงเสถียรภาพเสมอไป ดัชนี SOI จึงใช้อธิบายช่องว่างนี้โดยตรง โดยเป็นเกณฑ์ที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทแรงของโครงสร้างโดยรวม ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการวิบัติที่สังเกตได้จากการทดสอบและเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของดัชนีได้เป็นอย่างดี

5.2 การประยุกต์ใช้ SOI เพื่ออธิบายประสิทธิภาพการออกแบบตามวัตถุประสงค์ 2.2 ดัชนี SOI แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจำแนกประสิทธิภาพของการออกแบบได้อย่างเป็นรูปธรรม จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความขรุขระพบว่าค่า SOI เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่ออุโมงค์มีความสูงมากขึ้น จาก 39.22% ใน HS08 เป็น 61.46% ใน HS12 ซึ่งเป็นการยืนยันเชิงปริมาณว่าเสถียรภาพลดลงเมื่อเพิ่มพื้นที่ใช้สอยในแนวตั้งมากเกินไป และชี้ให้เห็นว่าโมเดล HS10 คือจุดสมดุล (Optimal Point) ที่เหมาะสม

5.3 การประเมินประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังเชิงปริมาณตามวัตถุประสงค์ 2.2 และ 2.3 โดยการวิจัยนี้คือการใช้ SOI เพื่อแสดงประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังได้อย่างชัดเจน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า HS10-SC สามารถลดค่า SOI จาก 54.01% เหลือเพียง 4.53% เป็นการยืนยันว่าบทบาทหลักของ Shotcrete คือการเพิ่มเสถียรภาพและการถ่ายเทแรงไม่ใช่เพิ่มกำลังรับแรงอัด นอกจากนี้การเสริมกำลังด้วย Shotcrete และ Rock Bolt (HS10-SC-RB) ยังช่วยเปลี่ยนพฤติกรรมการวิบัติจากแบบเปราะไปสู่แบบเหนียว ซึ่งเป็นการเพิ่มความปลอดภัยให้โครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญและค่า SOI ที่ยังคงอยู่ในระดับต่ำมากก็เป็นการยืนยันถึงเสถียรภาพระดับสูงของระบบเสริมกำลัง

ผลการวิจัยที่ได้ยังสอดคล้องและสามารถเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้เป็นอย่างดี ในประเด็นที่ว่าอุโมงค์รูปทรงสี่เหลี่ยม (RC) มีเสถียรภาพต่ำซึ่งสะท้อนผ่านค่า SOI ที่สูงนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับความเข้าใจเชิงวิศวกรรมเกี่ยวกับการกระจุกตัวของความเค้น (Stress Concentration) บริเวณมุมฉากที่เป็นหัวข้อที่ได้รับการศึกษาในงานของ ธนชนม์ (2564) ที่ได้วิเคราะห์เสถียรภาพของอุโมงค์สี่เหลี่ยมโดยเฉพาะ ในขณะเดียวกันการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองพฤติกรรมการวิบัติและประเมินเสถียรภาพในงานวิจัยนี้ ก็เป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับและถูกใช้ในงานวิจัยด้านเสถียรภาพอุโมงค์จำนวนมาก กงกิจ (2556) ที่ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์ในชั้นดินเหนียว ดังนั้นการที่ดัชนี SOI สามารถอธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ได้อย่างสอดคล้อง จึงเป็นการยืนยันถึงความน่าเชื่อถือและความสามารถของดัชนีในการเป็นเครื่องมือประเมินเชิงปริมาณที่เชื่อมโยงกับหลักการพื้นฐานและระเบียบวิธีวิจัยที่เป็นมาตรฐานได้

6. ข้อเสนอแนะ

องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีนัยสำคัญเชิงปฏิบัติ โดยวิศวกรสามารถนำดัชนี SOI ไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมืออย่างง่ายในขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้น เพื่อเปรียบเทียบทางเลือกของรูปทรงและระบบเสริมกำลังต่าง ๆ ได้อย่างเป็นรูปธรรมและรวดเร็ว สำหรับการวิจัยในอนาคตควรมีการขยายผลไปสู่การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อศึกษาผลกระทบของหัวขุดเจาะ (Tunnel Face) และพิจารณาพฤติกรรมภายใต้สภาวะแรงที่ไม่สมมาตร (Asymmetric Loading) หรือแรงกระทำแบบพลศาสตร์ (Dynamic Load) เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างอุโมงค์ได้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณอย่างสูง รองศาสตราจารย์ ดร.พงศกร พวงชมพู เป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำ การถ่ายทอดความรู้ และความเอาใจใส่อย่างดียิ่งในการให้คำปรึกษา ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ อีกทั้งยังกรุณาให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม Plaxis 2D เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กกก ยิงเจริญกิจขจร. (2556). *การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์แบบไม่ระบายน้ำ*

ในดินเหนียว. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชนชนม์ พรหมวิชัย. (2564). *การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบลิมิตสำหรับเสถียรภาพของอุโมงค์สี่เหลี่ยม*.

[วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

บุญเทพ นานะกรังสรรค์. (2552). *วิศวกรรมฐานรากและการก่อสร้างอุโมงค์*. สำนักพิมพ์วิศวกรรมขอนแก่น.

พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกูล. (2563). *คู่มือวิศวกรรมฐานราก*. สำนักพิมพ์วิศวกรรมโยธา.

สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. (2550). *วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Bangkokbiznews. (2024). *กรณีอุโมงค์รถไฟฟ้าความเร็วสูงถล่ม จ.นครราชสีมา*.

<https://www.bangkokbiznews.com/news/news-update/1142004>

ITD-RT. (2563). *รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการระบบรถไฟฟ้าทางคู่เพื่อการขนส่งและการจัดการโลจิสติกส์ (ระยะที่ 1) แนวเส้นทางช่วงมาบะเปา-ชุมทางถนนจิระ. การรถไฟแห่งประเทศไทย*.

ASTM International. (2023). *ASTM C109/C109M-23: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars*. ASTM International.

Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2012). *Data mining: Concepts and techniques (3rd ed.)*. Morgan Kaufmann.

Ingeoexpert. (2023). *Tunnel design with PLAXIS 2D and 3D*. Retrieved September 11, 2025, from

<https://ingeoexpert.com/en/courses-online/tunnel-design-with-plaxis-2d-3d/>

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

งานวิจัยนี้มีคุณค่าทางวิชาการที่สำคัญในการนำเสนอและตรวจสอบความถูกต้องของดัชนีเสถียรภาพช่องเปิด (SOI) ในฐานะเครื่องมือเชิงปริมาณใหม่ ซึ่งช่วยเติมเต็มช่องว่างในการประเมินเสถียรภาพอุโมงค์ที่มีกำลังเฉพาะค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดหรือการเคลื่อนตัว ณ จุดเดียว งานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นอย่างเป็นรูปธรรมว่าความแข็งแรง (Strength) และเสถียรภาพ (Stability) ไม่ใช่สิ่งเดียวกันเสมอไป นอกจากนี้ดัชนียังสามารถวัดประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังในเชิงปริมาณได้อย่างชัดเจน โดยแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทแรงและเปลี่ยนลักษณะการวิบัติสู่รูปแบบที่ปลอดภัยยิ่งขึ้นได้อย่างไร องค์ความรู้นี้จึงไม่เพียงแต่นำเสนอเครื่องมือวิเคราะห์ใหม่ที่เรียบง่ายและน่าเชื่อถือ แต่ยังช่วยสร้างความเข้าใจที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้นเกี่ยวกับพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของอุโมงค์สำหรับแวดวงวิชาการและวิศวกรรมต่อไป