การหาค่าตัวแปรควบคุมหัวขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดิน

Optimization of tunnel boring machine's parameters under controlled surface settlement

สหัสวรรษ วัยนิพิฐพงษ์[1*], ชนา พุทธนานนท์[1], พรเกษม จงประดิษฐ์[1], ศศิพิมพ์ แสนบุญศิริ[2], ณัฐชัย เหมือนมี[1]
นลวิชญ์ นพคุณทอง[1] วุฒิพงศ์ เมืองน้อย[1] และ พงศกร ศิริสิงห์อำไพ[1]

[1] ศูนย์วิจัยด้านนวัตกรรมการก่อสร้างและระบบโครงสร้างพื้นฐานสำหรับอนาคต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
[2] บริษัท เอส ที เอส คอร์ปอเรชั่น จำกัด กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
**Corresponding author; E-mail address: sahassawas.chain@mail.kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

ปัญหาหลักที่มักจะพบได้ในงานก่อสร้างอุโมงค์ คือการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อการทรุดตัว คือ ลักษณะอุโมงค์ สภาพทางธรณีวิทยา และการควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่รัดกุมมากเกินไปอาจทำให้อัตราเร็วในการก่อสร้างที่ต่ำ และส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้น การศึกษานี้หาค่าตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินอ่อนที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึ่มแบบพันธุกรรมภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดิน ร่วมกันกับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ และค่าการทรุดตัว เพื่อทำนายอัตราเร็วในการก่อสร้างและการทรุดตัวของผิวดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียม โดยนำข้อมูลของโครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับฝึกโครงข่ายประสาทเทียม หาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถทำให้อัตราเร็วในการก่อสร้างเพิ่มมากขึ้นโดยที่ค่าการทรุดตัวที่ไม่เกินค่าที่ยอมให้ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่านอกเหนือจากลักษณะชั้นดินแล้ว อัตราขุดเจาะอุโมงค์และแรงอัดฉีดน้ำปูนเกราต์เป็นปัจจัยที่สำคัญ และเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อค่าควบคุมการทรุดตัวของผิวดินมีค่าแตกต่างกัน

คำสำคัญ: การทรุดตัวของผิวดิน, การทำให้เหมาะสมที่สุด, ตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์, อัลกอริทึ่มแบบพันธุกรรม, โครงข่ายประสาทเทียม

Abstract

The construction of the tunnel usually leads to settlement which normally depends on the tunnel geometries, geological parameters and tunnel boring machine's parameters. The tunneling construction rate is commonly reduced with more strict value of controlled surface settlement, resulting in an increase of time and budget of tunnel construction. This study is aimed to determine the optimal tunnel construction parameters using Genetic Algorithm (GA) with varying allowable surface settlements incorporated with the Artificial Neural Network (ANN) for predictions of surface settlement and tunneling construction rate. In this study, the MRTA Blue Line data are used to train the ANN and used as case study for determining optimal tunnel construction parameters. The results also indicated that the penetration rate and grouting pressure change significantly with the variation of allowable settlement.

Keywords: Surface settlement, Optimization, Tunnel boring machine's parameters, Genetic Algorithm, Artificial Neural Network

1. บทนำ

ระบบการขนส่งมวลชนมีความสำคัญอย่างมากในเขตเมืองหลวงหรือพื้นที่เศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย [1] ผนวกกับพื้นที่ใช้สอยบนผิวดินมีอยู่อย่างจำกัด โครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินจึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับกรุงเทพมหานคร [2] ถึงแม้มีการใช้เครื่องขุดเจาะ (Tunnel Boring Machine, TBM) แบบปรับแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Machine, EPBM) ในการก่อสร้างอุโมงค์ [3] ซึ่งมีกระบวนการก่อสร้างที่ซับซ้อน แต่ผลกระทบต่อพื้นที่รอบข้างการก่อสร้างโดยเฉพาะการทรุดตัวของผิวดิน [1] ยังคงมีอยู่ ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการขุดเจาะอุโมงค์ทั้งเวลาก่อสร้าง (ส่งผลต่อต้นทุนก่อสร้าง) และการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้น เพื่อให้ก่อสร้างอุโมงค์เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดต้นทุน และส่งผลกระทบที่ยอมรับได้ต่อพื้นที่รอบข้าง (การทรุดตัวของผิวดิน) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการทรุดตัวเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์เกิดได้จากหลายปัจจัย [1, 3–9] อาทิ ลักษณะอุโมงค์ สภาพชั้นดิน หรือการควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแบ่งออกเป็นปัจจัยย่อยได้หลากหลาย ด้วยเหตุนี้การนำปัจจัยย่อยทั้งหมดมาพิจารณาจึงยากต่อการ

วิเคราะห์เพื่อหาการทรุดตัวที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) เข้ามามีส่วนร่วมในการศึกษาวิจัยอยู่บ่อยครั้ง ดังนั้นการศึกษานี้ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปัจจัยที่ซับซ้อน [5, 10] เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเป้าหมาย (อัตราการก่อสร้างอุโมงค์และค่าการทรุดตัว) โดยการสุ่มปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนของแต่ละปัจจัย และทำการเปรียบเทียบกับเป้าหมาย เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์

อย่างไรก็ตาม ที่ผ่านมามีเพียงการศึกษาเพื่อหาปัจจัยและผลกระทบต่อการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์ แต่ยังไม่มีการนำไปพัฒนาต่อเพื่อหาตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสม (Optimization) ในการก่อสร้างอุโมงค์ทั้งด้านต้นทุนก่อสร้างและการควบคุมการทรุดตัวของผิวดิน ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้นำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึมแบบพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) ซึ่งนิยมใช้ในงานโครงสร้างเทคนิคธรณี [11–12] ซึ่งประยุกต์หลักการคัดเลือกตามธรรมชาติ [13–14] มาใช้หาค่าตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยการกำหนดตัวแปรเริ่มต้นที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมและประเมินความเหมาะสม หลังจากนั้น อัลกอริทึมจะคัดเลือกชุดตัวแปรที่มีค่าประเมินที่ดีที่สุดมาใช้เป็นตัวแปรเริ่มต้นในรุ่นถัดไปพร้อมทั้งสุ่มปรับตัวแปรบางชนิดเพื่อให้เกิดความแตกต่างและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในรุ่นถัดไปจนกว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด [15]

โดยสรุป การศึกษานี้ประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึมแบบพันธุกรรมสำหรับงานก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อพิจารณาออกแบบการใช้ตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์แบบปรับแรงดันดินสมดุลให้มีความเหมาะสมที่สุดกับแต่ละสภาพชั้นดินของกรุงเทพมหานคร โดยควบคุมให้ค่าการทรุดตัวของผิวดินอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และมีต้นทุนก่อสร้างที่ต่ำที่สุด (พิจารณาในรูปแบบของอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์)

2. ระเบียบวิธีการศึกษา

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB R2019b ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อการทรุดตัวของผิวดินและอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ และใช้ข้อมูลของโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินในการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการสอบเทียบค่าจริงของการทรุดตัวที่ผิวดินและอัตราเร็วการก่อสร้างที่ได้รับจากการตรวจวัดในสนาม และวิเคราะห์หาค่าตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมแบบพันธุกรรม ซึ่งกำหนดกรณีศึกษาตามสภาพชั้นดิน ระดับความลึกอุโมงค์ และระดับน้ำใต้ดินซึ่งเปรียบเทียบจากตำแหน่งล่างสุดของอุโมงค์ รวมทั้งสิ้น 9 กรณี

ตารางที่ 1 ตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ที่พิจารณาร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม

ตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์	หน่วย	การนำไปใช้ในโครงข่ายประสาทเทียม
อัตราขุดเจาะ	มม. ต่อนาที	ข้อมูลนำเข้าที่ 1
แรงดันหน้าหัวขุดเจาะ	กิโลปาสคาล	ข้อมูลนำเข้าที่ 2
แรงผลักหัวขุดเจาะ	ตัน	ข้อมูลนำเข้าที่ 3
มุมก้มมุมเงยของหัวขุดเจาะ	องศา	ข้อมูลนำเข้าที่ 4
แรงอัดฉีดน้ำปูนเกราตร์	บาร์	ข้อมูลนำเข้าที่ 5
เปอร์เซ็นต์ฉีดน้ำปูนเกราต์	เปอร์เซ็นต์	ข้อมูลนำเข้าที่ 6

2.1 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

2.1.1 สภาพชั้นดินและเป้าหมาย

ในการศึกษานี้ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะแบ่งตามการพิจารณาสภาพชั้นดินใน 3 ลักษณะ [1, 3–4, 8–9] ได้แก่ ชั้นดินประเภทครึ่งบนเป็นดินเหนียวอ่อนและครึ่งล่างเป็นดินเหนียวแข็ง (Soft–Stiff Clay) ชั้นดินประเภททั้งครึ่งบนและครึ่งล่างเป็นดินเหนียวแข็ง (Stiff–Stiff Clay) และชั้นดินประเภทครึ่งบนเป็นดินเหนียวแข็งและครึ่งล่างเป็นดินทราย (Stiff Clay–Sand) โดยมีเป้าหมายในการวิเคราะห์ทั้งหมด 2 เป้าหมาย ได้แก่ ค่าการทรุดตัวของผิวดิน และอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ กล่าวโดยสรุป ในการศึกษานี้จะมีแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมรวมทั้งสิ้น 6 แบบจำลอง

2.1.2 ตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์

การศึกษานี้พิจารณาเลือกตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ที่ส่งผลต่อการทรุดตัวของผิวดินและอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์อย่างมีนัยสำคัญตามการศึกษาก่อนหน้า [1, 3–9] แสดงดังตารางที่ 1

2.1.3 ชั้นซ่อน (Hidden layers)

จำนวน Hidden Layer ส่งผลต่อการเรียนรู้ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ และเป้าหมายอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังส่งผลต่อความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียม [3–4, 9] ซึ่งโดยทั่วไปจะประยุกต์ใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) ในการศึกษานี้หาจำนวน Hidden Layer ที่เหมาะสมที่สุดในช่วง 1–50 ชั้น และพิจารณาความเหมาะสมจำนวน Hidden Layer ผ่านค่า Root Mean Squared Error (RMSE) ที่น้อยที่สุดระหว่างค่า RMSE ของชุดข้อมูลสำหรับใช้เรียนรู้ (Train Data) กับค่า RMSE ของชุดข้อมูลสำหรับใช้สอบทวน (Test data)

2.1.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม

เพื่อให้ได้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีที่สุดในการทำนายเป้าหมาย กระบวนการหา Hidden Layer ที่เหมาะสมที่สุดเพียงอย่างเดียวยังไม่สามารถยืนยันได้อย่างความแม่นยำของแบบจำลองสมบูรณ์ แม้ว่าผลต่างระหว่างค่า RMSE ของชุดข้อมูลสำหรับใช้เรียนรู้ และค่า RMSE ของชุดข้อมูลสำหรับใช้สอบทวนจะมีค่าน้อย แต่อย่างไรก็ตามค่า RMSE

ตารางที่ 2 ระดับความลึกอุโมงค์และระดับน้ำใต้ดินในแต่ละกรณีศึกษา

กรณีศึกษา	ระดับความลึกอุโมงค์ (ม.)	ระดับน้ำใต้ดิน (ม.)	สภาพชั้นดิน
1	13	5.85	Soft–Stiff Clay
2	15	3.85	Soft–Stiff Clay
3	18	0.85	Soft–Stiff Clay
4	17	1.85	Stiff–Stiff Clay
5	19	–0.15	Stiff–Stiff Clay
6	21	–2.15	Stiff–Stiff Clay
7	20	–1.15	Stiff Clay–Sand
8	22	–3.15	Stiff Clay–Sand
9	24	–5.15	Stiff Clay–Sand

ตารางที่ 3 ขอบเขตตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์

แบบจำลอง	ขอบเขตข้อมูล	อัตราขุดเจาะ (มม. ต่อนาที)	แรงดันหน้าหัวขุดเจาะ (กิโลปาสคาล)	แรงบิดหัวขุดเจาะ (ตัน)	มุมเงยของหัวขุดเจาะ (องศา)	แรงอัดดีดน้ำปูนเกราต์ (บาร์)	เปอร์เซ็นต์ดีดน้ำปูนเกราต์ (เปอร์เซ็นต์)
Soft–Stiff Clay	ค่ามากที่สุด	31	189	1159	0.24	2.5	150
	ค่าน้อยที่สุด	9	141	809	–0.33	0.5	97
Stiff–Stiff Clay	ค่ามากที่สุด	55	182	1277	0.47	2.55	150
	ค่าน้อยที่สุด	22	30	611	–1.18	0.72	103
Stiff Clay–Sand	ค่ามากที่สุด	51	147	1179	0.71	2.5	224
	ค่าน้อยที่สุด	19	27	741	–1.23	2.4	99

ตารางที่ 4 คุณสมบัติเบื้องต้นของอัลกอริทึมแบบพันธุกรรม

คุณสมบัติ	ค่าประยุกต์ใช้
จำนวนประชากร (ตัว)	200
จำนวนรุ่นของประชากร (รุ่น)	600

ของแต่ละชุดข้อมูลยังคงมีค่าสูง (ค่าทำนายจากชุดข้อมูลสอบทวนสอดคล้องกับค่าทำนายจากชุดข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ แต่ไม่มีความแม่นยำ) ดังนั้นการศึกษานี้จึงทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายเป้าหมายของโครงข่ายประสาทเทียม โดยกำหนดให้โครงข่ายประสาทเทียมใช้จำนวน Hidden Layer ที่เหมาะสมในแต่ละแบบจำลอง และกำหนดให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้และสร้างความสัมพันธ์ใหม่ซ้ำๆ จนกระทั่งมีค่า RMSE ของแต่ละชุดข้อมูลและผลต่างผลต่างระหว่าง RMSE ของชุดข้อมูลสำหรับใช้เรียนรู้กับ RMSE ของชุดข้อมูลสำหรับใช้สอบทวนมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง

2.2 อัลกอริทึมแบบพันธุกรรม

2.2.1 กรณีศึกษา

ในการศึกษานี้ตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์สามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ ตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ ตัวแปรลักษณะอุโมงค์ และตัวแปรทางธรณีวิทยา แต่ในทางปฏิบัติตัวแปรลักษณะอุโมงค์และตัวแปรทางธรณีวิทยาไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นกลุ่มตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์จึงถูกพิจารณาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และกำหนดให้ตัวแปรลักษณะอุโมงค์และตัวแปรธรณีวิทยามีคุณสมบัติแบ่งตามกรณีศึกษาแสดงดังตารางที่ 2

2.2.2 ขอบเขตการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

เพื่อการทำนายอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดินที่แม่นยำของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม จำเป็นต้องกำหนดให้ขอบเขตการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์มีค่าเท่ากับค่าสูงสุดและต่ำสุดจากข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3

2.2.3 คุณสมบัติของอัลกอริทึมแบบพันธุกรรม

กำหนดให้อัลกอริทึมแบบพันธุกรรมที่ใช้ในการศึกษานี้มีคุณสมบัติ โดยประยุกต์ใช้จำนวนประชากร (Population Size) และจำนวนรุ่นของประชากร (Generation) ดังตารางที่ 4

การศึกษานี้กำหนดให้อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์เป็นฟังก์ชันเป้าหมายและกำหนดให้ชุดคำตอบ (ตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์) ที่เหมาะสมที่สุดสามารถทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่ามากที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมแบบพันธุกรรม ถูกออกแบบให้หาชุดคำตอบที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าติดลบแสดงดังสมการที่ (1) เพื่อให้โปรแกรมหาชุดคำตอบที่ทำให้ฟังชันเป้าหมายมีค่ามากที่สุดตามที่กำหนด

$$Y = -y_{con} \tag{1}$$

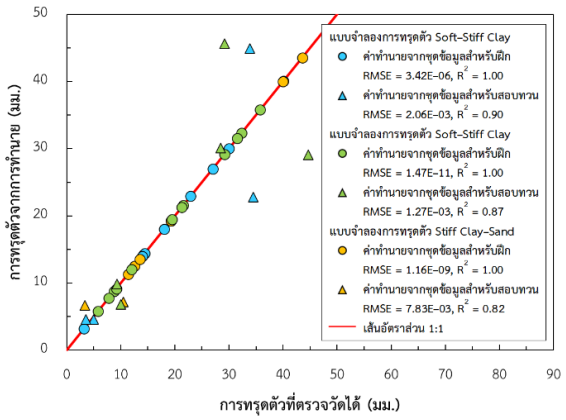
Y คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย และ $-y_{con}$ คือ อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึมแบบพันธุกรรม

2.2.4 เงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

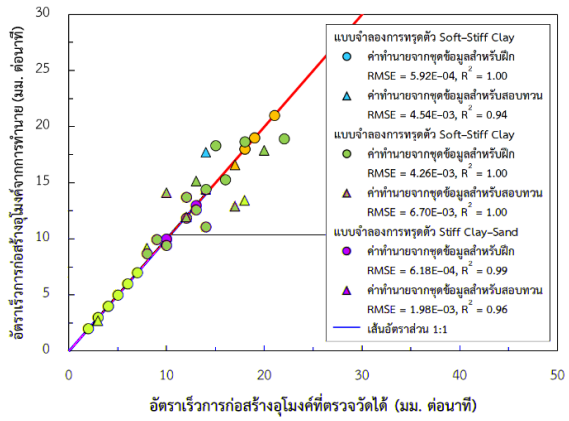
การศึกษานี้กำหนดเงื่อนไขในอัลกอริทึมแบบพันธุกรรมสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทั้งสิ้น 2 ประการ ประการแรกคือเงื่อนไขเนื่องจากการควบคุมการทรุดตัวของผิวดินให้มีค่าไม่เกินค่าที่ยอมรับได้แสดงดังสมการที่ (2)

$$y_{set} \le y_{set,allow} \tag{2}$$

y_{set} คือ ค่าการทรุดตัวของผิวดินที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึมแบบพันธุกรรม และ $y_{set,allow}$ คือ ค่าการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมรับได้



รูปที่ 1 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของผิวดินระหว่างค่าจากการทำนายด้วยโครงข่ายประสาทเทียมและค่าที่ตรวจวัดได้



รูปที่ 2 เปรียบเทียบอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ระหว่างค่าจากการทำนายและค่าที่ตรวจวัดได้

ประการที่สองคือเงื่อนไขเนื่องจากประสิทธิภาพการก่อสร้าง (k) ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์เทียบกับอัตราการขุดเจาะในหน่วย มม. ต่อนาที จากข้อมูลจริงที่ได้จากสนามพบว่าค่า k มีมากที่สุดเท่ากับ 0.77 (≈ 0.8) ดังนั้น เพื่อไม่ให้อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากอัลกอริทึมแบบพันธุกรรมมีค่าที่มากผิดปกติ การศึกษานี้จึงกำหนดเงื่อนไขแสดงดังสมการที่ (3)

$$y_{con} \le kx_{pen} \quad (3)$$

y_{con} คือ อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึมแบบพันธุกรรม k คือ ค่าคงที่ประสิทธิภาพการก่อสร้าง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8 และ x_{pen} คือ อัตราขุดเจาะอุโมงค์ในหน่วย มม. ต่อนาที ที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึมแบบพันธุกรรม

2.3 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึมแบบพันธุกรรม

ขั้นตอนแรกอัลกอริทึมแบบพันธุกรรมจะสุ่มชุดตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ (ประชากร) ที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดและรวมกับชุดตัวแปรของกรณีศึกษา ขั้นต่อมาจะนำชุดข้อมูลข้างต้นไปวิเคราะห์หาอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดินด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกแล้ว ขั้นตอนที่สามอัลกอริทึมแบบพันธุกรรมจะตรวจสอบเงื่อนไขดังสมการที่ (3) และ (4) เพื่อคัดประชากรที่ไม่ผ่านเงื่อนไขออก และให้คะแนนประชากรที่เหลือในแต่ละรุ่นด้วยฟังก์ชันเป้าหมาย ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดการทำงานของอัลกอริทึมพันธุกรรม ถ้าไม่ตรงเงื่อนไขจะทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในประชากรรุ่นถัดไป และเริ่มกระบวนการทำงานซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนแรกจนถึงขั้นสุดท้ายจนได้ชุดตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสมที่สุดตามเงื่อนไข

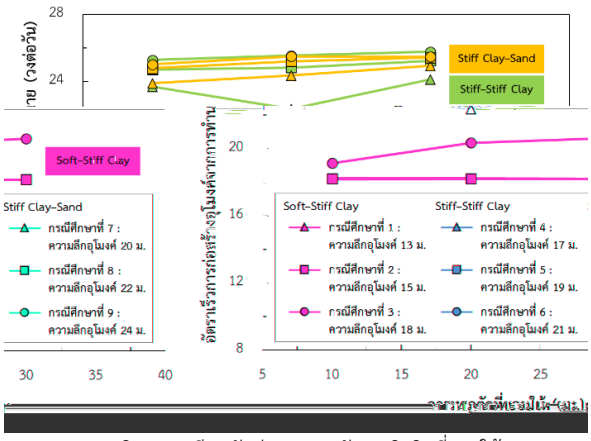
3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

3.1 ผลสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

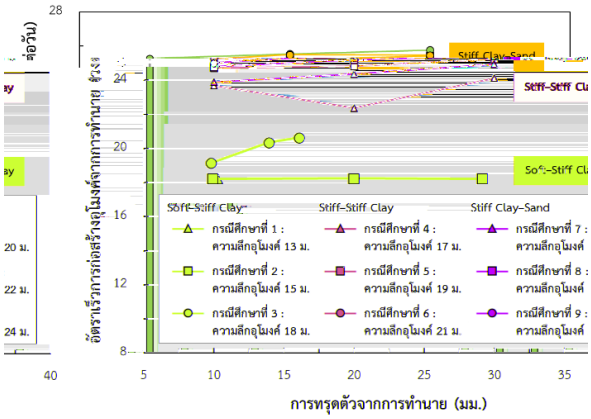
แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสร้างความสัมพันธ์จากข้อมูลก่อสร้างจริงเพื่อทำนายอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดินเนื่องจากตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ เพื่อยืนยันความแม่นยำในการทำนายค่าเป้าหมายสำหรับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด จึงมีความจำเป็นต้องสอบเทียบผลระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองและผลตรวจวัดจริงในสนาม จากผลการสอบเทียบดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 พบว่าทั้งแบบจำลองเพื่อทำนายอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดิน ในทุกสภาพชั้นดินให้ผลการทำนายเทียบกับผลตรวจวัดจริงในสนามกระจายตัวอยู่บนเส้นอัตราส่วน 1 ต่อ 1 และมีค่า RMSE และ R^2 ของแต่ละแบบจำลองดังแสดงในรูป จากผลการวิเคราะห์พบมีค่า RMSE เข้าใกล้ศูนย์ และ R^2 เข้าใกล้หนึ่ง แสดงว่าแบบจำลองข้างต้นมีความแม่นยำในการทำนายเป้าหมาย และสามารถนำไปใช้ประกอบการวิเคราะห์ในขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 5 อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

กรณีศึกษา	อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดิน (วงต่อวัน)		
	ไม่เกิน 10 มม.	ไม่เกิน 20 มม.	ไม่เกิน 30 มม.
1	18.21	18.21	18.21
2	18.22	18.23	18.22
3	19.14	20.35	20.64
4	23.70	22.36	24.12
5	24.71	24.83	25.24
6	25.27	25.54	25.77
7	23.89	24.36	24.94
8	24.79	25.20	25.43
9	25.02	25.50	25.47



(ก) พิจารณาเทียบกับค่าการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้



(ข) พิจารณาเทียบกับค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการทำนาย

รูปที่ 3 อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

3.2 อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้

การศึกษานี้ดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์เพื่อให้ได้อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ที่สูงที่สุดภายใต้การควบคุมค่าการทรุดตัวของผิวดินไม่เกิน 10 มม. 20 มม. และ 30 มม. ซึ่งได้อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละกรณีศึกษาแสดงดังตารางที่ 5 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์กับการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้ของแต่ละกรณีศึกษาดังรูปที่ 3(ก) ในภาพรวมเมื่อพิจารณาตามระดับความลึกอุโมงค์พบว่าในสภาพชั้นดินกรณีเดียวกัน ถ้าระดับความลึกอุโมงค์มากขึ้น อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาสภาพชั้นดินร่วมด้วยพบว่าชั้นดินกรณี Stiff–Stiff Clay และ Stiff Clay–Sand มีอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ใกล้เคียงกัน ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 22–26 วงต่อวัน และชั้นดินกรณี Soft–Stiff Clay มีอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์น้อยที่สุด ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 18–21 วงต่อวัน เนื่องจากในทางปฏิบัติผู้ปฏิบัติงานในสนามเลือกใช้วิธีขนส่งดินที่ขุดออกมาในชั้นดินกรณี Soft–Stiff Clay ต่างจากชั้นดินกรณีอื่นด้วยเหตุนี้จึงอาจทำให้ผลลัพธ์ที่ได้นั้นน้อยกว่าความเป็นจริง เมื่อยอมให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินมากขึ้น พบว่าอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินกรณี Stiff–Stiff Clay และ Stiff Clay–Sand ในภาพรวมของผลวิเคราะห์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเพิ่มขึ้นในอัตราค่อนข้างคงที่ แต่ชั้นดินกรณี Soft–Stiff Clay มีอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์เพิ่มขึ้นชัดเจนเฉพาะกรณีที่อุโมงค์มีระดับความลึก 18 ม. เท่านั้น ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากการกำหนดขอบเขตตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์สำหรับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์การหาค่าตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสมที่สุด

กรณีศึกษา	การทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้ (มม.)	อัตราขุดเจาะ (มม. ต่อนาที)	แรงดันหน้าหัวขุดเจาะ (กิโลปาสคาล)	แรงผลักหัวขุดเจาะ (ตัน)	มุมก้มมุมเงยของหัวขุดเจาะ (องศา)	แรงอัดฉีดน้ำปูนเกราต์ (บาร์)	เปอร์เซ็นต์ฉีดน้ำปูนเกราต์ (เปอร์เซ็นต์)
1	10	31	189	809	−0.29	1.69	150
	20	31	189	809	−0.33	2.50	128
	30	31	189	809	−0.33	2.50	128
2	10	31	189	809	−0.33	2.50	111
	20	31	189	900	−0.33	2.50	97
	30	31	168	1159	−0.33	2.50	97
3	10	30	188	839	−0.27	2.24	115
	20	31	171	1028	−0.10	1.16	115
	30	31	182	926	−0.26	1.41	131
4	10	46	30	611	−1.18	2.27	150
	20	38	30	611	−1.17	1.75	147
	30	38	30	611	−1.13	1.47	150
5	10	55	30	611	−1.18	2.54	150
	20	45	30	611	−1.18	2.22	150
	30	42	30	611	−1.18	1.95	150
6	10	55	30	611	−0.91	2.55	145
	20	47	30	611	−1.14	2.33	150
	30	43	30	611	−1.16	2.14	150
7	10	43	27	741	−1.23	2.49	224
	20	37	27	741	−1.23	2.46	223
	30	38	27	741	−1.23	2.45	224
8	10	51	27	741	−1.16	2.50	224
	20	42	27	741	−1.23	2.48	224
	30	39	27	741	−1.23	2.47	224
9	10	51	27	741	−0.89	2.50	205
	20	43	27	741	−1.18	2.49	224
	30	40	27	741	−1.19	2.48	224

บางชนิดแคบเกินไปอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และตัวแปรดังกล่าวอาจเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์และการทรุดตัวของผิวดินอย่างมีนัยสำคัญ

3.3 การเปลี่ยนแปลงตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสมที่สุดตามระดับความลึกอุโมงค์

จากกระบวนการหาตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสมที่สุดได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 6

3.3.1 อัตราขุดเจาะ (Penetration Rate)

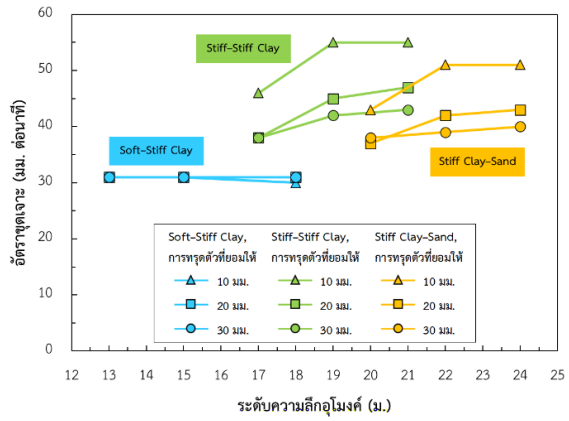
รูปที่ 4 แสดงอัตราขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้เทียบกับระดับความลึกอุโมงค์ในชั้นดินกรณี Stiff–Stiff Clay และ Stiff Clay–Sand พบว่าเมื่ออุโมงค์ถูกวางอยู่ในระดับที่ลึกขึ้นควรใช้อัตราขุดเจาะที่เร็วขึ้น แต่ในชั้นดินกรณี Soft–Stiff Clay มีการเปลี่ยนแปลงอัตราขุดเจาะที่น้อยมากเพราะผลลัพธ์อัตราขุดเจาะที่ได้ในทุกระดับความลึกเป็นค่าขอบเขตที่มากที่สุด (31 มม. ต่อนาที) และคาดว่าเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่าการทรุดตัวของผิวดินดังแสดงในรูปที่ 3(ข) มีค่าไม่เกิน 20 มม. ทั้งที่ค่าการทรุดตัวที่ยอมให้มีค่ามากกว่านั้น นอกจากนี้ผลอัตราขุดเจาะดังที่กล่าวในข้างต้นมีผลสอดคล้องกับผลอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ที่เหมาะสมที่สุดดังแสดงผลในหัวข้อที่ 3.2 จึงคาดว่าอัตราขุดเจาะเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราเร็วการขุดเจาะอย่างมีนัยสำคัญ

3.3.2 แรงอัดฉีดน้ำปูนเกราต์ (Grouting Pressure)

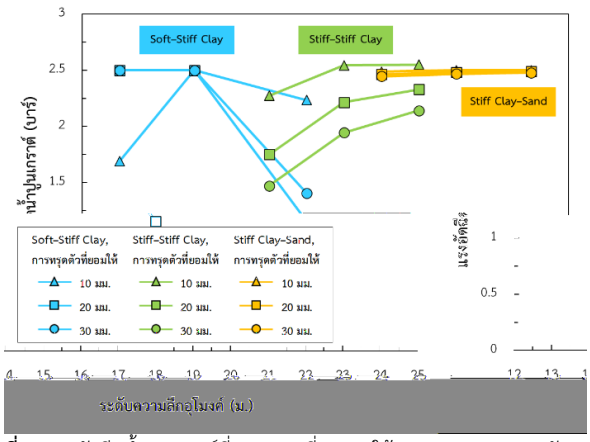
รูปที่5 แสดงแรงอัดฉีดน้ำปูนเกราต์ที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้เทียบกับระดับความลึกอุโมงค์ ในชั้นดินกรณี Stiff–Stiff Clay และ Stiff Clay–Sand เมื่ออุโมงค์ถูกวางอยู่ในระดับที่ลึกขึ้นควรใช้แรงอัดฉีดน้ำปูนเกราต์มากขึ้น เพื่อให้ได้อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ที่มากที่สุด แต่การเปลี่ยนแปลงของแรงฉีดน้ำปูนเกราต์ในชั้นดินกรณี Stiff Clay–Sand น้อยกว่ากรณีชั้นดิน Stiff–Stiff Clay อย่างมากเนื่องจาก Stiff Clay–Sand มีขอบเขตการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่แคบซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.4–2.5 บาร์ และในชั้นดินกรณี Soft–Stiff Clay พบว่าเมื่ออุโมงค์ถูกวางอยู่ในระดับที่ลึกขึ้นจะใช้แรงอัดฉีดน้ำปูนเกราต์น้อยลง จากการพิจารณาร่วมกับข้อมูลการตรวจวัดในสนามของตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ พบว่าในบางตำแหน่งของแนวขุดเจาะอุโมงค์ที่ระดับความลึกอุโมงค์ในช่วง 17–18 ม. ผู้ปฏิบัติงานในสนามสามารถใช้แรงอัดฉีดน้ำปูนเกราต์ที่ต่ำ (ไม่เกิน 1 บาร์) ก็สามารถทำให้มีเปอร์เซ็นต์ฉีดน้ำปูนตามข้อกำหนดได้ จึงคาดว่าเป็นเพราะชั้นดิน ณ ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดแรงอัดฉีดน้ำปูนเกราต์มีความหนาแน่นน้อยกว่าปกติ จึงทำให้ผลวิเคราะห์แนะนำให้ใช้แรงอัดฉีดปูนเกราต์น้อยลงเมื่อมีระดับความลึกที่ 18 ม.

3.3.3 แรงดันหน้าหัวขุดเจาะ (Face Pressure)

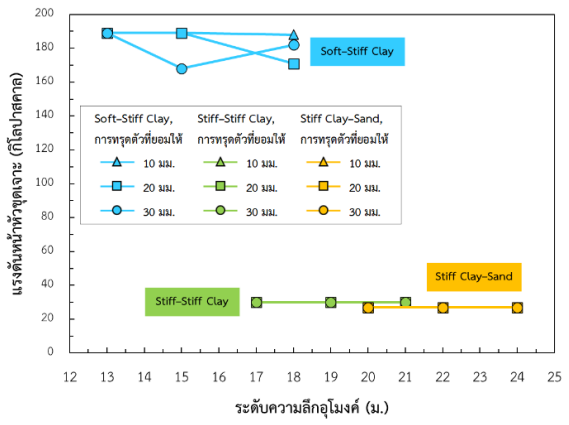
รูปที่ 6 แสดงแรงดันหน้าหัวขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้เทียบกับระดับความลึกอุโมงค์ ในชั้นดินกรณี Stiff–Stiff Clay และ Stiff Clay–Sand พบว่าค่าแรงดันหน้าหัวขุดเจาะที่ทำให้ได้อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ที่มากที่สุดมีแนวโน้มคงที่แม้ระดับความลึกจะเพิ่มขึ้นและมีค่าแรงดันหน้าหัวขุดเจาะเท่ากับขอบเขตที่น้อยที่สุด (29 และ 26 กิโลปาสคาล ตามลำดับ) แต่ในชั้นดินกรณี Soft–Stiff Clay ถึงแม้จะมีแนวโน้มของค่าแรงดันหน้าหัวขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดที่ไม่คงที่ในแต่ละระดับความลึก แต่โดยส่วนใหญ่ค่าแรงดันหน้าหัวขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดนั้นจะมีค่าใกล้เคียงขอบเขตที่มากที่สุด (189 กิโลปาสคาล)



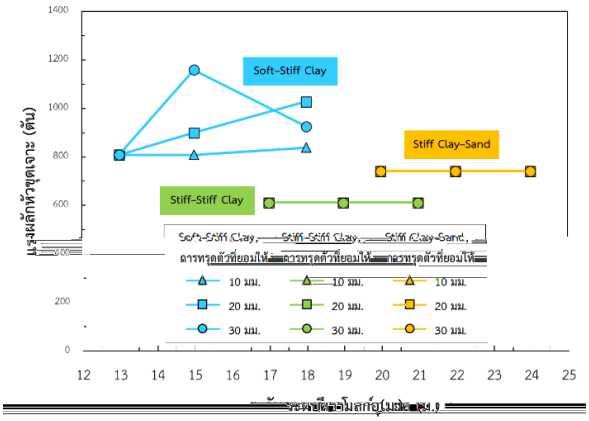
รูปที่ 4 อัตราขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้เทียบกับระดับความลึกอุโมงค์



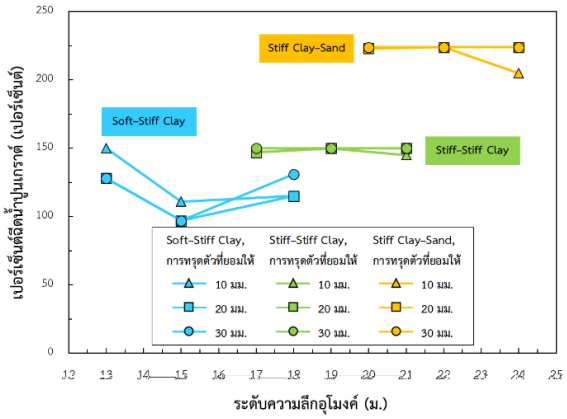
รูปที่ 5 แรงอัดฉีดน้ำปูนเกราต์ที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้เทียบกับระดับความลึกอุโมงค์



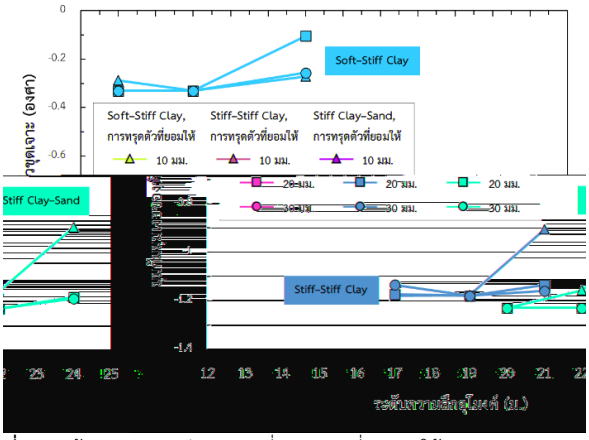
รูปที่ 6 แรงดันหน้าหัวขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้เทียบกับระดับความลึกอุโมงค์



รูปที่ 7 แรงผลักหัวขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้เทียบกับระดับความลึกอุโมงค์



รูปที่ 9 เปอร์เซ็นต์ฉีดน้ำปูนเกราต์ที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้เทียบกับระดับความลึกอุโมงค์



รูปที่ 8 มุมก้มมุมเงยของหัวขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้เทียบกับระดับความลึกอุโมงค์

3.3.4 แรงผลักหัวขุดเจาะ (Thrust Force)

รูปที่ 7 แสดงแรงผลักหัวขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้เทียบกับระดับความลึกอุโมงค์ จากการวิเคราะห์โดยภาพรวมพบว่าในชั้นดินกรณี Stiff–Stiff Clay และ Stiff Clay–Sand แรงผลักหัวขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดมีแนวโน้มคงที่แม้ระดับความลึกจะเพิ่มขึ้นและมีค่าแรงผลักหัวขุดเจาะใกล้เคียงกับค่าขอบเขตที่น้อยที่สุด (611 และ 741 ตัน ตามลำดับ) ในทางกลับกันสำหรับกรณีชั้นดิน Soft–Stiff Clay แรงผลักหัวขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกอุโมงค์

3.3.5 มุมก้มมุมเงยของหัวขุดเจาะ (Pitching Angle)

รูปที่ 8 แสดงมุมก้มมุมเงยของหัวขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมให้เทียบกับระดับความลึกอุโมงค์ ในทุกสภาพชั้นดินเมื่ออุโมงค์ถูกวางอยู่ในระดับที่ลึกขึ้นควรใช้ พบว่าเมื่ออุโมงค์ถูกวางอยู่ในระดับที่ลึกขึ้น ควรใช้ค่ามุมก้มมุมเงยของหัวขุดเจาะที่มากขึ้น (ค่ามุมก้มเข้าใกล้ศูนย์)

3.3.6 เปอร์เซ็นต์ฉีดน้ำปูนเกราต์ (Percent Grouting)

รูปที่ 9 แสดงเปอร์เซ็นต์ฉีดน้ำปูนเกราต์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละกรณีศึกษาเทียบกับระดับความลึกอุโมงค์ ในชั้นดินกรณี Stiff–Stiff Clay และ Stiff Clay–Sand โดยภาพรวมของผลการวิเคราะห์พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ฉีดน้ำปูนเกราต์ที่เหมาะสมที่สุดมีแนวโน้มคงที่แม้ระดับความลึกอุโมงค์จะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีเปอร์เซ็นต์ฉีดน้ำปูนเกราต์ใกล้เคียงกับค่าขอบเขตที่มากที่สุด ที่ใช้ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (150 และ 224 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ) ในทางตรงกันข้าม สำหรับชั้นดินในกรณี Soft–Stiff Clay ค่าเปอร์เซ็นต์ฉีดน้ำปูนที่เหมาะสมที่สุดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามระดับความลึกอุโมงค์ ซึ่งคาดว่าอาจจะเกิดจากความแปรปรวนของชั้นดิน โดยบริเวณที่มีการเกาะตัวของดินแน่นจะมีเปอร์เซ็นต์ฉีดน้ำปูนเกราต์ที่น้อย และถ้ามีการเกาะตัวของดินหลวมจะมีเปอร์เซ็นต์ฉีดน้ำปูนเกราต์ที่มาก

4. สรุปผล

การศึกษานี้นำโครงข่ายประสาทเทียมและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึมแบบพันธุกรรม เพื่อพิจารณาออกแบบตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ให้มีความเหมาะสมกับสภาพชั้นดินในแต่ละกรณี โดยพิจารณาหาค่าอัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ที่สูงที่สุดเมื่อควบคุมการทรุดตัวของผิวดินให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1. จากผลการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะพบว่าผลลัพธ์การวิเคราะห์มีความสมเหตุสมผล โดยเมื่อมีการควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่เข้มงวด ผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะให้อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ที่น้อยลง แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมและอัลกอริทึมแบบพันธุกรรมเป็นเครื่องมือสำหรับประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างอุโมงค์มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุด
2. สำหรับกรณีชั้นดิน Stiff–Stiff Clay และ Stiff Clay–Sand ให้ผลลัพธ์อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์ที่มากและมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ทั้งนี้การวางระดับอุโมงค์ในระดับลึกมาก อาจต้องพิจารณาปัจจัยสำคัญในส่วนของแรงดันน้ำที่มีค่าสูง และระมัดระวังการเกิดการ

ทรุดตัวของผิวดินที่มาก ในขณะที่กรณีชั้นดิน Soft–Stiff Clay ไม่ว่าจะมีการควบคุมการทรุดตัวของผิวดินมากหรือน้อยเพียงใด อัตราเร็วการก่อสร้างอุโมงค์นั้นก็ไม่สามารถเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

3. จากการวิเคราะห์ตัวแปรควบคุมเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ที่ผ่านกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยควบคุมการทรุดตัวของผิวดินที่ยอมรับได้ควรเลือกปรับอัตราขุดเจาะอุโมงค์และแรงอัดฉีดน้ำปูนเกราต์ให้มากขึ้น เมื่อแนวอุโมงค์ถูกวางในระดับความลึกที่มากขึ้นและเมื่อต้องการเพิ่มความรัดกุมในการควบคุมการทรุดตัวของผิวดิน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้มอบทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรม ภายใต้ทุนวิจัยพื้นฐานปี 2565 (โครงการ การก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ Thailand 4.0) จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Fattahi, H. and Babanouri, N. (2018). RES–Based Model in Evaluation of surface settlement caused by EPB shield tunneling. *Indian Geotechnical Journal*, 48, pp. 746–752.

[2] Sirivachiraporn, A. and Phienwej, N. (2012). Ground movements in EPB shield tunneling of Bangkok subway project and impacts on adjacent buildings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, pp. 10–24.

[3] Suwansawat, S. (2002). *Earth Pressure Balance (EPB) Shield Tunneling in Bangkok: Ground Response and Prediction of Surface Settlements Using Artificial Neural Networks*. Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA.

[4] Chotidilok, P. (2009). *Evaluation of ANN Performance and Shield Operational Factor's Correlation for Predicting Surface Settlements*. Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

[5] Koukoutas, S.P. and Sofianos, A.I. (2015). Settlements due to single and twin tube urban EPB shield tunnelling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, pp. 487–510.

[6] Moeinossadat, S.R., Ahangari, K. and Shahriar, K. (2018). Control of ground settlements caused by EPBS tunneling using an intelligent predictive model. *Indian Geotechnical Journal*, 48, pp. 420–429.

[7] Ocak, I. and Seker, S. (2013). Calculation of surface settlements caused by EPBM tunneling using artificial neural network, SVM, and Gaussian processes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70, pp. 1263–1276.

[8] Srijanthong, P. (2008). *A Study of Shield Operational Factors on Ground Settlement Using ANN*. Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

[9] Suwansawat, S. and Einstein, H. (2006). Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, pp. 133–150.

[10] Basheer, I.A. and Hajmeer, M. (2000). Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. *Journal of Microbiological Methods*, 43, pp. 3–31.

[11] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Jongpradist, P., Dias, D. and Baroth, J. (2020). Parametric analysis and optimization of T–shaped and conventional deep cement mixing column–supported embankments. *Computers and Geotechnics*, 122, pp. 103555.

[12] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Jongpradist, P., Dias, D., Jamsawang, P. and Bergado, D.T. (2021). Performance–based design optimization of embankments resting on soft soil improved with T–shaped and conventional DCM columns. *Acta Geotechnica*, 16, pp. 3301–3326.

[13] Sanboonsiri, S. (2020). *Multiobjective–Based Optimization Design of Stiffened Deep Cement Mixing Column–Supported Embankment*. Master Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.

[14] Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial system*. The University of Michigan Press.

[15] Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison–Wesley Publishing Company, Inc.