ผลกระทบของการขุดอุโมงค์ต่อเสาเข็มข้างเคียงเมื่อพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดิน
Influence of tunnel excavation on adjacent existing pile considering soil spatial variability

ปองชัย ศรีแสงทอง[1] พรเกษม จงประดิษฐ์[2,*] ชนา พุทธนานนท์[3] และ อาทิตย์ ฉายอรุณ[4]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร
[4] บริษัท วิศวกรรมธรณีและฐานราก จำกัด จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: pornkasem.jon@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน การก่อสร้างอุโมงค์ในเขตชุมชนมีความจำเป็นที่ต้องขุดเจาะอุโมงค์ใกล้เคียงกับโครงสร้างเดิมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินตลอดแนวการขุด และการเคลื่อนตัวนี้อาจส่งผลต่อโครงสร้างข้างเคียง สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของการขุดอุโมงค์ต่อฐานรากเสาเข็มของโครงสร้างอาคารข้างเคียงนั้น การศึกษาที่ผ่านมามักพิจารณาสมบัติของดินในลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ในรูปแบบนี้อาจทำให้ผลการวิเคราะห์ขาดความครอบคลุมสำหรับการพิจารณาระดับความน่าเชื่อถือเนื่องจากละเว้นการพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดิน ดังนั้น การศึกษาจึงมุ่งเน้นให้ความสำคัญถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเนื่องจากการขุดอุโมงค์ข้างเคียงโดยการประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่มด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของระดับความผันผวนที่ส่งผลต่อความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเสียรูปของเสาเข็มและความน่าจะเป็นในการวิบัติ การวิเคราะห์โดยคำนึงถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติจึงเหมาะสมที่จะใช้พิจารณาถึงความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น

คำสำคัญ: วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่ม, ความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดิน, การขุดอุโมงค์, เสาเข็มข้างเคียง

Abstract

Currently, tunnel construction in urban areas inevitably requires excavation near existing structures, leading to soil movement around the excavation zone. This movement may affect adjacent structures, particularly the pile foundations of nearby buildings. Previous studies have typically considered soil properties as homogeneous media. However, such analyses may be insufficiently reliable due to the spatial variability of soil properties. Therefore, this research emphasizes the importance of incorporating spatial variability of soil properties into the analysis of pile behavior influenced by tunnel excavation. A stochastic finite element method (SFEM) is applied using PLAXIS 2D to assess the effects of spatial variability. The analysis results demonstrate that the scale of fluctuation plays a significant role in both pile deformation and the probability of failure. Therefore, accounting for soil spatial variability is a suitable and necessary approach to assessing the potential risks affecting pile foundations near tunnel excavation.

Keywords: Stochastic finite element analysis, Soil spatial variability, Tunnel excavation, Existing pile

1. บทนำ

ในเขตชุมชนเมืองที่มีปริมาณการจราจรหนาแน่นและข้อจำกัดของพื้นที่ผิวดิน การก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินจึงกลายเป็นทางเลือกที่สำคัญในการพัฒนาระบบขนส่งมวลชน อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินช่วยเพิ่มความสามารถในการรองรับการเดินทางของประชากรในเขตเมืองที่ขยายตัวอย่างรวดเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินมีความจำเป็นที่จะต้องทำการขุดเจาะใกล้เคียงโครงสร้างเสาเข็มของสิ่งปลูกสร้างเดิมที่มีอยู่แล้วอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยที่ผลกระทบจากการสูญเสียมวลดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์นั้นอาจนำไปสู่ความเสียหายหรือสูญเสียเสถียรภาพในการให้บริการของสิ่งปลูกสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว [1] ดังนั้นการประเมินผลกระทบของการขุดเจาะอุโมงค์ต่อฐานรากเสาเข็มของอาคารข้างเคียงจึงเป็นสิ่งสำคัญ จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการประเมินผลกระทบของการขุดเจาะอุโมงค์ต่อฐานรากเสาเข็มของอาคารข้างเคียง อย่างไรก็ตาม ในการจำลองพฤติกรรมดังกล่าว สมบัติดินมักจะถูกพิจารณาให้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) โดยไม่คำนึงถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินตามธรรมชาติ การศึกษาในแนวทางดังกล่าวถูกเรียกว่าการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนด (Deterministic Finite Element Method, DFEM) โดยที่การละเว้นการพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินนี้อาจทำให้การประเมินผลกระทบต่อเสาเข็มข้างเคียงขาดความครอบคลุมถึงความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น [2, 3]

จากการศึกษาที่ผ่านมา [4] การวิเคราะห์ผลกระทบจากการก่อสร้างอุโมงค์มักจะพิจารณาเพียงการทรุดตัวของผิวดินภายใต้สภาวะดินเปล่า (Greenfield Condition) หรือใช้วิธีเชิงประจักษ์ [5] ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงการประเมินการเคลื่อนตัวของดินบริเวณรอบอุโมงค์อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในด้านการพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการประเมินความปลอดภัยของฐานรากอาคารที่อยู่ในขอบเขตอิทธิพลของการขุดอุโมงค์ [6] เพื่อจัดการกับข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยในระยะต่อมาได้พิจารณาผลกระทบเนื่องจากการขุดอุโมงค์ต่อเสาเข็มฐานรากข้างเคียงโดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบสองมิติและสามมิติโดยพิจารณาการมีอยู่ของเสาเข็มในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ [1, 2, 7] จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มฐานรากเกิดจากการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งการเคลื่อนตัวของเสาเข็มฐานรากนี้ส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างที่อยู่ด้านบน โดยสามารถทำให้เกิดการเอียงตัวหรือ

เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงภายในเสาเข็ม อย่างไรก็ตาม เพื่อลดข้อจำกัดของการใช้ DFEM ที่ไม่สามารถสะท้อนความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดิน เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงสถิติร่วมกับการจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินด้วยทฤษฎีสนามสุ่ม (Random Field) โดยใช้กระบวนการทำซ้ำหลาย ๆ ครั้ง (Monte Carlo Simulation) [2, 8] ซึ่งสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นในการวิบัติทีละเป้าหมาย เช่น การทรุดตัวของหัวเสาเข็ม การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม และผลต่างการทรุดตัวของเสาเข็ม เป็นต้น โดยการศึกษาแนวทางดังกล่าวจะถูกเรียกว่าการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่ม (Stochastic Finite Element Method, SFEM) โดยผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถแสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการเสียรูปของเสาเข็มเช่นกัน

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา ถึงแม้ว่าความแปรปรวนของสมบัติดินถูกนำมาพิจารณาร่วมกับการขุดเจาะอุโมงค์เพื่อวิเคราะห์โอกาสการวิบัติของเสาเข็มฐานรากของอาคารข้างเคียง อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์โอกาสการวิบัติดังกล่าวยังขาดการพิจารณาแบบระบบองค์รวม ซึ่งคำนึงถึงหลายเป้าหมายพร้อมกัน ดังนั้นการศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ผลกระทบของการขุดเจาะอุโมงค์ต่อเสาเข็มฐานรากของอาคารข้างเคียง โดยพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินและโอกาสการวิบัติแบบระบบองค์รวม ดังต่อไปนี้ โอกาสการวิบัติสำหรับการทรุดตัวที่หัวเสาเข็มต้นที่ใกล้กับแนวการขุดอุโมงค์มากที่สุด โอกาสการวิบัติสำหรับการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มต้นที่ใกล้กับแนวการขุดอุโมงค์มากที่สุด โอกาสการวิบัติสำหรับผลต่างของการทรุดตัวระหว่างเสาเข็มต้นที่ใกล้และไกลกับแนวการขุดอุโมงค์มากที่สุด และโอกาสการทรุดตัวของผิวดิน โดยพิจารณาทั้งผลลัพธ์ของวิเคราะห์แบบ DFEM และ SFEM เพื่อประเมินระดับความน่าเชื่อถือของเสาเข็มฐานรากของอาคารข้างเคียงที่ได้รับผลกระทบจากการขุดเจาะอุโมงค์

2. ระเบียบวิธีการศึกษา

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติโดยโปรแกรม PLAXIS 2D ร่วมกับภาษาไพทอน (Python) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการขุดเจาะอุโมงค์ต่อเสาเข็มของอาคารข้างเคียงที่มีอยู่แล้ว อีกทั้งคำนวณและวิเคราะห์อิทธิพลของความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินภายใต้เงื่อนไขเชิงสถิติที่มีต่อการสูญเสียเสถียรภาพในการให้บริการของเสาเข็มผ่านโปรแกรม MATLAB

ในการศึกษานี้ สมบัติของดินที่ถูกพิจารณาให้มีความแปรปรวนเชิงพื้นที่ คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Secant Modulus, E_{50}^{ref}) และค่าความเชื่อมแน่น (Effective Cohesion, c') สำหรับนำไปใช้ในแบบจำลองดิน Hardening Soil ซึ่งทั้งสองสมบัตินี้จะถูกแจกแจงโดยค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะไร้การระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, s_u) ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง s_u และ E_{50}^{ref} จะถูกพิจารณาจากข้อมูลชั้นดินเหนียวอ่อนถึงชั้นดินเหนียวแข็งจากการทดสอบด้วยแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) และการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfine Compression Test) จากโครงการรถไฟฟ้าในเขตกรุงเทพฯ เพื่อสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองสมบัติดิน โดยแสดงในรูปแบบของสมการ $E_{50}^{\text{ref}} = R \times s_u$ โดยที่ R หมายถึงอัตราส่วนระหว่าง E_{50}^{ref} และ s_u ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์เท่ากับ 193 และมีช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% อยู่ในช่วงค่าเท่ากับ 63 ถึง 417 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of Variation, COV) สำหรับความสัมพันธ์นี้มีค่าเท่ากับ 0.42 ซึ่งแสดงในรูปที่ 1 สำหรับค่า c' จะถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์ร่วมกันกับค่า s_u และแรงเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งของดิน (σ'_v) ดังแสดงในสมการที่ (1) [9] โดยที่ค่า k_0 สามารถคำนวณได้จาก $1-\sin(\phi')$

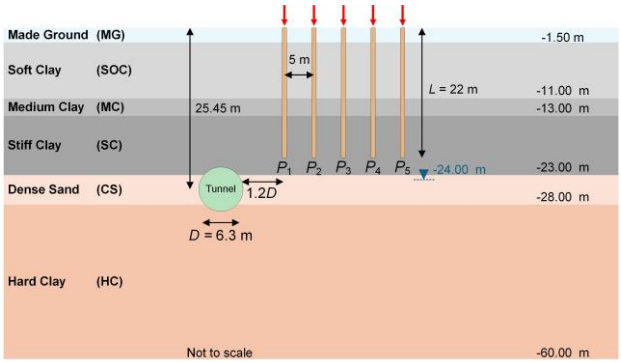
$$c' = \frac{1}{\cot\phi'} \times \left(\frac{s_u}{\sin\phi'} - \frac{\sigma'_v + k_0\sigma'_v}{2} \right) \quad (1)$$

รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ E_{50}^{ref} และ s_u ของดิน SOC, MC และ SC

2.1 กรณีตัวอย่างและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนด (DFEM)

การศึกษานี้ใช้กรณีตัวอย่างจากโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน (MRT Blue Line) เส้นทางเฉลิมรัชมงคล หน้าตัด CS-4C ในเขตกรุงเทพฯ โดยมีระดับความลึกจากผิวดินถึงระดับกึ่งกลางอุโมงค์อยู่ที่ -25.45 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ (D) มีค่าเท่ากับ 6.3 เมตร และความหนาของดาดอุโมงค์เท่ากับ 0.3 เมตร ซึ่งชั้นดินในการศึกษามีทั้งหมด 6 ชั้น ได้แก่ ชั้นพื้นดิน (Made Ground, MG) หนา 1.5 เมตร ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay, SOC) หนา 9.5 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium clay, MC) หนา 2 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay, SC) หนา 10 เมตร ชั้นทรายแน่น (Dense Sand, DS) หนา 5 เมตร และชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Hard Clay, HC) หนา 32 ร ชั้นดินเ

การวิเคราะห์ผลกระทบของเสาเข็มเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยวิธี DFEM จะพิจารณาค่าเฉลี่ยของสมบัติดินจากข้อมูลเชิงสถิติของดินกรุงเทพมหานคร [10, 12] สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี SFEM จะพิจารณาการแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินทั้งหมด 3 ชั้น ได้แก่ SOC MC และ SC โดยที่ชั้นดิน MG DS และ HC จะถูกพิจารณาเป็นค่าคงที่เนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินบริเวณด้านบนเหนืออุโมงค์เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองดินแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 ภาพหน้าตัดขวางของกรณีศึกษา

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของชั้นดิน [10]

พารามิเตอร์	MG	SOC	MC	SC	DS	HC
γ (kN/m^3)	18.00	16.50	17.50	19.50	19.00	20.00
c' (kPa)	1.00	(1)*	(1)*	(1)*	1.00	40.00
E_{50}^{ref} (kPa)	45,600	$R \times s_u$ **	$R \times s_u$ **	$R \times s_u$ **	38,000	30,000
E_{oed}^{ref} (kPa)	45,600	$R \times s_u$ **	$R \times s_u$ **	$R \times s_u$ **	38,000	30,000
E_{ur}^{ref} (kPa)	136,800	$3E_{50}^{ref}$ ***	$3E_{50}^{ref}$ ***	$3E_{50}^{ref}$ ***	115,000	120,000
ϕ' (degree)	25.00	23.00	25.00	26.00	27.00	24.00
ψ (degree)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ν_{ur} (-)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
R_f (-)	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
m (-)	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	1.00

*คำนวณจากสมการที่ 1

**ความสัมพันธ์จากการศึกษาภาคสนามในโครงการรถไฟฟ้าในกรุงเทพมหานคร โดยมีตัวอย่างการคำนวณดังนี้ E_{50}^{ref} = 193 ×18.3 = 3531.9 (kPa)

***Unloading/Reloading Stiffness Modulus

โดยพารามิเตอร์ E_{50}^{ref} หมายถึง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น 50% ของกำลังรับสูงสุด ณ แรงดันโดยรอบ (Confining Pressure) เท่ากับ 100 kPa E_{oed}^{ref} (Tangent Stiffness Modulus) หมายถึง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับโหลดในแนวดิ่ง และ E_{ur}^{ref} (Unloading / Reloading Stiffness) หมายถึง ค่า ค่าความแข็งของดินในช่วงที่ไม่มีการเสียรูปถาวร

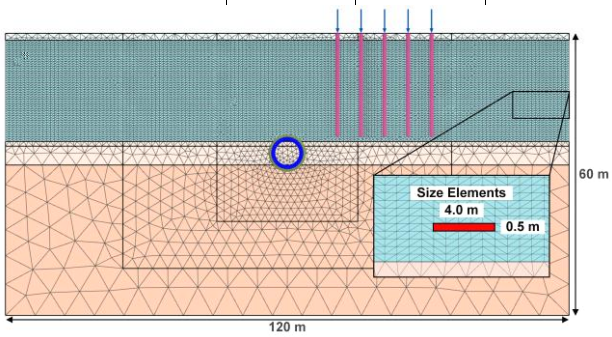
การศึกษานี้กำหนดให้ชิ้นส่วนเอลิเมนต์ (Size Elements) มีขนาดเล็กกว่า 0.5 เท่าของระดับความผันผวน (Scale of Fluctuation, δ) ในแต่ละทิศทาง ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยในอดีตที่พิจารณาถึงทฤษฎีสนามสุ่มของค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะไร้การระบายน้ำ [13] นอกจากนี้ ระดับความผันผวนของค่า s_u สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ ในแนวแกนดิ่ง (δ_y) มีค่าเท่ากับ 2 เมตร และในแนวแกนราบได้กำหนดระดับความผันผวน (δ_x) เท่ากับ 10 เมตร โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต [14] ดังนั้นชิ้นส่วนเอลิเมนต์จะถูกกำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 4 เมตร และ 0.5 เมตร ในแนวแกนราบและแกนดิ่งตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3

2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่ม (SFEM)

การวิเคราะห์ SFEM จะพิจารณาถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดิน ซึ่งสมบัติของดินจะถูกสุ่มโดยอ้างอิงจากข้อมูลทางสถิติใต้ผิวดินกรุงเทพฯ [12] ตัวแปรทางสถิติสำหรับสุ่มสมบัติดินประกอบไปด้วยค่า COV และค่าเฉลี่ย (μ) ของค่า s_u แสดงดังตารางที่ 2 ในการศึกษานี้ ค่า s_u จะถูกสุ่มโดยกระบวนการสุ่มผ่านวิธีแยกส่วนประกอบ Cholesky Decomposition Technique

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์เชิงสถิติของค่า s_u ใต้ผิวดินกรุงเทพมหานคร [12]

พารามิเตอร์	SOC	MC	SC
μ	18.3	41.1	108.0
COV	0.68	0.43	0.54



รูปที่ 3 ขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2.1 การคำนวณเมทริกซ์ค่าสหสัมพันธ์อัตโนมัติของข้อมูล

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อัตโนมัติ (Autocorrelation Coefficient) ในการศึกษานี้ประยุกต์ใช้ฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (Autocorrelation Function, ACF) แบบ Single Exponential Model ดังแสดงในสมการที่ (2) ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้ทฤษฎีสนามสุ่ม (Random Field Theory) [2, 3, 14] ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดิน

$$\rho(\Delta x, \Delta y) = \exp\left(-2\left[\left(\frac{\Delta x}{\delta_x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\delta_y}\right)^2\right]^{0.5}\right) \quad (2)$$

โดยที่ ($\Delta x, \Delta y$) หมายถึงระยะความสัมพันธ์ระหว่างจุดสองจุดในแต่ละแนวแกน δ_x และ δ_y หมายถึงระดับความผันผวนในแนวราบและแนวดิ่งตามลำดับ และสมการข้างต้นจะถูกคำนวณเป็นเมทริกซ์สหพันธ์อัตโนมัติของสมบัติดินต่อไป

2.2.2 การแยกส่วนประกอบของเมทริกซ์สหสัมพันธ์อัตโนมัติแบบ Cholesky

เมทริกซ์สหสัมพันธ์อัตโนมัติของสมบัติดินจะถูกแยกส่วนประกอบของเมทริกซ์ โดยใช้เทคนิคการแยกส่วนประกอบ Cholesky Decomposition เพื่อใช้ในการสร้างสนามสุ่มของสมบัติดิน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$C = LL^T \quad (3)$$

โดยที่ C หมายถึงเมทริกซ์สหสัมพันธ์อัตโนมัติของสมบัติดินและ L เป็นเมทริกซ์สามเหลี่ยมล่าง (Lower Triangular Matrix) ที่ได้จากกระบวนการ Cholesky โดยมีขนาดเท่ากับ $n \times n$ ซึ่ง n คือจำนวนของชิ้นส่วนย่อยของดิน โดยค่าที่ได้จากการแยก Cholesky จะถูกนำไปใช้สุ่มค่าพารามิเตอร์ s_u

2.3 ขอบเขตแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการศึกษาก่อนหน้า [6] ได้แนะนำขอบเขตของแบบจำลองไฟต์ไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น เพื่อลดผลกระทบจากขอบเขตของแบบจำลองสองมิติ

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์อุโมงค์และเสาเข็ม [15]

พารามิเตอร์	ดาดอุโมงค์ (Lining)	คอนกรีตเสาเข็ม (Pile)
γ (kN/m^3)	24.00	24.00
E (GPa)	31.00	31.00
ν (-)	0.20	0.20

การศึกษานี้ได้กำหนดขอบเขตแบบจำลองไฟต์ไนต์เอลิเมนต์โดยมีขนาดความยาวตามแนวแกนราบ (แกน x) และตามแนวดิ่ง (แกน y) เท่ากับ 120 เมตร ($\approx 19.05D$) และ 60 เมตร ($\approx 9.52D$) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 การจำลองและวิเคราะห์ไฟต์ไนต์เอลิเมนต์จะกำหนดลักษณะปัญหาเป็นแบบความเครียดระนาบสองมิติ 2D Plain Strain และกำหนดให้ขอบล่างของแบบจำลองไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในทุกทิศทาง โดยที่ขอบด้านซ้ายและด้านขวาของแบบจำลองสามารถเคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวดิ่ง

2.4 พารามิเตอร์อุโมงค์และเสาเข็ม

ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้ในการจำลองดาดอุโมงค์และเสาเข็มข้างเคียง การศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้พารามิเตอร์เหล่านี้จากงานวิจัยในอดีต [15] โดยดาดอุโมงค์จะถูกจำลองพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้นด้วยการจำลองในรูปแบบ Plate Element และเสาเข็มถูกจำลองพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้นแบบยืดหยุ่นด้วยการจำลองในรูปแบบคานฝังแถว ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถจำลองพฤติกรรมเสาเข็มให้อยู่ในรูปแบบสองมิติ [1, 11] เพื่อให้การถ่ายแรงระหว่างเสาเข็มและดินเป็นไปอย่างเหมาะสม ค่าพารามิเตอร์ความแข็งของอินเทอร์เฟซ (Interface Stiffness Factor, ISF) ถูกกำหนดให้มีค่าเหมาะสมตามคำแนะนำของ Sluis et al. [11] ซึ่งค่า ISF นี้มีบทบาทสำคัญในการควบคุมความสามารถในการพัฒนาแรงยึดเหนี่ยวและแรงเสียดทานระหว่างผิวเสาเข็มและมวลดิน

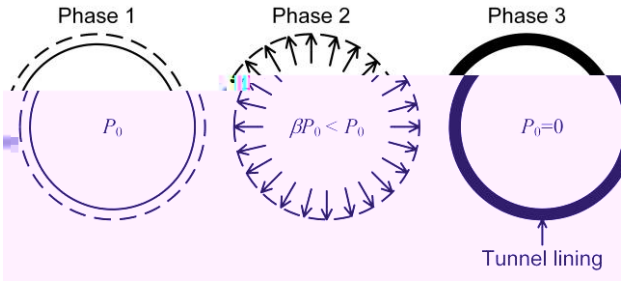
2.5 ขั้นตอนวิธีการจำลองการขุดอุโมงค์และเสาเข็มข้างเคียง

วิธีการจำลองการขุดเจาะอุโมงค์ในการศึกษานี้จะทำการวิเคราะห์โดยวิธี Stress Reduction Method ซึ่งนำพารามิเตอร์ Unloading Factor (β) มาพิจารณาผลกระทบการขุดเจาะอุโมงค์สองมิติในสภาวะความเครียดระนาบสองมิติ [10] โดยมีขั้นตอนการจำลองดังแสดงต่อไปนี้

ขั้นตอนที่หนึ่ง จำลองสภาวะความเค้นเริ่มต้นของมวลดิน โดยคำนวณจากหน่วยน้ำหนักของดิน และค่าสัมประสิทธิ์ของความเค้นของดิน (K_0 at Rest)

ขั้นตอนที่สอง จำลองเสาเข็มข้างเคียงด้วยรูปแบบคานฝังแถวและแรงที่กระทำต่อเสาเข็ม

ขั้นตอนที่สาม จำลองวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยวิธี Stress Reduction Method โดยมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4 และมีขั้นตอนย่อย ดังนี้ ขั้นตอนย่อยที่หนึ่ง โครงสร้างดินบริเวณขอบอุโมงค์จะถูกจำลองให้อยู่ในสภาวะสมดุลหรือความดันค้ำยันเริ่มต้น (Initial Support Pressure, p_0) ขั้นตอนย่อยที่สอง มวลดิน ณ ตำแหน่งหน้าอุโมงค์จะถูกนำออกเพื่อจำลอง



รูปที่ 4 ขั้นตอนการจำลองการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยวิธี Stress Reduction Method

การขุดดินและลดทอนค่า p_0 ด้วยค่า β ซึ่งจะส่งผลให้ดินโดยรอบอุโมงค์เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง พร้อม ๆ กับการเกิดการเสียรูปของมวลดิน และสำหรับขั้นตอนย่อยสุดท้าย จะเป็นการจำลองดาดอุโมงค์เพื่อสะท้อนพฤติกรรมของโครงสร้างรองรับอุโมงค์หลังจากการขุดเจาะอุโมงค์เสร็จสิ้น

2.6 การกำหนดสถานะขีดจำกัดสำหรับโอกาสในการวิบัติของเสาเข็มและการทรุดตัวของผิวดิน (Limit State Function)

สำหรับการวิเคราะห์โอกาสในการวิบัติของเสาเข็มอาคารจากการขุดเจาะอุโมงค์ ฟังก์ชันสถานะขีดจำกัด (Limit State Function, LSF) จะถูกนำมาเพื่อกำหนดเป็นขอบเขตระหว่างสภาวะความปลอดภัยและสภาวะวิบัติของเสาเข็มเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ สภาวะการวิบัติจะถูกนิยามเมื่อ $g < 0$ ในขณะที่ $g > 0$ หมายถึงสภาวะที่ปลอดภัย ซึ่งในการศึกษาจะพิจารณา LSF ทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่ การทรุดตัวของหัวเสาเข็ม (Pile Head Settlement, S_p) ต้นที่ใกล้กับแนวการขุดอุโมงค์มากที่สุด การเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Horizontal Pile Displacement, U_h) ของเสาเข็มต้นที่ใกล้กับแนวการขุดอุโมงค์มากที่สุด ผลต่างการทรุดตัว (Differential Pile Head Settlement, ΔS) ของเสาเข็มต้นที่ใกล้และไกลกับแนวการขุดอุโมงค์มากที่สุด และการทรุดตัวของผิวดินสูงสุด (Surface Settlement, S_{set}) ดังแสดงในสมการที่ (4) ถึง (7)

$$g_1 = S_p^{allow} - S_p^{act} \quad (4)$$

$$g_2 = U_h^{allow} - U_h^{act} \quad (5)$$

$$g_3 = \Delta S^{allow} - \Delta S^{act} \quad (6)$$

$$g_4 = S_{set}^{allow} - S_{set}^{act} \quad (7)$$

โดยที่ S_p^{allow}, U_h^{allow}, ΔS^{allow} และ S_{set}^{allow} ถูกกำหนดให้เป็นค่าขีดจำกัดที่ยอมรับได้ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์พิจารณาสภาวะของเสาเข็มและการทรุดตัวของผิวดิน จากข้อแนะนำของ Building Construction Authority [16] การทรุดตัวของหัวเสาเข็มควรจะถูกกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 35 มิลลิเมตร ผลต่างการทรุดตัวระหว่างเสาเข็มควรมีค่าไม่เกิน 1:500 ถึง 1:1,400 [17] และจากข้อแนะนำของ Dutch Code [18, 19] การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มควรมีค่าไม่เกิน 50 มิลลิเมตร ดังนั้นในการศึกษา

นี้ ค่าขีดจำกัดที่ยอมรับสำหรับทั้ง $S_{\mathrm{p}}^{\mathrm{allow}}$ และ $U_{\mathrm{h}}^{\mathrm{allow}}$ จะถูกกำหนดให้เท่ากับ 25 มิลลิเมตร และ $\Delta S^{\mathrm{allow}}$ จะถูกกำหนดให้เท่ากับ 1:1,000 สำหรับค่าขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของการทรุดตัวของผิวดิน ค่านี้จะถูกกำหนดจาก DFEM ซึ่งเป็นผลมาจากการสอบเทียบจากผลตรวจวัดในสนามจริง สำหรับค่า $S_{\mathrm{p}}^{\mathrm{act}}$, $U_{\mathrm{h}}^{\mathrm{act}}$, ΔS^{act} และ $S_{\mathrm{set}}^{\mathrm{act}}$ เป็นผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยวิธี SFEM

การวิเคราะห์โอกาสในการวิบัติด้วยวิธี Monte Carlo Simulation เป็นที่นิยมในการประมาณหาผลลัพธ์โอกาสในการวิบัติ [4, 8] โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$P_f = \frac{N_f}{N} \times 100\% \tag{7}$$

โดยที่ N คือจำนวนตัวอย่างทั้งหมดและ N_f คือจำนวนของตัวอย่างที่สภาวะการวิบัติ ($g_i(x) < 0$) อย่างไรก็ตาม จากสมการที่ (4) ถึง (6) แสดงวิธีการวิเคราะห์หาโอกาสในการวิบัติสำหรับการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม ($P_{f,S_{\mathrm{p}}}$) โอกาสในการวิบัติสำหรับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม ($P_{f,U_{\mathrm{h}}}$) โอกาสในการวิบัติสำหรับผลต่างการทรุดตัวของเสาเข็มต้นสองต้น ($P_{f,\Delta S}$) และโอกาสในการวิบัติของการทรุดตัวที่ผิวดิน ($P_{f,\mathrm{set}}$) เพื่อวิเคราะห์โอกาสในการวิบัติของหลายเป้าหมายร่วมกัน [20, 21] ดังนั้น โดยการวิบัติแบบองค์รวมจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีอย่างน้อยหนึ่งในเงื่อนไขเกิดการวิบัติ โดยที่สามารถคำนวณโอกาสการวิบัติแบบองค์รวมได้ดังสมการที่ (8)

$$P_f^{sys} = \mathrm{P}\left[\bigcup_{i=1}^{3}(g_i(x) < 0)\right] \tag{8}$$

2.7 กรณีศึกษา

การศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็มฐานรากของอาคารข้างเคียงเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์และความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดิน ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินคือ ระดับความผันผวนของสมบัติดินในแต่ละทิศทางและค่า COV [2, 8, 12, 14] ซึ่งสะท้อนถึงความต่อเนื่องและความสม่ำเสมอของสมบัติดิน ในการศึกษานี้ ได้ออกแบบกรณีศึกษาทั้งหมด 5 กรณี โดยกำหนดให้ค่า COV คงที่ ดังนี้ ในกรณีศึกษาที่หนึ่งจะถูกกำหนดจากพารามิเตอร์จากข้อมูลเชิงสถิติของดินในกรุงเทพมหานคร และกรณีศึกษาที่สองและสาม ได้ทำการแปรผันค่า δ_x ต่อมา δ_y จะถูกพิจารณาในกรณีศึกษาที่สี่และห้า เพื่อแยกวิเคราะห์อิทธิพลของลักษณะการกระจายตัวของสมบัติดินในแต่ละทิศทางต่อพฤติกรรมของเสาเข็ม

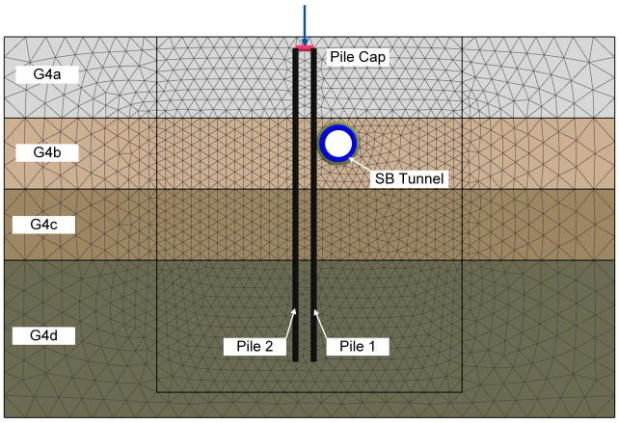
3. ผลการวิเคราะห์

3.1 การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองการขุดอุโมงค์และเสาเข็ม

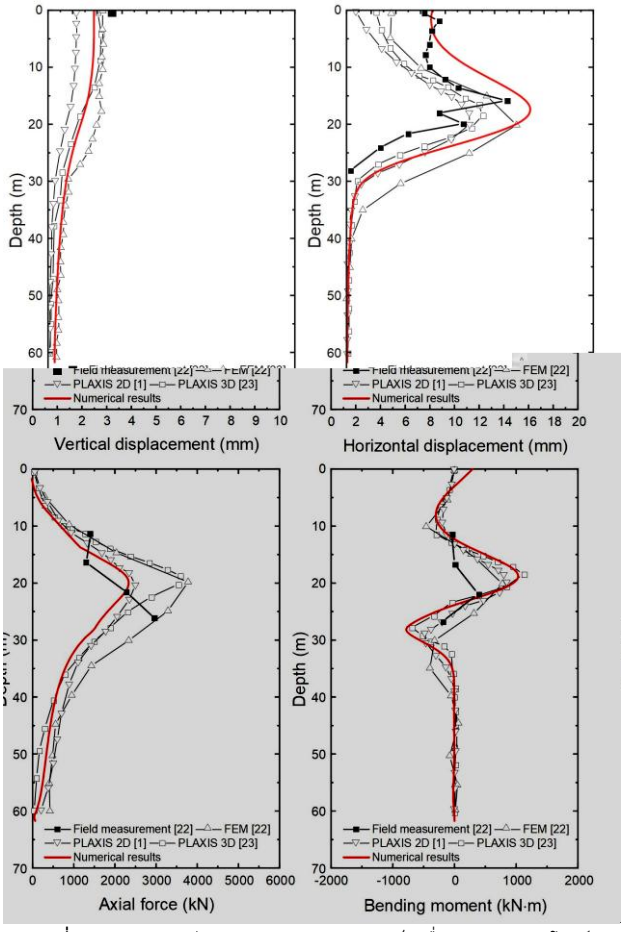
รูปที่ 5 แสดงโครงตาข่ายของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติในกรณีศึกษาของ MRT Singapore [22, 23] โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์และเสาเข็มเท่ากับ 6.3 เมตร และ 1.2 เมตร ตามลำดับ ความยาวเสาเข็มเท่ากับ 62 เมตร ระยะห่างระหว่างเสาเข็มสองต้นเท่ากับ 3.6 เมตร และขนาดของฐานรากเสาเข็มหนา 1.5 เมตร สำหรับการจำลองการขุดเจาะอุโมงค์จะสอบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยผลการตรวจวัดจริงในสนาม โดยการจำลองผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเสาเข็มเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ของ MRT Singapore จะพิจารณาจากอุโมงค์ทางใต้ (SB) และผลกระทบของเสาเข็มต้นที่หนึ่ง (Pile 1, ดังแสดงในรูปที่ 5) เท่านั้น ในการศึกษานี้อ้างอิงแบบจำลองไฟไนต์เอลิมเมนต์จากกรณีศึกษาของ MRT Singapore โดยพารามิเตอร์จะถูกอ้างจากวิจัยก่อนหน้านี้ [22] และนำวิธีการจำลองมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ได้จำลองปัญหา 3 มิติ ให้อยู่ในแบบจำลอง 2 มิติ เนื่องจากระเวลาในการคำนวณต่อครั้ง จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการจำลองผลกระทบของการขุดเจาะอุโมงค์ต่อเสาเข็มข้างเคียงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ ให้ผลลัพธ์สำหรับการเคลื่อนตัวในแนวแกนดิ่ง การเคลื่อนตัวด้านในแนวแกนราบ แรงแนวแกนภายในเสาเข็ม และโมเมนต์ดัดของเสาเข็มที่ไม่เท่ากับผลตรวจวัดจริงในสนาม แต่แนวโน้มมีความสอดคล้องกับผลตรวจวัดจริงและงานวิจัยในอดีต [1, 22, 23] ดังนั้น ในการศึกษานี้ได้นำวิธีการจำลองเสาเข็มจากกรณีศึกษานี้มาประยุกต์ใช้ในปัญหาต่อไป สำหรับการสอบเทียบการจำลองการขุดเจาะอุโมงค์ในปัญหาผลกระทบจากการขุดเจาะอุโมงค์ต่อเสาเข็มข้างเคียงเมื่อพิจารณาถึงความแปรปรวนของดินจะทำการวิเคราะห์โดยการสอบเทียบระหว่างการทรุดตัวที่ผิวดินจากผลการตรวจวัดจริงในสนามของ MRT Blue Line [24] และผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจากการประยุกต์ใช้การลดทอน β ที่มีค่าเท่ากับ 29%

ตารางที่ 4 กรณีศึกษาที่ใช้ในการตรวจสอบอิทธิพลของระดับความผันผวนของพารามิเตอร์ s_{u}

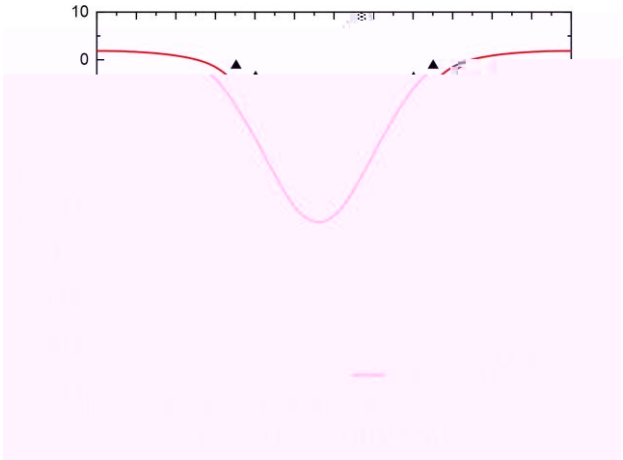
กรณีศึกษา	(δ_x, δ_y)	COV ของ s_{u}		
		SOC	MC	SC
กรณีที่ 1	(10,2)	0.68	0.43	0.54
กรณีที่ 2	(20,2)	0.68	0.43	0.54
กรณีที่ 3	(40,2)	0.68	0.43	0.54
กรณีที่ 4	(10,4)	0.68	0.43	0.54
กรณีที่ 5	(10,8)	0.68	0.43	0.54



รูปที่ 5 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกรณีศึกษา MRT Singapore [22]

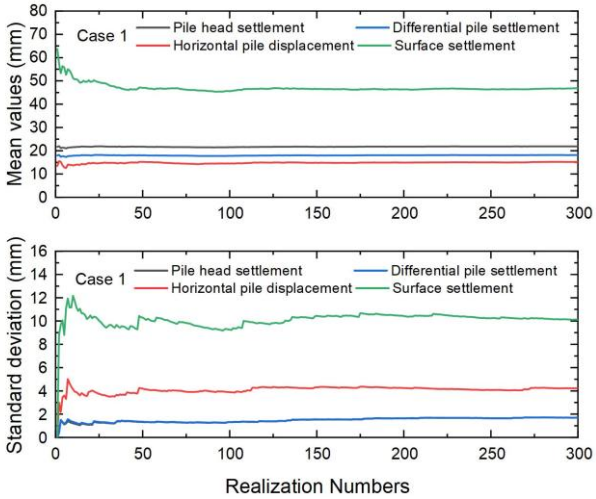


รูปที่ 6 ผลการสอบเทียบการตอบสนองของเสาเข็มเนื่องจากการขุดอุโมงค์ระหว่างผลตรวจวัดจริงและผลลัพธ์ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ [1, 22, 23]



รูปที่ 7 ผลการสอบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินเนื่องจากจากการขุดอุโมงค์ระหว่างผลตรวจวัดจริงในสนามและผลลัพธ์ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ [24]

ซึ่งพิจารณาจากการทรุดตัวของดินที่มากที่สุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ตรวจวัดได้อย่างชัดเจน และมีความคลาดเคลื่อนจากสิ่งรบกวนน้อยที่สุด ในทางปฏิบัติ พื้นที่ด้านบนของแนวอุโมงค์มักเป็นบริเวณที่ไม่มีการจราจร จากรูปที่ 7แสดงให้เห็นได้ว่าให้ผลลัพธ์การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลที่ค้อนข้างสอดคล้องกับผลการตรวจวัดจริงในสนาม



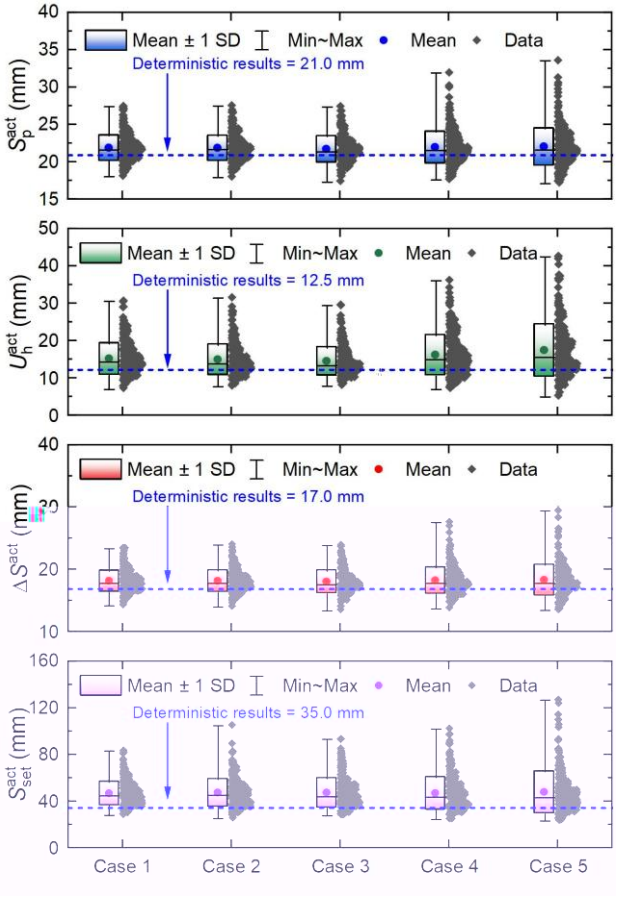
รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเสียรูปของเสาเข็มและการทรุดตัวของผิวดินตามจำนวนรอบการจำลอง

3.2 การลู่เข้าของค่าเฉลี่ยการเสียรูปของเสาเข็มและจำนวนการวิเคราะห์ที่เหมาะสม

ในการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่ม การเลือกจำนวนการวิเคราะห์ที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์โอกาสในการวิบัติ ถ้าหากจำนวนรอบของการวิเคราะห์มีจำนวนที่น้อยเกินไปก็จะสามารถส่งผลให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือที่ต่ำ ในขณะเดียวกันหากจำนวนรอบที่มากเกินไปก็มักจะส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นานมากเกินความจำเป็น รูปที่ 8 แสดงการลู่เข้าของค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของทุกสถานะขีดจำกัดสำหรับกรณีศึกษาที่หนึ่ง โดยที่ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยและ SD เริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่จำนวนรอบการวิเคราะห์ที่ 250 แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อเพิ่มความเชื่อน่าเชื่อถือของผลลัพธ์การวิเคราะห์ การศึกษานี้จึงได้กำหนดจำนวนรอบการวิเคราะห์ทั้งหมดไว้ที่ 300 รอบ

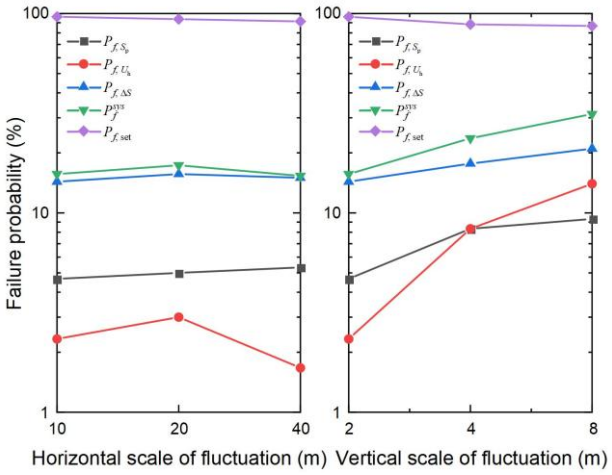
3.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนดและแบบสุ่ม

รูปที่ 9 แสดงค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม ($S_{\mathrm{p}}^{\mathrm{act}}$) การเคลื่อนตัวในแนวราบ ($U_{\mathrm{h}}^{\mathrm{act}}$) ความแตกต่างของการทรุดตัวระหว่างเสาเข็ม (ΔS^{act}) และการทรุดตัวของผิวดิน ($S_{\mathrm{set}}^{\mathrm{act}}$) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี SFEM และ DFEM โดยผลการวิเคราะห์พบว่า แม้ว่าค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ดินที่ใช้ของ SFEM และ DFEM จะเท่ากัน แต่ก็ไม่สามารถตีความจากผลได้โดยตรง เนื่องจากอิทธิพลของการจำลองสนามสุ่ม (Random Field) ซึ่งไม่สามารถทราบค่าที่แน่ชัดได้ และเป็นไปได้ในการสุ่มมีโอกาสที่ทำให้ค่าที่ได้ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยและส่งผลให้ผลลัพธ์มากกว่า DFEM สำหรับการกระจายตัวของผลลัพธ์ที่สูงขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยระดับความผกผัน (Scale of Fluctuation) ในกรณีที่ความผกผันเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการกระจายตัวที่มากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีศึกษาที่สี่และห้า เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าระดับความผันผวนในแนวดิ่งอาจส่งผลทำให้สมบัติดินมีความต่อเนื่องกันมากขึ้นในแนวลึก ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับการถ่ายแรงของเสาเข็มพฤติกรรม



รูปที่ 9 การเสียรูปของเสาเข็มและการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดอุโมงค์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนดและแบบสุ่ม

เช่นนี้อาจส่งผลให้เสาเข็มแต่ละต้นฝังอยู่ในชั้นดินที่มีลักษณะค่อนข้างคล้ายกัน (สมบัติดินใกล้เคียงกัน)ตลอดแนวความยาว หากชั้นดินดังกล่าวมีความแข็งแรงต่ำ อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรับแรงของเสาเข็มลดลงทั้งต้น นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี SFEM สามารถสะท้อนถึงความไม่แน่นอนของพฤติกรรมเสาเข็มที่เกิดขึ้นได้ สำหรับการวิเคราะห์โอกาสในการวิบัติในการศึกษานี้ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 10 ซึ่งแสดงค่า P_{f,S_p}, P_{f,U_h}, $P_{f,\Delta S}$ และ $P_{f,\text{set}}$ ในแต่ละกรณีศึกษา พบว่าการเปลี่ยนแปลงของระดับความผันผวนในแนวดิ่งส่งผลต่อโอกาสในการวิบัติของเสาเข็มมากกว่าระดับความผันผวนในแนวราบอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์แบบ P_f^{sys} พบว่าค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติแบบระบบองค์รวมให้ผลลัพธ์ที่สูงกว่าการพิจารณาแต่ละเป้าหมาย ซึ่งวิธีการนี้สะท้อนถึงข้อจำกัดของการวิเคราะห์โดยพิจารณาแต่ละเป้าหมายที่ไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมร่วมกับของโครงสร้างโดยรวมของระบบได้ นอกจากนี้ ความน่าจะเป็นของการทรุดตัวที่ผิวดินที่มีโอกาสเกิดการทรุดตัวที่มากกว่าสถานะขีดจำกัดที่ถูกกำหนดไว้มากกว่าถึง 85% เนื่องจากการกำหนดเกณฑ์ความเสี่ยงที่ยอมรับได้จาก DFEM และ SFEM พิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดิน ทำให้เกิดการกระจายของสมบัติดินในแต่ละองค์ประกอบ (element) โดยเฉพาะบริเวณรอบอุโมงค์ที่มีโอกาสเกิด “ชั้นดินอ่อนเฉพาะจุด” ซึ่งนำไปสู่การทรุดตัวของผิวดินที่สูงกว่า



รูปที่ 10 อิทธิพลของระดับความผันผวนในแต่ละแนวแกนต่อโอกาสการวิบัติของการเสียรูปของเสาเข็มและการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดอุโมงค์

กรณีเฉลี่ย ซึ่งผลลัพธ์นี้สามารถสะท้อนให้เห็นอย่างชัดเจนว่าผิวดินเป็นบริเวณที่ไวต่อพฤติกรรมการขุดเจาะอุโมงค์และมีความเสี่ยงที่จำเป็นต้องคำนึงในทางปฏิบัติ ดังนั้น ในการวิเคราะห์ควรพิจารณาถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินและเมื่อต้องคำถึงถึงโครงสร้างของอาคารโดยรวมควรพิจารณาโอกาสในการวิบัติแบบองค์รวมมากกว่าการพิจารณาแต่ละเป้าหมาย

4. บทสรุป

การศึกษานี้นำเสนอแนวทางการประเมินผลกระทบของการขุดเจาะอุโมงค์ต่อเสาเข็มฐานรากของอาคารข้างเคียง โดยพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่ม (Stochastic Finite Element Method, SFEM) และเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเชิงกำหนด (Deterministic Finite Element Method, DFEM) ที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรมทั่วไป จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แม้จะมีขนาดของสนามสุ่มเชิงพื้นที่เท่ากัน แต่ทิศทางของระดับความผันผวนส่งผลต่อพฤติกรรมเสาเข็มแตกต่างกัน โดยระดับความผันผวนในแนวดิ่งมีอิทธิพลต่อการถ่ายแรงของเสาเข็มโดยตรง ซึ่งส่งผลต่อการเสียรูปและความสามารถในการรับแรงของเสาเข็มอย่างมีนัยสำคัญ
2. การวิเคราะห์เชิงกำหนด (DFEM) ที่คำนึงถึงสมบัติดินจากค่าเฉลี่ยยังให้ค่าประเมินในแง่ต่าง ๆ ต่ำกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบสุ่ม (SFEM) ในบางกรณีอาจต่ำกว่า 85% ของ SFEM ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นในบริบทที่มีความไม่แน่นอนสูงของสมบัติดิน
3. การวิเคราะห์โอกาสการวิบัติแบบระบบองค์รวม แสดงให้เห็นถึงความเสี่ยงโดยรวมที่สูงกว่าโอกาสการวิบัติในแต่ละเป้าหมาย ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมของเสาเข็มในลักษณะของระบบได้อย่างครอบคลุมมากขึ้นและเหมาะสมต่อการประเมินความน่าเชื่อถือของฐานรากภายใต้สภาวะการขุดอุโมงค์ที่มีความไม่แน่นอนของสมบัติดินสูง
4. โอกาสการทรุดตัวของผิวดินเมื่อคำนึงถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่แสดงให้เห็นว่ามีการทรุดตัวผิวดินด้วยวิธี SFEM ให้ผลลัพธ์ที่มากกว่าการวิเคราะห์โดย DFEM ซึ่งการทรุดตัวของผิวดินนี้ส่งผลให้ดินรอบ

อุโมงค์เกิดการเคลื่อนตัวและส่งผลต่อการรับแรงของเสาเข็มและการเอียงตัวของโครงสร้างด้านบนเสาเข็ม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับสนับสนุนทุนวิจัยผ่านทุนวิจัยมูลฐาน ปีงบประมาณ 2568 ผ่านโครงการนวัตกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อการก่อสร้างอนาคตที่ยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

[1] Yensri, P., Kitiyodom, P., Asanprakit, A., Duangsano, O. and Phienwej, N. (2022). Assessment of tunnelling on existing pile foundations in Bangkok MRT orange line. *International Tunnelling and Underground Space Association (ITA-AITES) World Tunnel Congress* 2022 (*WTC*2022) *and* 47*th General Assembly Bella Center*, Copenhagen, Denmark, pp. 290-295.

[2] Chen, S., Guo, P., Ma, J., Li, X., Lin, H., Zhao, Y. and Wang, Y. (2022). Soil heterogeneity effects on bridge piles deformation under shield tunnelling disturbance. *Sustainability*, 14, pp. 16854.

[3] Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, pp. 612-624.

[4] Cheng, H., Chen, J. and Li, J. (2019). Probabilistic analysis of ground movements caused by tunneling in a spatially variable soil. *International Journal of Geomechanics*, 19, pp. 04019125.

[5] Peck, B. (1969). Deep excavation and tunnelling in soft ground, State of the art volume. *Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundations (7th ICSMFE)*, Mexico City, pp. 225-290.

[6] Jongpradist, P., Kaewsri, T., Sawatparnich, A., Suwansawat, S., Youwai, S., Kongkitkul, W. and Sunitsakul, J. (2013). Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundations by numerical analyses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 34, pp. 96-109.

[7] Phutthananon, C., Lertkultanon, S., Jongpradist, P., Duangsano, O., Likitlersuang, S. and Jamsawang, P. (2023). Numerical investigation on the responses of existing single piles due to adjacent twin tunneling considering the lagging distance. *Underground Space*, 11, pp. 171-188.

[8] Gu, X., Chen, F., Zhang, W., Wang, Q. and Liu, H. (2022). Numerical investigation of pile responses induced by adjacent tunnel excavation in spatially variable clays. *Underground Space*, 7, pp. 911-927.

[9] Gouw, T.L. (2014). Common mistakes on the application of Plaxis 2D in analyzing excavation problems. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9, pp. 8291-8311.

[10] Likitlersuang, S., Surarak, C., Suwansawat, S., Wanatowski, D., Oh, E. and Balasubramaniam, A. (2014). Simplified finite-element modelling for tunnelling-induced settlements. *Geotechnical Research*, 1, pp. 133-152.

[11] Sluis, J.J.M. (2012). *Validation of embedded pile row in PLAXIS 2D*. Master's Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.

[12] Nguyen, T.S., Ngamcharoen, K. and Likitlersuang, S. (2023). Statistical characterisation of the geotechnical properties of Bangkok subsoil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, pp. 2043-2063.

[13] Huang, J. and Griffiths, D.V. (2015). Determining an appropriate finite element size for modelling the strength of undrained random soils. *Computers and Geotechnics*, 69, pp. 506-513.

[14] Nguyen, T.S. and Likitlersuang, S. (2021). Influence of the spatial variability of soil shear strength on deep excavation: A case study of a Bangkok underground MRT station. *International Journal of Geomechanics*, 21, pp. 04020248.

[15] Lueprasert, P., Jongpradist, P., Jongpradist, P. and Suwansawat, S. (2017). Numerical investigation of tunnel deformation due to adjacent loaded pile and pile-soil-tunnel interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70, pp. 166-181.

[16] Building Authority Construction, (2021) *Framework on Performance Based Impact Assessment Associated with Earth Retaining or Stabilising Structures ("ERSS") and Tunnelling Works*. Building and Construction Authority, pp. 7-25.

[17] The Canadian Geotechnical Society, (2006) *Canadian Foundation Engineering Manual (CFEM) 4th Edition*. The Canadian Geotechnical Society, pp. 1-485.

[18] Korff, M., (2009) *Deformations and Damage to Buildings Adjacent to Deep Excavations in Soft Soils*. Deltares, pp. 103.

[19] NEN, (2006) *NEN*6740 – *Geotechnics – TGB* 1990 - *Basic requirements and loads*. Netherlands Standards, pp. 1-98.

[20] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Dias, D., Guo, X., Jamsawang, P. and Baroth, J. (2022). Reliability-based settlement analysis of embankments over soft soils reinforced with T-shaped deep cement mixing piles. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16, pp. 638-656.

[21] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Kandavorawong, K., Dias, D., Guo, X. and Jamsawang, P. (2023). Reliability assessment for serviceability limit states of stiffened deep cement mixing column-supported embankments. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15, pp. 2402-2422.

[22] Pang, C.H. (2006). *The Effect of Tunnel Construction on Nearby Pile Foundations*. Ph.D. Thesis, National University of Singapore, Singapore.

[23] Yensri, P., Faramarzi, A. and Metje, N. (2024). Evaluation of the induced axial force behaviour for bored tunnel construction adjacent to existing long piles. *XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVIII ECSMGE* 2024), Lisbon, Portugal, 26-30 August 2024, pp. 2031-2036.

[24] 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 Techonology, United States.