

อิทธิพลของวิธีการวิเคราะห์ต่อการประเมินการทรุดตัวของอาคาร จากการขุดอุโมงค์ข้างเคียง

Influence of analysis method on evaluation of building settlement due to neighboring tunnel construction

อาทิตย์ ฉายอรุณ¹ ประทีป หลือประเสริฐ² พรเกษม จงประดิษฐ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การก่อสร้างอุโมงค์ในเขตเมืองส่งผลต่อการทรุดตัวของอาคารข้างเคียงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อวางแผนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างอาคารอย่างเหมาะสม การประเมินผลกระทบดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างยิ่ง มีวิธีเชิงวิศวกรรมที่ใช้ในการประเมินการทรุดตัวของอาคารจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงหลายวิธี โดยแต่ละวิธีมีระดับความซับซ้อนและให้ผลการประเมินที่แตกต่างกันทั้งในเชิงพฤติกรรมและขนาดของการทรุดตัว การศึกษานี้เปรียบเทียบและอภิปรายผลประเมินค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์ 4 วิธี ประกอบด้วย 1) เส้นโค้งการทรุดตัวด้วยสมการ Gaussian curve 2) วิธีจำลองการก่อสร้างอุโมงค์แบบ Greenfield โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) 3) วิธีการจำลองโดย FEM แบบมีเสาเข็มของโครงสร้าง 4) วิธีการจำลองโดย FEM แบบมีเสาเข็มโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ โดยพิจารณาการทรุดตัวของเสาเข็มทั้งในแนวหน้าตัดขวางและตามยาว ผลการวิเคราะห์บ่งบอกวิธีที่ซับซ้อนที่สุดซึ่งใช้แบบจำลองเสาเข็มภายใต้แรงกระทำเหมาะสมในทุกกรณี เนื่องจากให้ค่าการทรุดตัวที่เสาเข็มมากที่สุดในการตรวจวัดทั้งในแนวหน้าตัดขวางและตามยาว แต่วิธีอื่นอาจใช้ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแนวเสาเข็มกับอุโมงค์ว่าอยู่ในขอบเขตวิกฤติหรือไม่

คำสำคัญ : อุโมงค์ในดินอ่อน, การวิเคราะห์เชิงตัวเลข, ปฏิสัมพันธ์, ไฟไนต์เอลิเมนต์, โครงสร้างเสาเข็ม

Abstract

In dense urban areas, the tunnel construction close to the existing buildings becomes unavoidable. The excavation affects settlements of the buildings and may cause structural damage. Therefore, proper evaluation of this impact is necessary. In the current engineering practice, there are various methods with different degree of complexity to compute the building settlements due to adjacent tunneling. Each method provides different results in terms of both settlement magnitude and behavior. This study compares and discusses the computed results of pile settlements due to nearby tunneling from four different analysis methods. These includes 1) green field settlement prediction using Gaussian curve; 2) green field settlement by finite element method (FEM); 3) settlement of piles embedded in ground by FEM and 4) settlement of piles under loading by FEM. The results indicated that the most complicated method which considers the piles under loading provides satisfactory behavior and results as the pile settlements in transverse and longitudinal directions become maximum. However, simpler methods may be used, depending on the relative position between the tunnel and pile.

Keywords : Tunnel excavation, Numerical analysis, Interaction, Finite element, Pile supported structure

1. บทนำ

การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [1] ดังนั้นการประเมินผลกระทบจึงมีความสำคัญ การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์มีสาเหตุมาจากการสูญเสียมวลดิน จากการที่มวลดินรอบอุโมงค์เคลื่อนตัวเข้าสู่ช่องเปิดขณะทำการขุดเจาะจากปัจจัยต่าง ๆ [2]

การประเมินความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อที่จะสามารถวางแผนหาวิธีป้องกันความเสียหายที่จะเกิด จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [3] ได้ทำการประเมินและแบ่งระดับความเสียหายของโครงสร้างโดยใช้การเคลื่อนตัวของอาคารมาใช้เป็นตัวชี้วัดที่ทำให้เกิดความเสียหาย เช่น ความเครียดในแนวราบและมุมบิด (Distortional angularity) ขององค์อาคาร ด้วยแนวคิดดังกล่าว ค่าการเปลี่ยนแปลงหลักของอาคารที่สามารถตรวจวัดได้ในทางปฏิบัติและนิยมนำมาใช้ประเมินความเสี่ยงต่อการเสียหายของอาคารต่อไปคือค่าการทรุดตัวของอาคารในแต่ละตำแหน่งเสา ที่ผ่านมาในทางปฏิบัติสมมติฐานที่สำคัญคือถือว่า ณ ตำแหน่งดังกล่าวการทรุดตัวเท่ากับผิวดิน วิธีการประเมินการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้สมการอย่างง่าย (Empirical solution) จึงนำมาใช้ในการประเมินเบื้องต้น วิธีนี้พัฒนาโดยรวบรวมข้อมูลตรวจวัดทั้งขนาดและรูปร่างการเคลื่อนตัวของดินบริเวณที่ทำการก่อสร้าง โดยใช้ปัจจัยและความสัมพันธ์ที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ เช่น ขนาดอุโมงค์, การสูญเสียมวลดินระหว่างขุดเจาะ และความลึกในการขุดเจาะเป็นต้น โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ เช่น สมการ Gaussian หรือแผนภูมิความน่าจะเป็นปกติ [4] โดยสร้างสมการฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนรูปร่างการเคลื่อนตัวของดินในแนวดิ่ง และด้านข้างของแต่ละความลึกของอุโมงค์

การประเมินการเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ซึ่งสามารถจำลองการปฏิสัมพันธ์ของโครงสร้างรวมถึงพฤติกรรมของวัสดุได้สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูง แบบจำลอง FEM

แบบเต็มรูปแบบ จำเป็นต้องจำลองโครงสร้างทั้งหมดในการวิเคราะห์ซึ่งมีความซับซ้อนสูง เพื่อลดความซับซ้อนดังกล่าว วิธีการจำลองอย่างง่ายโดยเลือกตัวแทนของโครงสร้างบางส่วนของปัญหาวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวของชั้นดิน โดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธี คือ 1. การวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวของดินโดยประเมินจากการจำลองการก่อสร้างอุโมงค์เพียงอย่างเดียว (Greenfield condition) เช่น งานวิจัยของ Bilotta et.al (2017) [5] ได้ประเมินค่าการเลี้ยวรูปของโครงสร้างข้างเคียง โดยใช้ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการจำลองการขุดอุโมงค์ในลักษณะดังกล่าวผ่านอาคารเก่า 2. การลดแบบจำลองของโครงสร้างข้างเคียงโดยใช้ตัวแทน เช่น การจำลองโครงสร้างอาคารโดยใช้วิธีการใส่แรงบนชิ้นส่วนแบบแผ่นบาง (Plate element) เพื่อดูอิทธิพลของน้ำหนักของโครงสร้างต่อการจำลอง [6]

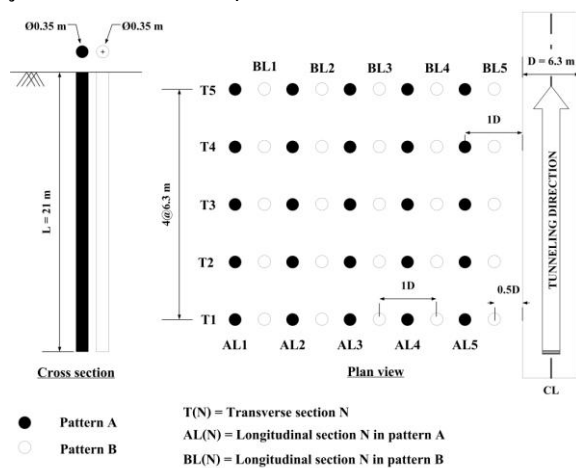
อย่างไรก็ตามงานดังกล่าวข้างต้นเป็นการพิจารณาอาคารที่มีฐานรากแบบตื้น จึงเป็นที่น่าสนใจว่าในพื้นที่ดินอ่อนซึ่งโครงสร้างมีฐานรากระบบเสาเข็ม การประเมินการเคลื่อนตัวของดินโดยการจำลองอย่างง่ายดังที่กล่าวมา จะให้ผลที่น่าเชื่อถือเพียงใด นอกจากนั้นมีการนำเสนอการจำลองที่ใช้เสาเข็มรับแรงจากน้ำหนักของโครงสร้างแทนการจำลองโครงสร้างอาคารทั้งหมด เพื่อตรวจสอบถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างจากอิทธิพลการก่อสร้างอุโมงค์ในกรณีนี้ด้วย [7]

การศึกษานี้ทำการประเมินการทรุดตัวของดินหรือเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์อย่างง่ายและการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยรูปแบบต่างกัน และเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ผิวดินและที่เสาเข็ม ทั้งในแนวดัดขวางและแนวยาว พร้อมทั้งอภิปรายข้อจำกัดของแต่ละวิธี

2. กรณีศึกษา

การศึกษานี้อ้างอิงกรณีต้นแบบโดยใช้ข้อมูลจากโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน (MRT Blue line) ในพื้นที่กรุงเทพ บริเวณสถานีอิสรภาพ ซึ่งอุโมงค์วางตัวอยู่ที่ความลึก 26.25 เมตร ในชั้นดินเหนียวแข็ง โดยระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ 1.3 เมตรจากผิวดิน วิธีการประเมินค่าการทรุดตัวของดินหรือหัวเสาเข็มจากการก่อสร้างอุโมงค์ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย 2 วิธีหลัก คือ การใช้สมการ

Gaussian curve (EQ) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พิจารณาแบบจำลองที่มีความซับซ้อนแตกต่างกัน 3 ระดับ ระดับ 1 เป็นการจำลองการก่อสร้างอุโมงค์โดยไม่พิจารณาการมีอยู่ของโครงสร้างใดๆ (Greenfield condition, FEM-G) ระดับ 2 และ 3 เป็นการจำลองการก่อสร้างอุโมงค์และการมีอยู่ของเสาเข็มของโครงสร้างข้างเคียงแบบไม่มีแรงกระทำที่หัวเสาเข็ม (FEM-P) และรับแรงกระทำ (FEM-PF) ตามลำดับ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มสัมผัสกับแนวอุโมงค์ โดยรูปแบบการวางตัวของเสาเข็มแบ่งเป็น 2 กรณี คือ รูปแบบ A และ B ดังรูปที่ 1 โดยระยะห่างของเสาเข็มแถวแรกจากอุโมงค์เท่ากับ 1D และ 0.5D ตามลำดับเมื่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์



รูปที่ 1 มุมมองด้านบนของตำแหน่งเสาเข็มในการจำลอง

3. การวิเคราะห์

3.1 สมการทำนายการทรุดตัวของดิน

การศึกษานี้เลือกใช้สมการ Gaussian curve ของ Loganathan และ Poulos [4] ดังแสดงในสมการที่ 1

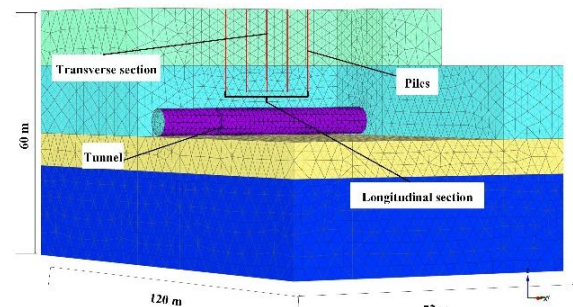
$$U_{(z=0)} = 4(1-\nu)D^2 \frac{H}{H^2 + x^2} \frac{4gD + g^2}{D^2} \exp\left[-\frac{(1.38x^2)}{(H+R)^2}\right] \quad (1)$$

โดยค่า Gap parameter (g) จากการสอบเทียบกับผลตรวจวัดในสนามมีค่าเท่ากับ 0.2 %

3.2 โครงข่ายแบบจำลอง (Finite element meshes)

การศึกษานี้ใช้รูปแบบจำลองสามมิติ (3D-FE model) โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 3D เวอร์ชัน 2016 ประกอบด้วยอุโมงค์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 6.3 เมตร พนักอุโมงค์หนา 0.3 เมตร เสาเข็มแบบกลมตันขนาดเส้น

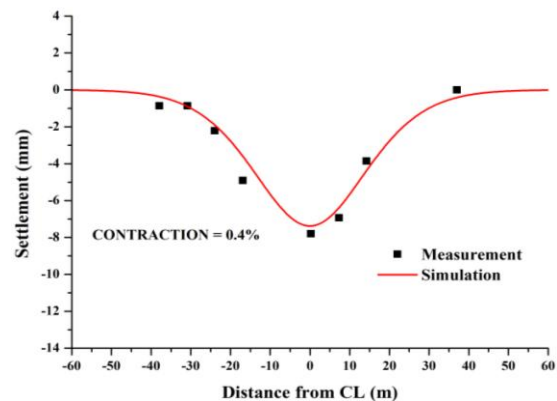
ผ่านศูนย์กลาง 0.35 เมตร ยาว 21 เมตร มีกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยเท่ากับ 270 kN แบบจำลองมีความกว้างเท่ากับ 120 เมตร ($\approx 20D$) ยาว 72 เมตร ($\approx 10D$) และลึก 60 เมตร ($\approx 10D$) ดังรูปที่ 2 ชั้นดินและพนักอุโมงค์จำลองโดยใช้ชิ้นส่วน (Element) ทรงปริซึมรูปสามเหลี่ยม เสาเข็มใช้ชิ้นส่วนแบบ Embedded pile element



รูปที่ 2 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์เป็นแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain analysis) โดยมีเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ให้บริเวณขอบด้านหน้า ด้านข้าง และด้านหลัง ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวราบ แต่ให้เคลื่อนที่ในแนวตั้งได้อย่างอิสระ ส่วนขอบด้านล่างกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง และน้ำใต้ดินมีความดันน้ำสถิต (Hydrostatic pressure)

ก่อนทำการศึกษาก็ได้ปรับเทียบค่าสูญเสียมวลดินให้พฤติกรรมทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับผลการตรวจวัดจากงานจริง ซึ่งได้จากโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย เพื่อผลที่ได้จากการจำลองสามารถสะท้อนถึงพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้นจริงได้ใกล้เคียงมากที่สุด ดังรูปที่ 3 ซึ่งค่าการสูญเสียมวลดินที่ใช้ในแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 0.4%



รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของดินระหว่างการตรวจวัดจริงกับการวิเคราะห์

3.3 ขั้นตอนการจำลอง

ขั้นตอนการจำลองเพื่อประเมินค่าการเคลื่อนตัวของดิน และค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ 1. ขั้นตอนการจำลองสภาพเริ่มต้น โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 3 กรณี คือ กรณีไม่มีเสาเข็ม มีเสาเข็มรับแรงและไม่รับแรง ซึ่งการจำลองเสาเข็มจะไม่พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้าง (Wish-in-place) ขั้นตอนที่ 2 คือ การจำลองขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์แบบหัวเจาะปรับแรงดันดินสมดุล (EPB shield method) ซึ่งเป็นไปตามคำแนะนำจากคู่มือโปรแกรม [8]

3.4 คุณสมบัติของวัสดุ

งานวิจัยเลือกใช้แบบจำลอง Hardening Soil Model (HS) ค่าคุณสมบัติแบบ HS แสดงดังตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่รับมาจากการศึกษาท่อน้ำ [9] ที่หาค่ามาจากการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการโดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และผลการทดสอบในสนามของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน โดย Prust et al. (2009) [10] ซึ่งผลการวิเคราะห์งานอุโมงค์ [9] และปัญหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์กับเสาเข็ม [11, 12] ในการศึกษาที่ผ่านมาด้วยแบบจำลอง HS นี้และพารามิเตอร์ชุดดังกล่าวสะท้อนถึงพฤติกรรมของชั้นดินในเขตกรุงเทพฯ ได้อย่างสอดคล้อง ในส่วนของโครงสร้างผนังอุโมงค์และเสาเข็มจะกำหนดคุณสมบัติเป็นแบบอีลาสติคเชิงเส้นดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 Hardening soil parameters

Soil layer	Soft clay	1 st Stiff	Sand	2nd Stiff
Model	HS	HS	HS	HS
Depth, m	-13	-30	-38	-60
E_{50}^{ref} , kN/m ²	5,000	60,000	60,000	65,000
E_{oed}^{ref} , kN/m ²	5,000	60,000	60,000	65,000
E_{ur}^{ref} , kN/m ²	15,000	180,000	180,000	650,000
γ_{sat} , kN/m ³	16	18	20	22
ν'	0.33	0.33	0.3	0.33
ϕ , degree	22	22	33	22
C, kN/m ²	5	18	0	23
M	1	1	0.5	0.8
p_{ref} , kN/m ²	100	95	100	100

ตารางที่ 2 Elastic material parameters

Model	E kN/m ²	ν -	γ kN/m ²
Bored pile	3.0×10^7	0.2	24
Lining	2.8×10^7	0.2	24

3.5 กรณีและเงื่อนไขการวิเคราะห์

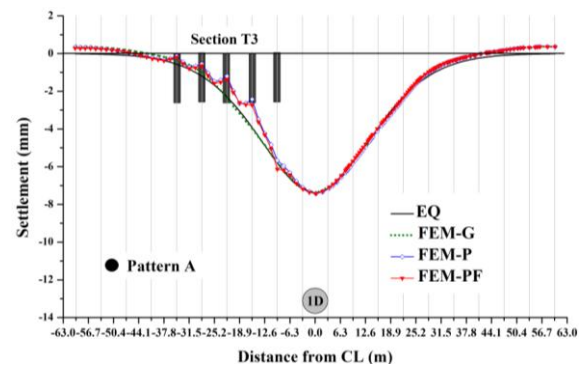
ดังที่ได้อธิบายในส่วนก่อนหน้านี้ การศึกษานี้ให้ความสนใจกับผลการวิเคราะห์การทรุดตัวจากวิธีต่างๆ 4 วิธี กับฐานรากเสาเข็ม 2 รูปแบบ กรณีการวิเคราะห์ทั้งหมดจึงมี 8 กรณีดังแสดงในตารางที่ 3

ตัวแปร	กรณี
วิธีวิเคราะห์	EQ, FEM-G, FEM-P, FEM-PF
รูปแบบฐานราก	Pattern A, Pattern B

4. ผลการวิเคราะห์

4.1 การทรุดตัวตามขวาง (Transverse Settlement)

การทรุดตัวตามขวางตรวจสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแบบจำลองหลังจากการขุดอุโมงค์ได้ผ่านขอบเขตที่ศึกษาไปแล้วให้แทนกรณีการก่อสร้างอุโมงค์เสร็จสิ้นแล้ว ซึ่งค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าสูงสุด



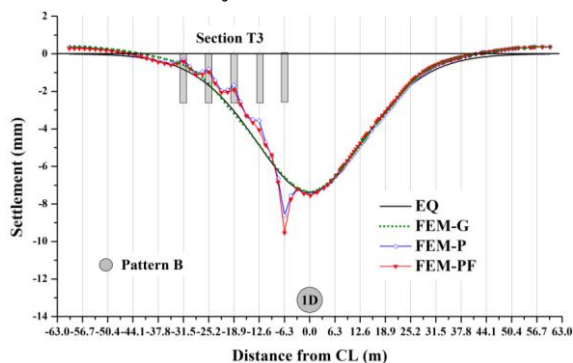
รูปที่ 4 ผลการทรุดตัวแนวขวางของการจำลองเสาเข็ม

รูปแบบ A ณ ตำแหน่งกลางโครงสร้าง

กรณีเสาเข็มที่ใกล้ที่สุดอยู่ห่าง ID (รูปแบบ A) จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าลักษณะของโค้งการทรุดตัวที่ได้จากทั้ง 4 วิธีจะมีลักษณะคล้ายกัน คือ ค่าการทรุดตัวสูงสุดมีขนาดใกล้เคียงกัน ลักษณะเส้นโค้งการทรุดตัวที่ได้จากวิธีสมการคล้ายกับวิธี FEM แบบ Greenfield (FEM-G) เมื่อพิจารณาด้านที่มีแบบจำลองเสาเข็ม ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มแถวที่ 2-4 ที่ได้จากวิธี FEM ทั้งกรณีเสาเข็มไม่รับแรงกระทำ (FEM-P) และ

กรณีเสริมรับแรงกระทำ (FEM-PF) น้อยกว่าการจำลองแบบ FEM-G และการใช้สมการ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากเสาเข็มขวางการเคลื่อนตัวของดิน จึงทำหน้าที่ช่วยรับแรง ดังนั้น หากนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ FEM-G และการใช้สมการไปพิจารณาค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันของเสาเข็ม (โดยเฉพาะแถวที่ 1 กับแถวที่ 2) ที่แสดงถึงมุมบิดขององค์อาคาร จะทำให้ความเสียหายที่ประเมินได้มีค่าน้อยกว่าการใช้ค่าจากวิธี FEM-P กับ FEM-PF นอกจากนี้ เป็นที่น่าสังเกตว่าผลของวิธี FEM-P กับ FEM-PF มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเป็นนัยว่าไม่มีความจำเป็นต้องจำลองการรับแรงให้กับเสาเข็มในกรณีนี้ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าโดยละเอียดจะพบว่ากรณี FEM-PF ให้ค่ามากกว่าเล็กน้อย (รายละเอียดแสดงในรูปที่ 6)

รูปที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์กรณีเสาเข็มรูปแบบ B ซึ่งเสาเข็มต้นที่ใกล้กับอุโมงค์มากที่สุดอยู่ห่างแค่ 0.5D จากรูปเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งเสาเข็มต้นที่ใกล้อุโมงค์ที่สุด (แถวที่ 1) จากวิธีการจำลองแบบ FEM-P และ FEM-PF มีค่าการทรุดตัวมากกว่าการจำลองด้วยวิธี FEM-G และการใช้สมการ นอกจากนี้ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มมากกว่าการทรุดตัวของดินซึ่งแตกต่างกับกรณีก่อนหน้านี้ (เสาเข็มรูปแบบ A) เมื่อพิจารณาถึงขอบเขต



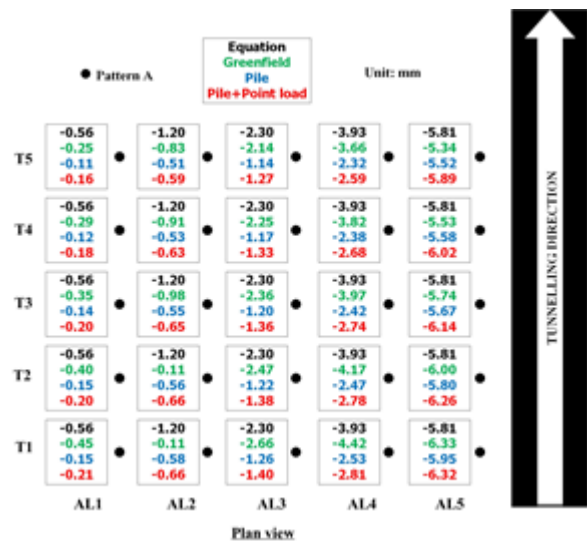
รูปที่ 5 ผลการทรุดตัวของแนววางของการจำลองเสาเข็ม

รูปแบบ B ณ ตำแหน่งกลางโครงสร้าง

อิทธิพลตามการศึกษาของ Jongpradist et.al (2013) [11] บ่งบอกว่าระยะห่างระหว่างอุโมงค์และปลายเสาเข็มที่อยู่ในขอบเขตวิกฤติ ซึ่งเป็นแนวเขตที่การขุดอุโมงค์จะทำให้เสถียรภาพของปลายเข็มสูญเสียไป เมื่อเสาเข็มอยู่ในเขตวิกฤติจึงต้องทรุดตัวเพิ่มเพื่อเข้าสู่เสถียรภาพใหม่ โดยขอบเขตวิกฤติสำหรับกรณีการก่อสร้างอุโมงค์ที่ความลึก

มากกว่าระดับปลายเสาเข็มในการศึกษานี้ มีระยะในแนวราบห่างจากเสาเข็มเป็น 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของผนังอุโมงค์

ในกรณีนี้ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากวิธี FEM-PF มีค่ามากกว่าวิธี FEM-P ดังนั้นการประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างด้วยการใช้ค่าการทรุดตัวจาก FEM-PF จะทำให้ค่าความเสี่ยงต่อการเสียหายอาคารมากที่สุด ดังนั้น นอกจากวิธีแบบ FEM-G และการใช้สมการจะให้ผลการประเมินที่ต่ำกว่าแล้ว การไม่พิจารณาแรงที่กระทำต่อเสาเข็มในกรณีนี้ให้ค่า การประเมินที่ต่ำกว่าด้วยเช่นกัน

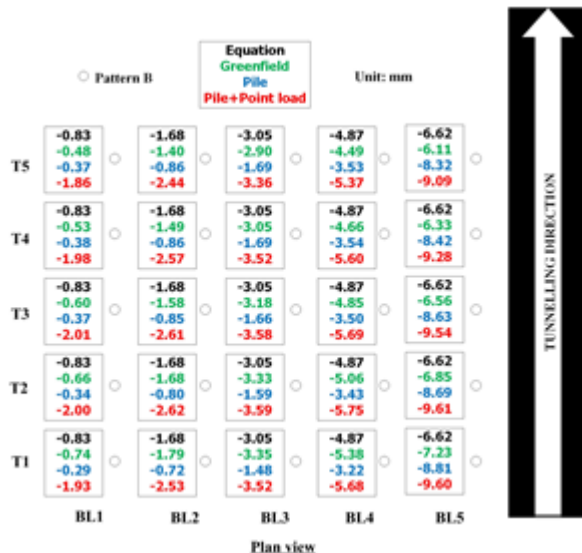


รูปที่ 6 การทรุดตัวของเสาเข็มจากการจำลองรูปแบบ A

รูปที่ 6 และ 7 แสดงค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็มทุกตำแหน่งจากแต่ละวิธีการประเมิน สำหรับการจำลองรูปแบบเสาเข็ม A และ B ตามลำดับเมื่อหัวเสาเข็มขุดผ่านเสาเข็มเรียบร้อยแล้ว ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มของวิธีสมการและการจำลองแบบ Greenfield นำมาจากการทรุดตัวของดินในแนววาง ณ ตำแหน่งหัวเสาเข็มจากการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ สำหรับวิธีสมการค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจะเท่ากันสำหรับเสาเข็มในแถวเดียวกันเนื่องจากวิธีการประเมินโดยสมการจะพิจารณาเพียงระยะนาบสองมิติ สำหรับกรณีการจำลองแบบ Greenfield เมื่อพิจารณาในแต่ละแถวของเสาเข็มพบว่าค่าการทรุดตัวที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเสาเข็มต้นแรกสุดของแถว ซึ่งเป็นอิทธิพลของการจำลองแบบ 3D

ค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็มกรณีรับแรงจะมากกว่ากรณีของเสาเข็มไม่รับแรง เมื่อพิจารณาการวางตัวของเสาเข็มรูปแบบ A ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มในแถวที่ใกล้อุโมงค์

มากที่สุดมีค่าใกล้เคียงกับวิธีสมการและการจำลองแบบ Greenfield แต่สำหรับเสาเข็มแถวที่ถัดออกมาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจะมีค่าน้อยกว่า สำหรับกรณีเสาเข็มรูปแบบ B ซึ่งเสาเข็มแถวที่ใกล้กับอุโมงค์มากที่สุด (แถวที่ 1) วางตัวอยู่ในแนวเขตวิกฤต การทรุดตัวของเสาเข็มจากวิธีการจำลองแบบเสาเข็มรับแรงจะมีค่ามากกว่าวิธีอื่นในทุก ๆ แถวของเสาเข็ม



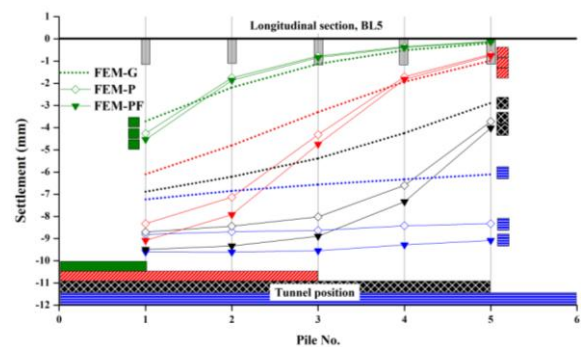
รูปที่ 7 การทรุดตัวของเสาเข็มจากการจำลองรูปแบบ B

จากผลการทรุดตัวของเสาเข็มดังกล่าว สามารถบ่งบอกได้ว่าการจำลองแบบเสาเข็มรับแรงซึ่งเป็นวิธีที่ซับซ้อนที่สุดเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดทั้งสองกรณี กรณีเสาเข็มอยู่นอกแนวเขตวิกฤต (รูปแบบ A) สามารถใช้วิธีการประเมินความปลอดภัยของโครงสร้างโดยใช้วิธีจำลองแบบเสาเข็มไม่รับแรงได้ และการจำลองแบบ Greenfield หรือสมการจะให้ผลที่ต่ำกว่าโดยเฉพาะระหว่างเสาเข็มแถวแรกและแถวที่สอง อย่างไรก็ตามกรณีที่เสาเข็มโครงสร้างวางตัวอยู่ในแนวเขตวิกฤต (รูปแบบ B) ควรใช้ค่าการทรุดตัวในกรณีการจำลองแบบเสาเข็มรับแรงซึ่งให้ค่าที่มากที่สุด

4.2 การทรุดตัวในแนวยาว (Longitudinal Settlement)

โดยที่การขุดอุโมงค์มีธรรมชาติเป็นปัญหาแบบ 3 มิติ การทรุดตัวของดิน (และส่งผลให้เสาเข็มทรุดตัว) เกิดขึ้นได้ทันทีที่การขุดอยู่ในช่วงบริเวณที่สนใจ ไม่จำเป็นที่หน้าตัดของการขุดต้องเลยไป การวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ให้ความสนใจต่อการทรุดตัวที่แตกต่างกันของเสาเข็มระหว่างแถว ในขณะที่การทรุดตัวที่แตกต่างกันของเสาเข็มในแถว

เดียวกันยังไม่ได้มีการพิจารณา ในที่นี้ให้ความสนใจต่อการทรุดตัวในแนวยาวของอุโมงค์ โดยพิจารณาจากระนาบของเสาเข็มรูปแบบ A ในแถวที่อยู่ใกล้ขอบอุโมงค์มากที่สุด (แถวที่ 1) ดังรูปที่ 8 พฤติกรรมการทรุดตัวเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของหัวเจาะอุโมงค์ โดยตำแหน่งที่หัวเจาะเข้าถึงเป็นตำแหน่งแรกจะมีขนาดการทรุดตัวมากที่สุด และขนาดการทรุดตัวจะลดลงในตำแหน่งตรวจวัดที่ถัดออกไป



รูปที่ 8 ผลการทรุดตัวแนวยาวของการจำลองเสาเข็มรูปแบบ A ที่ระยะ 3.15 เมตร (0.5D) จากขอบอุโมงค์

สำหรับกรณีการจำลองแบบ Greenfield ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งหัวเจาะเดียวกันจะมีค่าน้อยที่สุด พฤติกรรมการทรุดตัวของตำแหน่งเสาเข็มจะค่อย ๆ ทรุดลงเพื่อเข้าสู่ค่าการทรุดตัวสุดท้ายหรือค่าการทรุดตัวสูงสุด (เกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งหัวเจาะผ่านตำแหน่งเสาเข็มไปแล้ว, ตำแหน่งสีน้ำเงิน) ในส่วนของผลจากการจำลองแบบมีโครงสร้างเสาเข็มค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม ณ ตำแหน่งที่หัวเจาะเข้าถึงเป็นลำดับแรก จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าการทรุดตัวสุดท้าย ที่หัวขุดได้เจาะผ่านได้เสาเข็มนั้น ๆ ไปแล้ว

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าการทรุดตัวที่ต่างกัน จะมีขนาดมากที่สุดเมื่อหัวขุดได้ทำการขุดเจาะถึงตำแหน่งเสาเข็มต้นกลาง ซึ่งอาจบอกเป็นนัยว่าโครงสร้างอาจจะเกิดความเสียหายจากการทรุดตัวที่ต่างกันเมื่อตำแหน่งหัวเจาะอยู่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้าง

5. สรุป

การศึกษานี้ประเมินการทรุดตัวของดินและเสาเข็มโดยใช้วิธีสมการ (EQ) และการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยรูปแบบที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ การจำลองการก่อสร้างอุโมงค์เพียงอย่างเดียว (FEM-G) และการจำลองแบบมีเสาเข็มทั้งแบบไม่รับแรง (FEM-P) และรับแรง (FEM-PF)

เพื่อเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ผิวดินและเสาเข็ม ทั้งในแนวตั้งขวางและแนวยาว กับกลุ่มเสาเข็มรองรับอาคาร 2 แบบที่มีระยะของเสาเข็มแถวที่ใกล้อุโมงค์ที่สุด ห่างจากอุโมงค์ต่างกัน โดยรูปแบบ A ซึ่งห่างกว่าออกแบบให้เสาเข็มแถวที่ใกล้อุโมงค์ที่สุดไม่อยู่ในเขตอิทธิพล และ รูปแบบ B ซึ่งใกล้กว่าออกแบบให้อยู่ในเขตอิทธิพล โดยข้อสรุปที่ได้มีดังนี้

1) การจำลองการก่อสร้างอุโมงค์เพียงอย่างเดียว (FEM-G) ไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความเสี่ยงมากที่สุดเสมอไปสำหรับการนำมาใช้ในการพิจารณาผลกระทบการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีต่อเสาเข็ม เช่น กรณีที่เสาเข็มอยู่ในเขตอิทธิพล (รูปแบบ B)

2) ควรใช้วิธีการจำลองแบบมีเสาเข็มรับแรง (FEM-PF) ในการประเมินเพื่อให้ได้สภาพที่เสี่ยงที่สุด

3) การประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างเนื่องจากผลกระทบจากการก่อสร้างอุโมงค์ควรพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวของดินในแนวยาวร่วมด้วย ซึ่งระยะของหัวเจาะที่กึ่งกลางโครงสร้างให้ค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันสูงสุด

อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังไม่ได้นำระบบโครงสร้างเหนือดินมาร่วมพิจารณา ขณะนี้อยู่ในระหว่างการศึกษาและจะนำเสนอต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่สนับสนุนทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์ เลขที่ทุน CE-KMUTT-6311

7. เอกสารอ้างอิง

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

[2] P. Jongpradist and S. Suwansawat, "Ground response due to tunneling in soft ground and its impact to nearby existing structures," *EIT tunnel seminar*, 2017.

[3] B. M. D. Boscardin and E. J. Cording, "Building response to excavation-induced settlement," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 115, pp. 1–21, 1989.

[4] N. Loganathan and H. G. Poulos, "Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, pp. 846–856, 1998.

[5] E. Bilotta, A. Paolillo, G. Russo, S. Aversa, "Displacements induced by tunnelling under a historical building," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 61, pp. 221–232, 2017.

[6] A. Mirhabibi, A. Soroush, "Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 29, pp. 40–51, 2012.

[7] P. Jongpradist, G. Arangelovski, S. Youwai, W. Kongkitkul, A. Wonglert, T. Detkhong, A. Yamchoo, "Assessment of tunneling work impact on existing pile foundation," *Report on MRT Blue line extension project, Civil engineering, KMUTT, Bangkok*, pp. 1–26, 2013.

[8] R. B. J. Brinkgreve, E. Engin, W. M. Swolfs, "PLAXIS 2016 3D Tutorial Manual 2016," *Plaxis 2016*, vol. 132, 2016.

[9] T. Rukdeechuai, P. Jongpradist, A. Wonglert, T. Kaewsri, "Influence of soil models on numerical simulation of geotechnical works in Bangkok subsoil," *EIT Research and Development J.*, Vol.20, pp.17–28, 2009.

[10] R. E. Prust, J. Davies, S. Hu, "Part 6: tunnels and underground structures: pressuremeter investigation for mass rapid transit in Bangkok, Thailand," *Transp Res Rec J Transp Res Board*, Vol.1928, pp.207–17, 2005

[11] P. Jongpradist, T. Kaewsri, A. Sawatparnich, S. Suwansawat, S. Youwai, W. Kongkitkul, J. Sunitsakul, "Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundation by numerical analyses," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 34, pp. 96–109, 2013.

[12] P. Lueprasert, P. Jongpradist, P. Jongpradist, S. Suwansawat, "Numerical investigation of tunnel deformation due to adjacent loaded pile and pile-soil-tunnel interaction," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 70, pp. 166–81, 2017.