

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะต่อการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้าง

อุโมงค์คู่ - การวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติ

Influence of lagging distance on ground surface settlement due to mechanized twin tunneling - 3D numerical simulation

ทิพวรรณ อิ่มเอิบ¹ ประทีป หลือประเสริฐ^{2*} และ พรเกษม จงประดิษฐ์³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

³ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: prateep.lu@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การทำนายค่าการทรุดตัวของผิวดิน (Surface settlement) จากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ โดยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล (Earth pressure balance shield) มีความสำคัญในการประเมินผลกระทบเบื้องต้นที่จะเกิดขึ้นในขณะก่อสร้าง เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์ ที่ผ่านมามีการนำเสนอวิธีการประมาณค่าการทรุดตัวของผิวดินจากอุโมงค์คู่หลายวิธี เช่นวิธีทับซ้อนกราฟ (Superposition technique) โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการ Gaussian เป็นการรวมแนวการทรุดตัวของผิวดินจากอุโมงค์คู่ตัวแรกเข้ากับแนวการทรุดตัวจากอุโมงค์คู่ที่สองซึ่งค่าที่ได้จะเป็นแนวการทรุดตัวโดยรวมที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์คู่ อย่างไรก็ตาม การศึกษาก่อนหน้านี้ยังไม่ได้พิจารณาระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (Lagging Distance) ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าของการทรุดตัวของผิวดิน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะต่อการทรุดตัวของผิวดิน จากการขุดเจาะอุโมงค์คู่เพื่อให้เข้าใจและเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาสมการต่อไป โดยจะใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับปัญหาต้นแบบอุโมงค์รถไฟฟ้ามหานครที่มีผลตรวจวัดให้เปรียบเทียบได้ ในการวิเคราะห์ได้แปรเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างหัวเจาะ และระยะห่างระหว่างอุโมงค์ทั้งสอง เพื่อตรวจสอบการทรุดตัวโดยรวมที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3มิติ, อุโมงค์คู่, ระยะห่างระหว่างหัวเจาะ, สมการ, การทรุดตัวของผิวดิน

Abstract

The predictions of ground surface settlement due to mechanized twin tunneling is necessary for establishing the suitable countermeasure during excavation. The predictions are often done by superposition of settlement curves (commonly in form of Gaussian distribution) from excavation of each individual tunnel. However, only the distance between two tunnels in

parallel is considered in the current method. The lagging distance, which has also the effect on ground surface settlement, has not been taken into account. Thus, this research investigates the influence of lagging distance on ground surface behavior to get insight into this behavior and provide a basic understanding for further improvement of prediction. Series of parametric study by 3D Finite Element Method (FEM) on the validated prototype case is conducted. The parameters of the Metropolitan Rapid Transit Chaloem Ratchamongkhon Line (MRT Blue Line) projects, e.g. soil profile, tunnel characteristic, are used to model in this study. In the analyses, the lagging distance (longitudinal direction) and distance between the two tunnels (transverse direction) are varied.

Keywords: 3D FEM, Mechanized Twin tunnels, Lagging Distance, Prediction, Surface Settlement

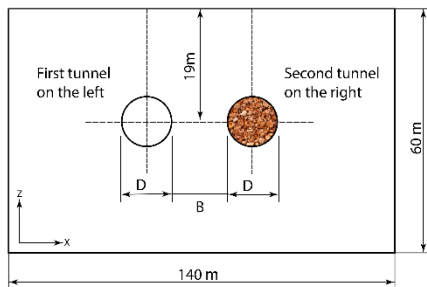
1. คำนำ

การขยายตัวอย่างต่อเนื่องของสังคมเมืองในปัจจุบัน ทั้งในเขตกรุงเทพมหานคร ปริมณฑล ส่งผลให้เกิดการจัดการด้านสาธารณูปโภคตลอดจนบริการด้านต่าง ๆ ให้พร้อมสำหรับการอยู่อาศัย และระบบคมนาคม แต่ด้วยพื้นที่ก่อสร้างบนดินที่มีอยู่อย่างจำกัด การก่อสร้างอุโมงค์จึงเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาระบบขนส่งมวลชนสำหรับเมืองที่มีความหนาแน่นของประชากรสูง

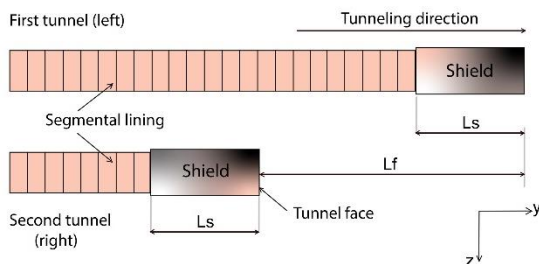
แนวเส้นทางก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าในเขตเมืองจะมีลักษณะเป็นการขุดเจาะอุโมงค์คู่ที่ขนานกันเพื่อให้รถไฟใต้ดินสามารถวิ่งไป-กลับได้ตลอดแนวเส้นทาง โดยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุลเป็นวิธีที่เหมาะสมกับสภาพดินในกรุงเทพมหานคร อย่างไรก็ตามในขั้นตอนของการ

ก่อสร้างอุโมงค์จะเกิดการสูญเสียมวลดินรอบ ๆ หัวเจาะในระหว่างการขุดเจาะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของผิวดิน (Surface settlement) จนส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงได้ และเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดินที่จะเกิดขึ้น เพื่อประเมินผลกระทบเบื้องต้นที่อาจเกิดขึ้นในขณะการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อเตรียมการป้องกันหรือปรับเปลี่ยนวิธีขุดเจาะ

รูปแบบการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่จะมีความแตกต่างจากการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากอุโมงค์เดี่ยว (Single tunnel) เพราะมีปัจจัยเพิ่มมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (Clearance, B) ดังแสดงในรูป 1. หรือ ระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (Lagging Distance, L_f) ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างหัวเจาะอุโมงค์ตัวแรกและหัวเจาะอุโมงค์ตัวที่สองในการก่อสร้างอุโมงค์คู่ดังแสดงในรูป 2. ซึ่งค่าการทรุดตัวของผิวดินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการและคาดการณ์ได้ค่อนข้างยากกว่าในอุโมงค์เดี่ยว



รูปที่ 1 รูปตัดด้านหน้าแสดงระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (Clearance, B) ของการขุดเจาะอุโมงค์คู่



รูปที่ 2 รูปตัดด้านข้างแสดงระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (Lagging Distance, L_f) ของการขุดเจาะอุโมงค์คู่

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้น [1] ได้ศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะ โดยกำหนดระยะที่ $0L_s, 1L_s, 2L_s, 3L_s$ และ $8L_s$ (โดยที่ L_s คือความยาวของหัวเจาะ ดังรูปที่ 2) ผลการศึกษาพบว่าระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (Lagging Distance) ส่งผลอย่างมากต่อค่าการทรุดตัวของผิวดิน (Surface Settlement) โดยระยะที่ส่งผลมากที่สุดคือ $0L_s$ อีกทั้งยังมีการจำลองโครงการของ [2] โดยศึกษาระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (Lagging Distance) โดยพิจารณาแบบอุโมงค์เป็นชิ้นส่วนแบบมีรอยต่อ ผลการศึกษาสรุปได้ว่าค่าการทรุดตัวจะลดลง ตามระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่เพิ่มขึ้นที่สอดคล้องสอดคล้องกับงานวิจัย [1]

ที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิธีประมาณแนวการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์หลายวิธี เช่น Gaussian curve ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุดในการประมาณรูปร่างการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นการขุดเจาะอุโมงค์เดี่ยว แนวโน้มของการทรุดตัวของผิวดินสมมาตรกับแนวกึ่งกลางอุโมงค์ แนวการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ มีลักษณะที่ไม่สมมาตรและยังสังเกตได้ว่า จุดที่ทรุดตัวสูงสุดไม่จำเป็นต้องอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างอุโมงค์ ดังนั้น สมการ Gaussian จึงไม่สามารถนำมาใช้ประมาณแนวการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์คู่โดยตรงได้ [3] จึงได้เสนอวิธีทับซ้อนกราฟ (Superposition Curve Technique) เพื่อประมาณค่าการทรุดตัวของผิวดินจากอุโมงค์คู่ นอกจากนั้น [4] ได้นำเสนอการพิสูจน์วิธีการทับซ้อนกราฟ โดยพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (Clearance) โดยผลลัพธ์ของงานวิจัยได้ทำให้การประมาณค่าการทรุดตัวของผิวดินดีขึ้น

อย่างไรก็ตามการศึกษาก่อนหน้านี้ยังไม่ได้มีการพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (Lagging Distance) ร่วมกับระยะห่างระหว่างอุโมงค์คู่ ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าของการทรุดตัวของผิวดิน ดังนั้นจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้คือการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะต่อการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ ในกรณีวิเคราะห์ได้แปรเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างหัวเจาะ และระยะห่างระหว่างอุโมงค์ทั้งสอง เพื่อตรวจสอบการทรุดตัวโดยรวมที่เกิดขึ้น โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D เวอร์ชัน 2017 กับปัญหาต้นแบบอุโมงค์รถไฟฟ้ามหานครที่มีผลตรวจวัดให้เปรียบเทียบได้

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์

2.1 การกำหนดกรณีศึกษา

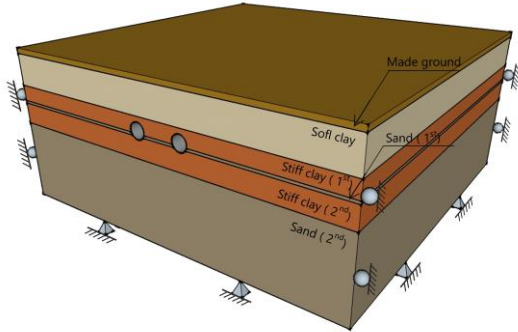
การศึกษานี้พิจารณาระยะห่างระหว่างหัวเจาะ โดยลำดับการขุดเจาะอุโมงค์คู่จำลองดังต่อไปนี้: (1) การขุดของอุโมงค์แรก (ซ้าย); (2) การขุดอุโมงค์ที่สอง (ขวา) ที่รักษาระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (Lagging Distance, L_f) ที่ระยะ $0L_s, 2L_s, 4L_s, 6L_s, 8L_s$ และ $10L_s$ (โดยที่ L_s คือความยาวของหัวเจาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.40 เมตร ในงานนี้) พร้อมพิจารณาระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (Clearance, B) ที่ระยะ 0.25D และ 2.00D (โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.30 เมตร ในงานนี้)

2.2 การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

2.2.1 การจำลองและสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

การกำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary condition) ของแบบจำลองมีผลต่อการวิเคราะห์จึงต้องกำหนดให้มีความเหมาะสม โดยสภาวะขอบเขตกำหนดให้บริเวณด้านข้าง, ด้านหน้าและด้านหลัง ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวราบแต่ปล่อยให้เคลื่อนที่ในแนวตั้งได้อย่างอิสระ ส่วนสภาวะขอบเขตบริเวณด้านล่างจะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ผิวด้านบนของแบบจำลองปล่อยให้เคลื่อนที่ได้อิสระทุกทิศทางดังแสดงไว้ในรูปที่ 3. ขั้นตอนในการศึกษาเป็นขั้นตอนทั่วไปในกรุงเทพมหานคร

ประกอบด้วยชั้นดินถม, ชั้นดินเหนียวอ่อน, ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชั้นที่ 1) ชั้นทราย (ชั้นที่ 1), ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชั้นที่ 2) และชั้นทราย (ชั้นที่ 2) โดยอุโมงค์วางตัวระหว่างชั้น ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชั้นที่ 1), ชั้นทราย (ชั้นที่ 1) และชั้นดินเหนียวแข็ง (ชั้นที่ 2)



รูปที่ 3 แสดงสถานะขอบเขตของแบบจำลอง และชั้นดินทั่วไปในกรุงเทพมหานครที่ใช้ในการศึกษา

2.2.2 คุณสมบัติของชั้นดินในการสร้างแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องระบุรูปแบบการจำลองพฤติกรรมของดินโดยการเลือกใช้แบบจำลองของดินขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ เนื่องจากแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้นจำเป็นต้องใช้การป้อนค่าคุณสมบัติที่เพิ่มขึ้นและยังใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นานขึ้นด้วย ในการศึกษาอ้างอิงข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินของแบบจำลองจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA) และคุณสมบัติของผนังอุโมงค์, คุณสมบัติของการขุดเจาะอุโมงค์จากงานวิจัย [6] ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1. และตารางที่ 2.

ตารางที่ 1. คุณสมบัติของชั้นดินของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา [6]

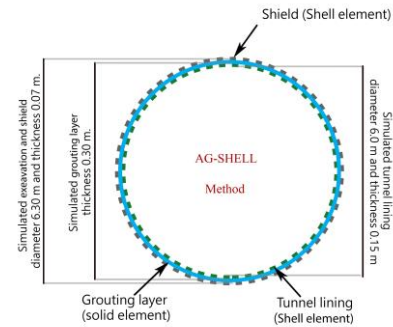
Material properties				
Table 1 Soil parameters for modeling				
Soil layer	Made ground	Soft clay	Stiff clay	Sand
Material model	MC	HS		MC
E' (kPa)	6,000	-	-	80,000
$E_{\text{rod}}^{\text{ref}}$ (kPa)	-	5,000	60,000	-
$E_{\text{so}}^{\text{ref}}$ (kPa)	-	5,000	60,000	-
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (kPa)	-	15,000	180,000	-
γ_{sat} (kN/m ³)	17	16	18	0.3
ν' (-)	0.32	0.33	0.33	36
ϕ' (°)	22	22	22	0
C (kN/m ²)	8	5	18	-
m (-)	-	1	1	-
P_{ref} (kPa)	-	100	95	-

ตารางที่ 2. คุณสมบัติของผนังอุโมงค์และคุณสมบัติของการขุดเจาะอุโมงค์ [6]

EPB Elements (Linear Elastic)	Young Modulus [E] (kN/m ²)	Poisson's Ratio [ν]	Unit Weight [γ] (kN/m ³)
Tunnel lining	31x10 ⁶	0.20	24
EPB shield	210 x10 ⁶	0.28	78
Grouting layer	1x10 ⁶	0.30	21

2.2.3 คุณสมบัติของวัสดุผนังอุโมงค์, หัวเจาะอุโมงค์, grouting layer

ในการศึกษากำหนดคุณสมบัติของผนังอุโมงค์และหัวเจาะอุโมงค์เป็นแบบ Shell Element หนา 0.15 และ 0.07 เมตร ตามลำดับ, grouting layer เป็น Solid Element หนา 0.30 เมตร อ้างอิงจากงานวิจัย [6] ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 4. โดยคุณสมบัติของทั้งสามองค์ประกอบดังกล่าวสมมติให้เป็นพฤติกรรมยืดหยุ่นโดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 2.



รูปที่ 4 ภาพตัดขวางแสดงรูปแบบของการจำลองการขุดเจาะ

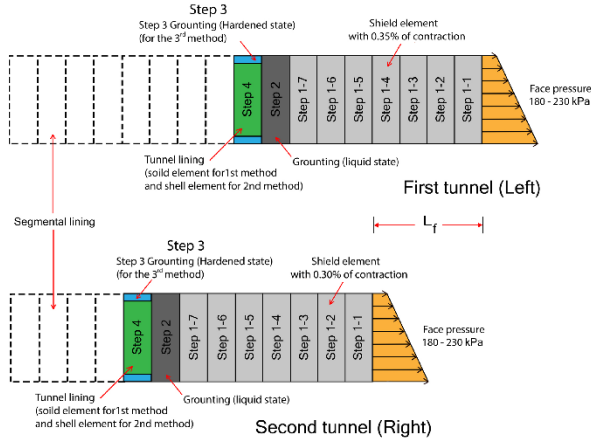
2.3 การจำลองวิธีการขุดเจาะ

จำลองขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะปรับแรงดันดินสมดุล (EPB shields) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5 กำหนดให้ความยาวของหัวเจาะอุโมงค์, L_s เท่ากับ 8.4 เมตร และความกว้างของชั้นส่วนอุโมงค์มีขนาด 1.20 เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับความกว้างของผนังอุโมงค์ มีจำนวนผนังอุโมงค์ทั้งสิ้น 115 วงตามแนวยาวของแต่ละอุโมงค์ ระยะทาง 138 เมตร สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. การกำหนดความดันหน้าหัวเจาะ ในแต่ละรอบการขุดเจาะ จำเป็นที่จะต้องถูกกำหนดไว้ก่อนที่การขุดเจาะจะเกิดขึ้น โดยประเมินจากแนวเส้นทางอุโมงค์และสภาพทางธรณี ซึ่งความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดนั้นจะใช้เป็นปัจจัยควบคุมขณะทำการขุดเจาะ มีค่า 180-230 kPa. ของทั้งสองอุโมงค์ โดยกำหนดค่าการสูญเสียมวลดิน (Contraction ratio) ของอุโมงค์ที่แรกที่ 0.35 เปอร์เซ็นต์ และอุโมงค์ที่สอง ที่ 0.30 เปอร์เซ็นต์ อ้างอิงการเปรียบเทียบข้อมูลจริงจาก[6] หัวเจาะจะมีการทำงานระยะทางรวม 8.4 เมตรหรือจำลองให้เป็นวงรอบประมาณ 7 วง

ขั้นตอนที่ 2 การใส่ค่าแรงดันน้ำป้อน 200 kPa. บริเวณดินโดยรอบตามแนวเส้นรอบวงการขุดเจาะ

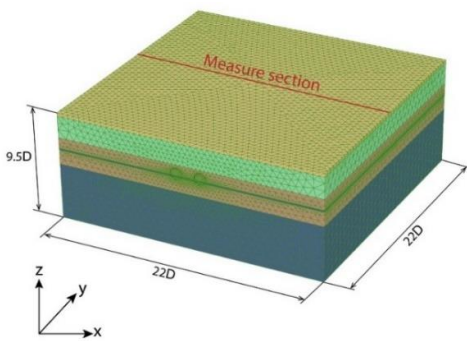
ขั้นตอนที่ 3. เปลี่ยนค่าแรงดันดินน้ำปูนเป็นปูนชนิดแข็งบริเวณช่องว่างระหว่างหัวเจาะกับผนังอุโมงค์ และใส่ชั้นส่วนผนังอุโมงค์ ให้มีคุณสมบัติแสดงไว้ในตารางที่ 2. ทำตามขั้นตอนจนได้ระยะทางทั้งสิ้น 138 เมตร รูปที่ 5. แสดงการจำลองขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์คู่



รูปที่ 5. แสดงการจำลองขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์คู่

2.4 การเทียบวัดความถูกต้องของแบบจำลอง (Calibrate model)

ก่อนทำการวิเคราะห์ต่อไป จะเทียบวัดความถูกต้องของการจำลอง (Model calibration) ในขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีผลตรวจวัดจริงให้เปรียบเทียบได้ โดยเทียบวัดผลการวิเคราะห์กับข้อมูลค่าการทรุดตัวของผิวดินจาก [5] ที่รูปตัด CS-8B โดยอุโมงค์ลึก 19 เมตร และระยะห่างระหว่างอุโมงค์เท่ากับ 1.5D ดังตัวอย่างแบบจำลองการวิเคราะห์ที่แสดงไว้ใน รูปที่ 6.



รูปที่ 6. แสดงแบบจำลองในการเทียบวัดความถูกต้องแบบจำลอง

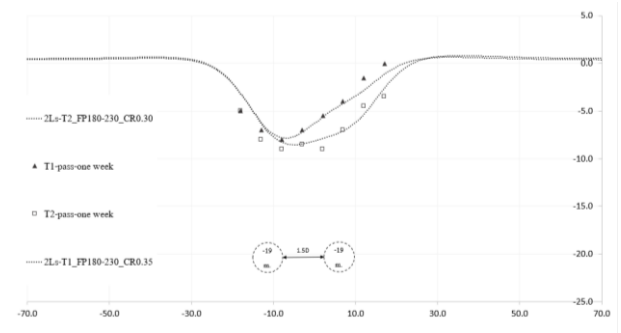
3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

ในหัวข้อนี้แสดงการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์ในระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์คู่ขนาน โดยจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลตรวจวัดของปัญหาต้นแบบ จากนั้นวิเคราะห์เชิงตัวแปร (parametric study) เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวของผิวดินเมื่อระยะห่างระหว่างหัวเจาะและระยะห่างระหว่างอุโมงค์แปรเปลี่ยนไป กำหนดระยะที่เก็บค่าการทรุดตัวจากขอบเขตของแบบจำลองที่ $y = 69$ เมตร เมื่อการขุดอุโมงค์ถึงสถานะคงที่แล้ว (หมายเหตุ ผลที่แสดงในบทความนี้เลือกเฉพาะกรณีที่น่าสนใจมาแสดง)

3.1 การทรุดตัวของผิวดิน (Surface settlement)

3.1.1 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

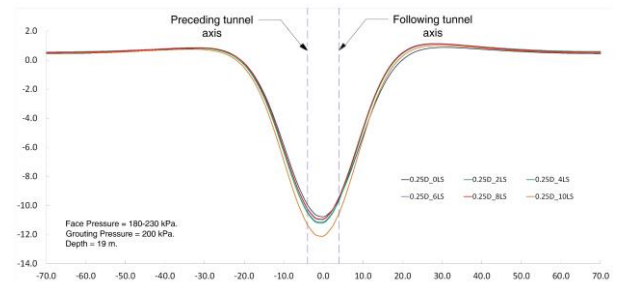
รูปที่ 7. แสดงผลการทรุดตัวของผิวดินระหว่างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการและแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา และผลตรวจวัดจริง ทั้งจากการขุดอุโมงค์แรกตัวเดียว และจากการขุดทั้งสองอุโมงค์ทำให้สามารถเปรียบเทียบการจำลองตามลำดับขั้นการขุดได้ จากรูปจะเห็นว่าทั้งแนวและค่าการทรุดตัวทั้งสองทั้งขั้นตอนจากการวิเคราะห์ที่มีความใกล้เคียงกับผลตรวจวัดจริงมาก วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษาต่อไป



รูปที่ 7. แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการและแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

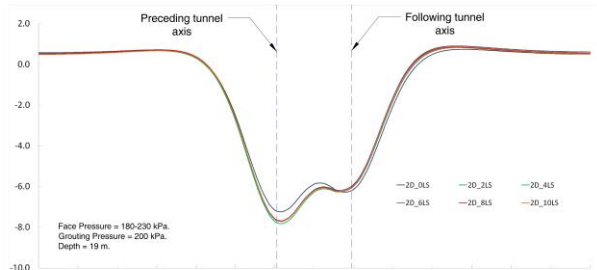
3.1.2 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (Lagging Distance)

รูปที่ 8. แสดงการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ด้วยระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่แตกต่างกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (B) เท่ากับ 0.25D หรือ 7.88 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่ใกล้ที่สุดในการศึกษา โดยแนวการทรุดตัวของผิวดินที่ $0L_S$ จะสมมาตรกับจุดกึ่งกลางระหว่างอุโมงค์ แต่ในกรณีของ $2L_S, 4L_S, 6L_S, 8L_S$ และ $10L_S$ แนวการทรุดตัวของผิวดินจะมีเบี่ยงไปทางอุโมงค์ตัวแรกมากกว่า เนื่องจากค่าการสูญเสียมวลดินของการขุดอุโมงค์ตัวแรกมีค่ามากกว่า



รูปที่ 8. การเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ในอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ระยะ $0L_S, 2L_S, 4L_S, 6L_S, 8L_S$ และ $10L_S$ (โดยที่ L_S คือความยาวของหัวเจาะ) โดยมีระยะห่างระหว่างอุโมงค์เท่ากับ 0.25D (โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์)

และรูปที่ 9. แสดงการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ด้วยระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (L_F) ที่แตกต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างอุโมงค์โดยมีระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (B) เท่ากับ 2D หรือ 18.90 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่ห่างที่สุดในการศึกษา พบว่าแนวการทรุดตัวของผิวดินมีลักษณะไม่เป็นร่องลึกที่สุดที่จุดกึ่งกลางอุโมงค์ แสดงให้เห็นว่าการขุดเจาะอุโมงค์คู่ด้วยระยะห่างของอุโมงค์ที่ต่างกัน 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง

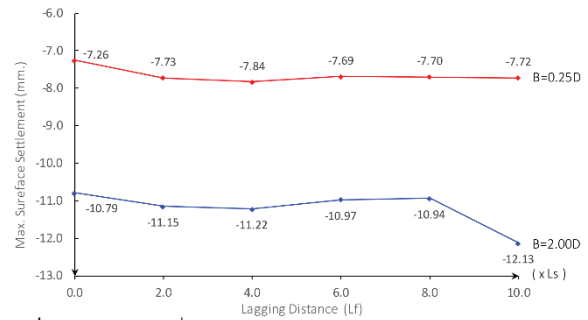


รูปที่ 9. การเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ในอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ระยะ $0L_S$, $2L_S$, $4L_S$, $6L_S$, $8L_S$ และ $10L_S$ (โดยที่ L_S คือความยาวของหัวเจาะ) โดยมีระยะห่างระหว่างอุโมงค์เท่ากับ 2D (โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์)

โดยค่าการทรุดตัวของผิวดินสูงสุดจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ด้วยระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (L_F) ที่แตกต่างกันแสดงไว้ใน รูปที่ 10. เมื่อพิจารณาการแปรเปลี่ยนของระยะห่างระหว่างหัวเจาะจะสังเกตเห็นว่าช่วงระยะห่างที่ $0L_S$, $2L_S$ และ $4L_S$ ค่าการทรุดตัวสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่มากขึ้น ผลที่สังเกตได้จากการศึกษานี้ต่างจากการศึกษาที่ผ่านมา [1] และ [2] ที่ระบุว่าระยะห่างของหัวเจาะที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การทรุดตัวของผิวดินหลังขุดอุโมงค์ทั้งคู่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของความดันหน้าหัวเจาะ ซึ่งในกรณีของ $0L_S$ พบว่าค่าการทรุดตัวของผิวดินที่ต่ำที่สุดเนื่องจากอิทธิพลของความดันหน้าหัวเจาะส่งผลร่วมกันทั้งสองอุโมงค์ และจะมีค่าการทรุดตัวเพิ่มมากขึ้นในระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่เพิ่มขึ้นในกรณีของ $2L_S$ และ $4L_S$ ตามลำดับ โดยค่าการทรุดตัวของผิวดินที่มีค่าเพิ่มขึ้นมานั้นเป็นผลมาจากอิทธิพลของความดันหน้าหัวเจาะส่งผลร่วมกันได้น้อยลงตามระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งในกรณีของระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (B) เท่ากับ 0.25D และ 2.00D

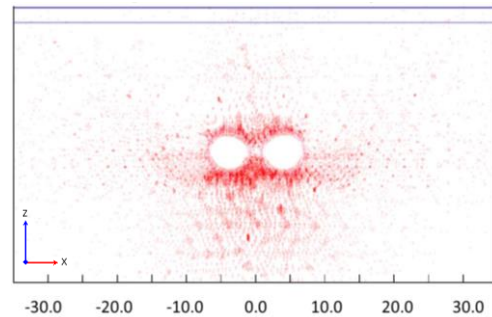
แม้ว่าอิทธิพลของความดันหน้าหัวเจาะจะมีส่วนสำคัญต่อการทรุดตัวของผิวดิน แต่ในการพิจารณาการแปรเปลี่ยนของระยะห่างระหว่างหัวเจาะช่วงระยะห่างที่ $6L_S$, $8L_S$ และ $10L_S$ ในกรณีของระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (B) เท่ากับ 0.25D พบว่าระยะห่างที่ $6L_S$ และ $8L_S$ ค่าการทรุดตัวสูงสุดจะมีค่าลดลงมา ซึ่งเชื่อได้ว่าอิทธิพลของความดันหน้าหัวเจาะไม่ส่งผลร่วมกันแล้ว โดยมีเพียงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะเท่านั้น จึงทำให้ค่าการทรุดตัวของผิวดินจะมีค่าลดลงตามระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมีระยะห่างที่มีค่ามากพอ ($L_F = 10L_S$) จะทำให้ค่าการทรุดตัวจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งดังงานวิจัยของ [1] และในกรณีของระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (B) เท่ากับ 2.00D พบว่าค่าการทรุดตัวสูงสุดในช่วงที่ $6L_S$,

$8L_S$ และ $10L_S$ มีค่าลดลงมาเช่นเดียวกันกับกรณีศึกษาแรก แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างอุโมงค์เท่ากับ 2.00D ค่าการทรุดตัวของผิวดินในช่วงที่ $6L_S$, $8L_S$ และ $10L_S$ มีค่าที่เปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงได้ผลลัพธ์ของการทรุดตัวของผิวดินสูงสุดอยู่ที่ระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ $4L_S$ ซึ่งจะสามารถบ่งบอกได้ว่าอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะในช่วง $0L_S$, $2L_S$ และ $4L_S$ จำเป็นที่จะต้องพิจารณาอิทธิพลของความดันหน้าหัวเจาะร่วมกับระยะห่างระหว่างหัวเจาะด้วยในการทำนายค่าการทรุดตัวของผิวดิน ในขณะที่อิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะในช่วง $6L_S$, $8L_S$ และ $10L_S$ ต้องพิจารณาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะ

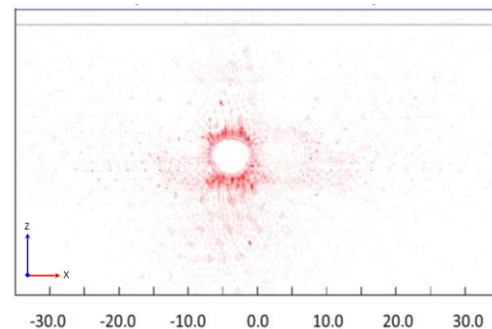


รูปที่ 10. แสดงการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวของผิวดินสูงสุดจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ด้วยระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (L_F) ที่แตกต่างกัน

3.1.2 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวโดยรวมของดิน

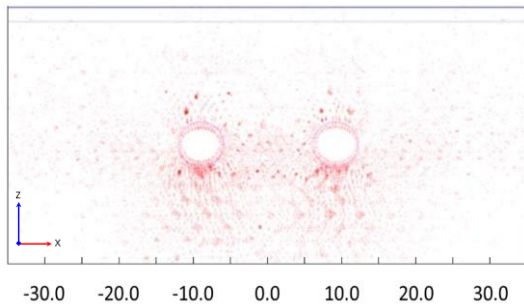


รูปที่ 11. เวกเตอร์การเคลื่อนตัวโดยรวมของดินในกรณีระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ระยะ $0L_S$ (โดยที่ L_S คือความยาวของหัวเจาะ) โดยมีระยะห่างระหว่างอุโมงค์เท่ากับ 0.25D (โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์)

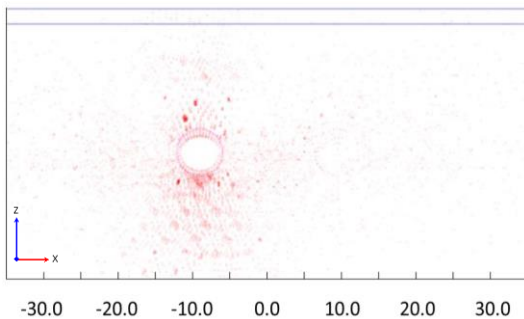


รูปที่ 12. เวกเตอร์การเคลื่อนตัวโดยรวมของดินในกรณีระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ระยะ $6L_S$ (โดยที่ L_S คือความยาวของหัวเจาะ) โดยมีระยะห่างระหว่างอุโมงค์เท่ากับ 0.25D (โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์)

จากรูปที่ 11. และรูปที่ 12. แสดงเวกเตอร์การเคลื่อนตัวโดยรวมของดินในกรณีของระยะห่างระหว่างอุโมงค์เท่ากับ $0.25D$ (โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์) โดยมีระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ระยะ $0L_s$ และ $6L_s$ (โดยที่ L_s คือความยาวของหัวเจาะ) เนื่องจากการทำนายค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ โดยพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างหัวเจาะพบว่าอิทธิพลของความดันหน้าหัวเจาะที่ส่งผลร่วมกันอยู่ และจากผลการศึกษาจะพบว่าความดันหน้าหัวเจาะจะส่งผลต่อค่าการทรุดตัวในช่วงของระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ระยะ $0L_s, 2L_s$ และ $4L_s$ ซึ่งสังเกตได้จากเวกเตอร์ของการเคลื่อนตัวของดินในช่วงระยะนี้จะพบว่าเวกเตอร์ที่มีขนาดยาวมีความหนาแน่นสูงซึ่งหมายความว่ามีความดันหน้าหัวเจาะส่งผลร่วมกันอยู่ทั้งสองอุโมงค์ และเมื่อถึงช่วงของระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ระยะ $6L_s, 8L_s$ และ $10L_s$ จะสังเกตได้ว่าเวกเตอร์ที่มีขนาดยาวมีความหนาแน่นที่ลดลง กล่าวคืออิทธิพลของความดันหน้าหัวเจาะส่งผลร่วมกันได้น้อยลงหรือไม่ส่งผลต่อกันแล้ว และเป็นเช่นเดียวกับกรณีของระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (B) เท่ากับ $2.00D$ ที่จะแสดงใน รูปที่ 13. และรูปที่ 14.



รูปที่ 13. เวกเตอร์การเคลื่อนตัวโดยรวมของดินในกรณีระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ระยะ $0L_s$ (โดยที่ L_s คือความยาวของหัวเจาะ) โดยมีระยะห่างระหว่างอุโมงค์เท่ากับ $2.00D$ (โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์)



รูปที่ 14. เวกเตอร์การเคลื่อนตัวโดยรวมของดินในกรณีระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ระยะ $6L_s$ (โดยที่ L_s คือความยาวของหัวเจาะ) โดยมีระยะห่างระหว่างอุโมงค์เท่ากับ $2.00D$ (โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์)

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะต่อการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ โดยจะใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ $0L_s - 4L_s$ จะพบว่ามีอิทธิพลจากความดันหน้าหัวเจาะส่งผลร่วมกันอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อมีระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (L_f) ที่มากพอ จะพบว่าอิทธิพลจากความดันหน้าหัวเจาะจะไม่ส่งผลร่วมกันแล้วระหว่างสองอุโมงค์ แต่ยังคงมีอิทธิพลจากการสูญเสียมวลดินของการขุดเจาะอุโมงค์ตัวแรกและตัวที่สองอยู่ โดยในช่วงระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ $6L_s - 10L_s$ ค่าการทรุดตัวจะเป็นผลมาจากระยะห่างระหว่างหัวเจาะเพียงเท่านั้น และเมื่อถึงระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่มีค่ามากพอ ($10L_s$) ค่าการทรุดตัวของผิวดินจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งจากการทรุดตัวสะสมจากการขุดเจาะอุโมงค์ตัวแรกแล้วส่งผลกระทบต่ออุโมงค์ตัวที่สอง

โดยระยะห่างระหว่างหัวเจาะส่งผลต่อค่าการทรุดตัวของผิวดินของอุโมงค์คู่ การขุดเจาะอุโมงค์คู่ที่หัวเจาะถูกขุดไปพร้อมๆกัน ($L_f = 0L_s$) อาจจะได้ผลลัพธ์ของค่าการทรุดตัวที่สูงแต่อย่างไรก็ตาม ในทางกลับกันจะได้ผลลัพธ์ของค่าการทรุดตัวของผิวดินที่ต่ำที่สุด ถ้ามีปัจจัยปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ (ความดันหน้าหัวเจาะ) ที่เหมาะสม ทั้งในกรณีที่อุโมงค์วางตัวใกล้กันและไกลกัน ($0.25D$ และ $2D$) ก็ตาม

อย่างไรก็ตามปัญหาการทรุดตัวของดินยังคงเกิดขึ้นอยู่เสมอและมักจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียง ดังนั้นการประเมินผลกระทบเบื้องต้นที่จะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการก่อสร้างจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง โดยในการทำงานควรคำนึงถึงปัจจัยในการควบคุมหัวเจาะร่วมกับอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะหรือระยะห่างระหว่างอุโมงค์ทั้งสอง เพื่อให้เข้าใจและประเมินสถานการณ์ของการขุดเจาะอุโมงค์คู่ที่จะเกิดขึ้นได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่สนับสนุนทุนพัฒนานักวิจัย เลขที่ทุน KREF046012 ที่ได้สนับสนุนการใช้งานโปรแกรม PLAXIS

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ngoc-Anh D., Daniel D. and Pierpaolo, O. (2016). 3D numerical investigation of mechanized twin tunnels in soft ground – Influence of lagging distance between two tunnel faces. *Engineering Structures*, 109, pp.117–125.
- [2] Mojtaba N., Hamed M. and Daniel, D. (2018). Three-dimensional numerical simulation of the Shiraz subway second line – influence of the segmental joints geometry and of the lagging distance between twin tunnels' faces. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*,
- [3] Suwansawat S., and Einstein, (2007). Describing settlement troughs over twin tunnels using a superposition technique. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 133(4), pp.445–468.

- [4] Ngoc-Anh D., Daniel D. and Pierpaolo, O. (2015). 3D numerical investigation on the interaction between mechanized twin tunnels in soft ground. *Environmental Earth Sciences*, 73, pp.2101–2113.
- [5] สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ (2554). วิศวกรรมอุโมงค์, ครั้งที่2, สำนักพิมพ์ มินิ เซอร์วิส ซีพพลายม กรุงเทพฯ.
- [6] Lueprasert P., Jongpradist P., Heama N., Ruengwirojjanakul K. and Suwansawatt, S. (2016). 3D-FEA OF EPB SHIELD TUNNEL EXCAVATION USING SHELL ELEMENT AND GROUTING LAYER. Sixth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Bangkok, Thailand, 14-16 November 2016.