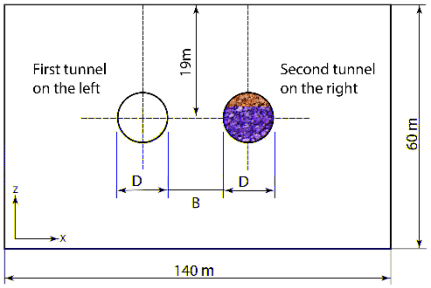
อิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะต่อการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์คู่ - การวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติ

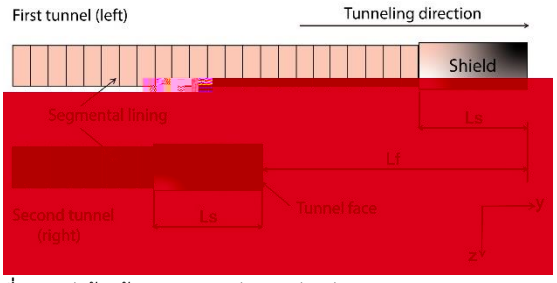
Influence of lagging distance on ground surface settlement due to mechanized twin tunneling - 3D numerical simulation

ก่อสร้างอุโมงค์จะเกิดการสูญเสียมวลดินรอบ ๆ หัวเจาะในระหว่างการขุดเจาะส่งผลให้ดินเกิดการทรุดตัวของผิวดิน (Surface settlement) จนส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงได้ และเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์การทรุดตัวที่ผิวที่จะเกิดขึ้น เพื่อประเมินผลกระทบเบื้องต้นที่อาจเกิดขึ้นในขณะการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อเตรียมการป้องกันหรือปรับเปลี่ยนวิธีขุดเจาะ

รูปแบบการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่จะมีความแตกต่างจากการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากอุโมงค์เดี่ยว (Single tunnel) เพราะมีปัจจัยเพิ่มมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (Clearances, *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) โดยพิจารณารูปแบบอุโมงค์เป็นชิ้นส่วนแบบมีรอยต่อ ผลการศึกษาสรุปได้ว่าค่าการทรุดตัวจะลดลง ตามระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่เพิ่มขึ้นที่ซึ่งสอดคล้องสอดคล้องกับงานวิจัย [1]

ที่ผ่านมามีการนำเสนอวิธีประมาณแนวการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์หลายวิธี เช่น Gaussian curve ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุดในการประมาณรูปร่างการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นการขุดเจาะอุโมงค์เดี่ยว แนวโน้มของการทรุดตัวของผิวดินสมมาตรกับแนวกึ่งกลางอุโมงค์ แนวการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการขุดอุโมงค์คู่ 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 ดังนั้นจุดมุ่งหมายหมายของงานวิจัยนี้คือการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะต่อการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ ในการวิเคราะห์ได้แปรเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างหัวเจาะ และระยะห่างระหว่างอุโมงค์ทั้งสอง เพื่อตรวจสอบการทรุดตัวโดยรวมที่เกิดขึ้น โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติ วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D เวอร์ชั่น 2017 กับปัญหาต้นแบบอุโมงค์รถไฟฟ้ามหานครที่มีผลตรวจวัดให้ปรับเทียบได้

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์

2.1 การกำหนดกรณีศึกษา

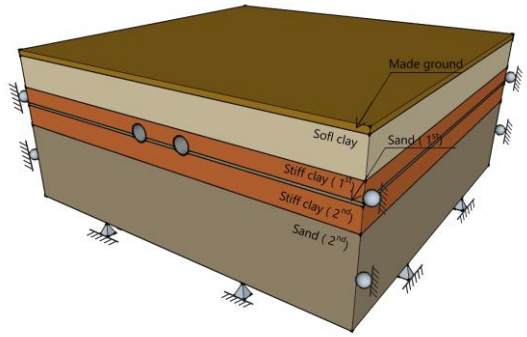
การศึกษานี้พิจารณาระยะห่างระหว่างหัวเจาะ โดยลำดับการขุดอุโมงค์คู่จำลองดังต่อไปนี้: (1) การขุดของอุโมงค์แรก (ซ้าย); (2) การขุดอุโมงค์ที่สอง (ขวา) ที่รักษาระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (Lagging Distance, L_f) ที่ระยะ $0L_s$, $2L_s$, $4L_s$, $6L_s$, $8L_s$ และ$10L_s$ (โดยที่ L_sคือความยาวของหัวเจาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.40 เมตร ในงานนี้) พร้อมพิจารณาระยะห่างระหว่างอุโมงค์ (Clearance, ***B***) ที่ระยะ 0.25D และ2.00D (โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.30 เมตร ในงานนี้)

2.2 การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (FEM)

2.2.1 การจำลองและสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

การกำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary condition) ของแบบจำลองมีผลต่อการวิเคราะห์จึงต้องกำหนดให้มีความเหมาะสม โดยสภาวะขอบเขตกำหนดให้บริเวณด้านข้าง, ด้านหน้าและด้านหลัง ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวราบแต่ปล่อยให้เคลื่อนที่ในแนวดิ่งได้อย่างอิสระ ส่วนสภาวะขอบเขตบริเวณด้านล่างจะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง ผิวด้านบนของแบบจำลองปล่อยให้เคลื่อนที่ได้อิสระทุกทิศทางดังแสดงไว้ในรูปที่ 3. ชั้นดินในการศึกษาเป็นชั้นดินทั่วไปในกรุงเทพมหานคร

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 แสดงสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง และชั้นดินทั่วไปในกรุงเทพมหานครที่ใช้ในการศึกษา

2.2.2 คุณสมบัติของชั้นดินในการสร้างแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องระบุรูปแบบการจำลองพฤติกรรมของดิน โดยการเลือกใช้แบบจำลองของดินขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ เนื่องจากแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้นจำเป็นต้องใช้การป้อนค่าคุณสมบัติที่เพิ่มขึ้นและยังใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นานขึ้นด้วย ในการศึกษาอ้างอิงข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินของแบบจำลองจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล(MRTA) และคุณสมบัติของผนังอุโมงค์, คุณสมบัติของการขุดเจาะอุโมงค์จากงานวิจัย [6] ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1. และตารางที่2.

ตารางที่ 1. คุณสมบัติของชั้นดินของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา [6]

Material properties

Table 1 Soil parameters for modeling

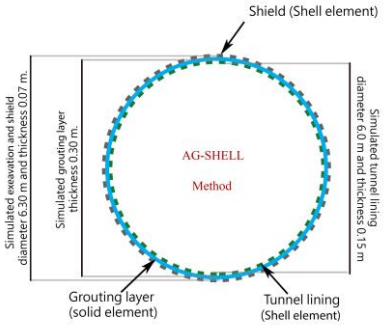
Soil layer	Made ground	Soft clay	Stiff clay	Sand
Material model	MC	(HS)		MC
E' (kPa)	6,000	-	-	80,000
E^{ref}_{oed} (kPa)	-	5,000	60,000	-
E^{ref}_{50} (kPa)	-	5,000	60,000	-
E^{ref}_{ur} (kPa)	-	15,000	180,000	-
γ_{sat} (kN/m^3)	17	16	18	0.3
υ' (-)	0.32	0.33	0.33	36
ϕ' (°)	22	22	22	0
C (kN/m^3)	8	5	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 [υ]	Unit Weight [γ] (KN/m^3)
Tunnel lining	$31x10^6$	0.20	24
EPB shield	$210 x10^5$	0.28	78
Grouting layer	$1x10^6$	0.30	21

2.2.3 คุณสมบัติของวัสดุผนังอุโมงค์, หัวเจาะอุโมงค์, grouting layer

ในการศึกษากำหนดคุณสมบัติของผนังอุโมงค์และหัวเจาะอุโมงค์เป็นแบบ Shell Element หนา 0.15 และ0.07 เมตร ตามลำดับ, grouting layer เป็น Solid Element หนา 0.30 เมตร อ้างอิงจากงานวิจัย [6] ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 4. โดยคุณสมบัติของทั้งสามองค์ประกอบดังกล่าวสมมติให้เป็นพฤติกรรมยืดหยุ่นโดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 2.



รูปที่ 4 ภาพตัดขวางแสดงรูปแบบของการจำลองการขุดเจาะ

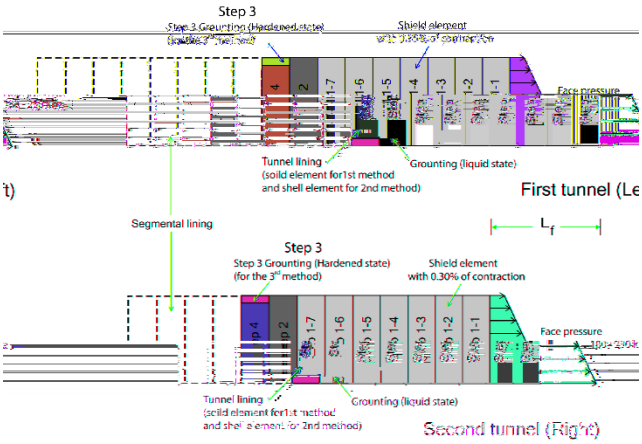
2.3 การจำลองวิธีการขุดเจาะ

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

ขั้นตอนที่ 1. การกำหนดความดันหน้าหัวเจาะ ในแต่ละรอบการขุดเจาะ จำเป็นที่จะต้องถูกกำหนดไว้ก่อนที่การขุดเจาะจะเกิดขึ้น โดยประเมินจากแนวเส้นทางอุโมงค์และสภาพทางธรณี ซึ่งความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดนี้จะใช้เป็นปัจจัยควบคุมขณะทำการขุดเจาะ 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 การใส่ค่าแรงดันน้ำปูน 200 kPa. บริเวณดินโดยรอบตามแนวเส้นรอบวงการขุดเจาะ

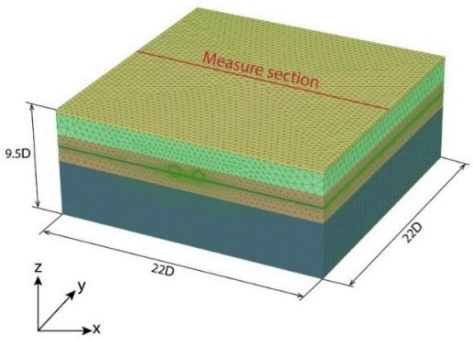
ขั้นตอนที่ 3. เปลี่ยนค่าแรงดันดินน้ำปูนเป็นปูนชนิดแข็งบริเวณช่องว่างระหว่างหัวเจาะกับผนังอุโมงค์ และใส่ชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ ให้มีคุณสมบัติแสดงไว้ในตารางที่ 2. ทำตามขั้นตอนจนได้ระยะทางทั้งสิ้น 138 เมตร รูปที่ 5. แสดงการจำลองขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์คู่



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

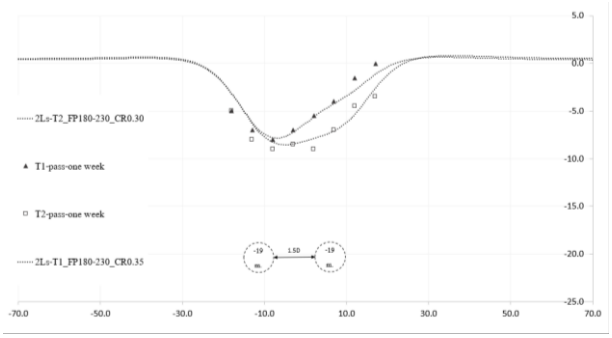
3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

ในหัวข้อนี้แสดงการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์ในระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์คู่ขนาน โดยจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลตรวจวัดของปัญหาต้นแบบ จากนั้นวิเคราะห์เชิงตัวแปร (parametric study) เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวของผิวดินเมื่อระยะห่างระหว่างหัวเจาะและระยะห่างระหว่างอุโมงค์แปรเปลี่ยนไป กำหนดระนาบที่เก็บค่าการทรุดตัวจากขอบเขตของแบบจำลองที่ y = 69 เมตร เมื่อการขุดอุโมงค์ถึงสถานะคงที่แล้ว (หมายเหตุ ผลที่แสดงในบทความนี้เลือกเฉพาะกรณีที่น่าสนใจมานำแสดง)

3.1 การทรุดตัวของผิวดิน (Surface settlement)

3.1.1 การปรับเทียบแบบจำลอง

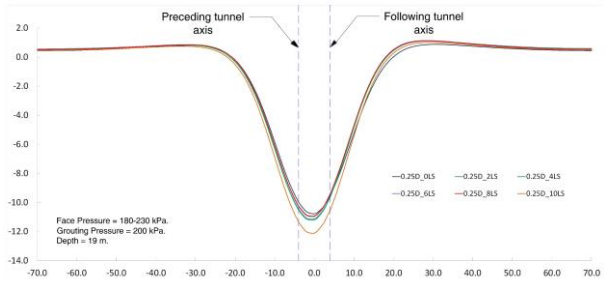
รูปที่ 7. แสดงผลการทรุดตัวของผิวดินระหว่างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการและแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา และผลตรวจวัดจริง ทั้งจากการขุดอุโมงค์แรกตัวเดียว และจากการขุดทั้งสองอุโมงค์ทำให้สามารถปรับเทียบการจำลองตามลำดับขั้นการขุดได้ จากรูปจะเห็นว่าทั้งแนวและค่าการทรุดตัวทั้งสองทั้งขั้นตอนจากการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับผลตรวจวัดจริงมาก วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษาต่อไป



รูปที่ 7. แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการและแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

3.1.2 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะ (Lagging Distance)

รูปที่ 8. แสดงการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ด้วยระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่แตกต่างกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างอุโมงค์(***B***) เท่ากับ 0.25D หรือ 7.88 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่ใกล้ที่สุดในการศึกษานี้ โดยแนวการทรุดตัวของผิวดินที่ $0L_s$จะสมมาตรกับจุดกึ่งกลางระหว่างอุโมงค์ แต่ในกรณีของ $2L_s$, $4L_s$, $6L_s$, $8L_s$และ$10L_s$ แนวการทรุดตัวของผิวดินจะมีเบ้ไปทางอุโมงค์ตัวแรกมากกว่า เนื่องจากค่าการสูญเสียมวลดินของการขุดอุโมงค์ตัวแรกมีค่ามากกว่า



รูปที่ 8. การเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ ในอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเจาะที่ระยะ $0L_s$, $2L_s$, $4L_s$, $6L_s$, $8L_s$และ $10L_s$ (โดยที่ L_sคือความยาวของหัวเจาะ) โดยมีระยะห่างระหว่างอุโมงค์เท่ากับ 0.25D (โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์)

และรูปที่ 9. แสดงการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ด้วยระยะห่างระหว่างหัวเจาะ(L_f)

[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, สำนักพิมมีน เซอร์วิส ซัพพลายม 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.