การเปรียบเทียบผลกระทบจากการเจาะอุโมงค์ที่มีต่อเสาเข็มเมื่อถูกป้องกันด้วยดินซีเมนต์ที่มีรูปทรงต่างกัน

Comparison of tunneling impacts on piles when protected by different jet grouting patterns

ภูริณัฐ นฤปจาตุรงค์พร[1],* และ ฐิรวัตร บุญญะฐี[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

**Corresponding author address: 6170475721@student.chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของชั้นดินระหว่างการเจาะอุโมงค์ที่มีต่อเสาเข็มของอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงซึ่งได้แก่ แรงในแนวแกน, โมเมนต์ดัด และการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นจากสภาพปกติทั้ง 3มิติ โดยสมมติให้มีการปรับปรุงชั้นดินด้วยการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ในรูปแบบต่างๆ ด้วยปริมาตรที่เท่ากัน แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ แล้วนำผลจากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของรูปแบบเหล่านั้น จากการศึกษาพบว่า การฉีดน้ำปูนซีเมนต์ส่งผลดีต่อการลดแรงในแนวแกน, โมเมนต์ดัดและการเคลื่อนตัวของชั้นดิน ที่แตกต่างกันออกไปตามรูปแบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ โดยลักษณะรูปแบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ที่ปรับปรุงชั้นดินเป็นแนวกำแพงนั้นจะช่วยส่งผลดีในเรื่องของแรงในแนวแกน และ การทรุดตัวของชั้นดินได้ดีกว่ารูปแบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์บริเวณที่อุโมงค์วิ่งผ่าน (แบบกล่อง) อยู่ 0.44% และ 0.04% ตามลำดับ แต่ในส่วนของการลดโมเมนต์ดัดนั้นสำหรับรูปแบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์บริเวณที่อุโมงค์วิ่งผ่าน (แบบกล่อง) กลับให้ผลตอบรับที่ดีกับเสาเข็มมากกว่า

คำสำคัญ: การขุดเจาะอุโมงค์ใกล้แนวเสาเข็ม, พฤติกรรมของเสาเข็ม, การฉีดน้ำปูนซีเมนต์

Abstract

The impact of ground movement due to tunneling to nearby piles which are the induced axial force, moment and 3D deflection in piles are investigated in this study. A number of jet grouting patterns were assumed and analyzed by a finite element code for comparing their efficiency on the reduction of tunneling impacts. The analysis results reveal that the jet grouting was effective for reducing the axial force, moment and deflection in piles in different modelled depending on the grouting pattern. The grouting pattern of wall line had a better effect on the axial force and vertical settlement than the pattern of block about 0.44% and 0.04% respectively. On the other hand, the grouting pattern of block got a better efficient on bending moment.

Keywords: Tunnelling adjacent pile, Effect on piles, Jet grouting

1. บทนำ

การขุดเจาะอุโมงค์ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่และการทรุดตัวของพื้นดินที่แตกต่างกันไป การขุดเจาะอุโมงค์เพื่อการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินและสาธารณูปโภคในกรุงเทพฯ มักทำตามแนวถนนเพื่อหลีกเลี่ยง แนวเสาเข็มเก่าของอาคาร

อย่างไรก็ตามมีบางบริเวณที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องเจาะอุโมงค์เข้าใกล้เสาเข็มเดิมของอาคารหรือสะพาน ทำให้การเคลื่อนที่ของดินอาจจะทำให้เกิดแรงดันในเสาเข็มมากจนเสียหายได้ การเพิ่มความแข็งของดินด้วยการฉีดน้ำปูนซีเมนต์เป็นวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้เพื่อลดผลกระทบของการขุดเจาะอุโมงค์ โดยรูปแบบของการปรับปรุงนั้นอาจแบ่งออกได้เป็นการอัดฉีดน้ำปูนซีเมนต์เป็นแนวกำแพงระหว่างอุโมงค์กับเสาเข็มเดิม หรือการอัดฉีดน้ำปูนซีเมนต์บริเวณที่อุโมงค์วิ่งผ่านโดยตรงก็ได้ เนื่องจากรูปแบบการปรับปรุงทั้งสองนั้นเสียเวลาและค่าใช้จ่ายไม่เท่ากัน การทราบข้อดีข้อเสียของการปรับปรุงทั้งสองแบบจะสามารถทำให้ตัดสินใจเลือกวิธีการปรับปรุงที่เหมาะสมได้

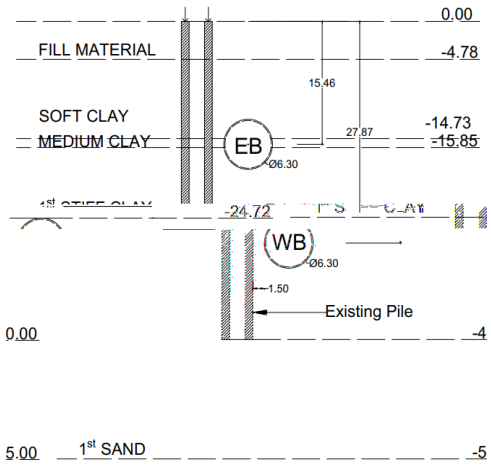
2. แนวทางงานวิจัย

การศึกษานี้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งศึกษาอิทธิพลที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็มเนื่องจากการเสาเข็มอยู่ใกล้แนวขุดเจาะอุโมงค์ โดยการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ตามชั้นดิน และขั้นตอนการก่อสร้างจริงจากโครงการที่ผ่านมาในกรุงเทพฯ แล้วสอบเทียบข้อมูลตรวจวัดภาคสนาม (Model Verification) แสดงดังรูปที่1 และส่วนที่สอง คือการศึกษารูปแบบการปรับปรุงชั้นดินด้วยการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวแปร (Parametric Study) โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษารูปแบบของการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ 2 รูปแบบ ได้แก่รูปแบบกล่องกว้าง 4.0 เมตร ยาว 4.6 เมตร และ ลึก 8.3 เมตร แสดงดังรูปที่2 และรูปแบบตัวแอล (L-Shaped) กว้าง 1.0 เมตร ความยาวตามแนวอุโมงค์ 14.8 เมตร ความยาวตามแนวขวางอุโมงค์ 5.6 เมตร และ สูง 8.3 เมตร แสดงดังรูปที่3 ซึ่งการศึกษานี้ดำเนินการวิเคราะห์ตามขั้นตอนการก่อสร้างจริงของโครงการรถไฟฟ้าสายสีส้ม (MRT Orange Line) ภายใต้แรงดันน้ำใต้ดินกรุงเทพ[2]แสดงดังรูปที่4

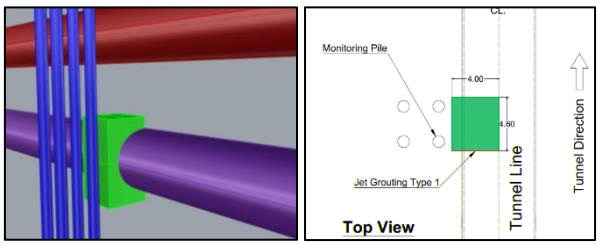
2.1 แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D แสดงโครงตาข่าย หรือMesh แสดงดังรูปที่5

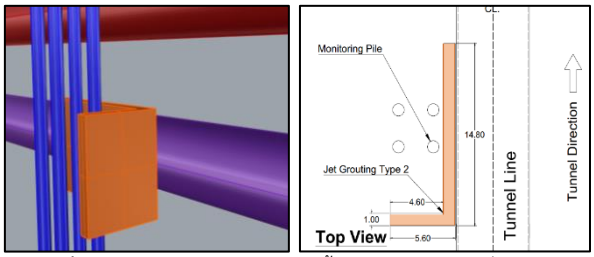
โดยแบบ จำลองของการศึกษานี้ มีความกว้างเท่ากับ 50 เมตร ยาวเท่ากับ 100 เมตร และลึกเท่ากับ 55 เมตร สำหรับขอบเขตการเคลื่อนที่ของระนาบถูกกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวราบ ในขณะที่การเคลื่อน ที่ในทิศทางอื่นเป็นแบบอิสระ ส่วนระนาบที่ด้านล่างของแบบ จำลองถูกกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง แสดงดังรูปที่ 6โดยเงื่อนไขทั้งหมดถูกนำไปใช้กับทุกแบบจำลองสำหรับการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 1 ชั้นดินและแบบจำลองหน้าตัด



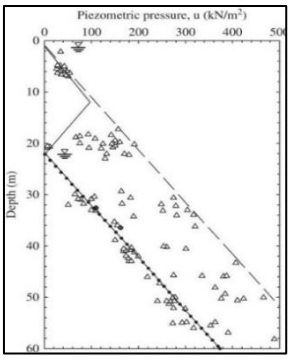
รูปที่ 2 รูปแบบและขนาดของการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ รูปแบบที่ 1



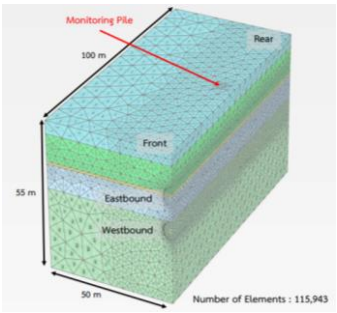
รูปที่ 3 รูปแบบและขนาดของการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ รูปแบบที่ 2

2.2 พารามิเตอร์ของชั้นดินและวัสดุ

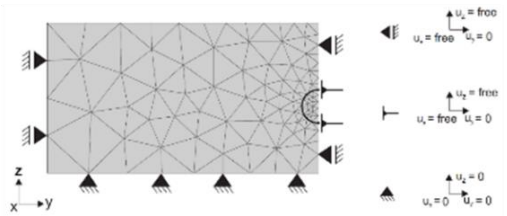
ในการศึกษานี้แบบจำลอง เสาเข็ม ปูนซีเมนต์ (Jet Grouting) และ ดาดอุโมงค์ ใช้แบบจำลองอีลาสติคเชิงเส้น (Linear Elastic Model) โดยอ้างอิงจากค่าพารามิเตอร์จากงานวิจัยก่อนหน้าที่ทำการจำลองการขุดอุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน[1] แสดงในตารางที่ 1 ในส่วนของการจำลองพฤติกรรมของ ดินถม(Fill Material) ดินเหนียวอ่อน(Soft Clay) ดินเหนียวแข็งปานกลาง(Medium Clay) ดินเหนียวแข็งชั้นที่1(1st Stiff Clay) และ ดินทรายชั้นที่1(1st Sand) ใช้ค่าพารามิเตอร์จากงานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีส้ม โดยอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้า[4]ได้ระบุถึง ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์แบบจำลองดินฮาร์ดเดนนิ่ง (Hardening Soil Model) แสดงในตารางที่ 2 และค่าสัมประสิทธิ์ของความดันที่สภาวะอยู่นิ่ง (Coefficient of earth pressure at rest,K_0) ของดินแต่ละชั้นในทุกกรณีศึกษา



รูปที่ 4 ระดับน้ำใต้ดินของชั้นดินกรุงเทพฯ[2]



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงตาข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ



รูปที่ 6 เงื่อนไขขอบเขตของขอบเขตด้านล่าง พื้นผิว และแนวตั้งในแบบจำลองครึ่งสมมาตร

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของงานอุโมงค์ และ เสาเข็ม [1]

วัสดุ	E(GPa)	ν	γkN/m^3)
เสาเข็ม	31	0.20	24.0
ปูนเกร้าท์	1	0.30	21.0
ผนังอุโมงค์	31	0.20	24.0

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของชั้นดิน [4]

พารามิเตอร์	Fill Material	Soft Clay	Medium Clay	1st Stiff Clay	1st Sand
γ(kN/m3)	18.5	16	17	20	21
Cu (kPa)	25	18	31	84	-

C' (kPa)	0	0	5	5	0
Phi' (degree)	25	22	23	24	35
E_{50}^{Ref} (kPa)	6,000	4,500	8,000	20,000	40,000
E_{oed}^{Ref} (kPa)	6,000	4,500	8,000	20,000	40,000
E_{ur}^{Ref} (kPa)	30,000	41,000	72,000	200,000	120,000
m (-)	0.5	1.0	1.0	0.85	0.5
K_0	0.6	0.75	0.71	0.68	0.43

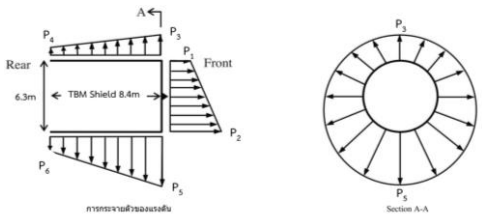
2.3 ขั้นตอนการศึกษา

ทำการจำลองการก่อสร้างอุโมงค์คู่ซ้อน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน 6.3 เมตร โดยมีระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของทั้งสองอุโมงค์มีประมาณ (2D) 12.0 เมตร มีความลึกจากผิวดิน 15.46 เมตร สำหรับEastbound (EB) และ 27.87 เมตร สำหรับWestbound (WB) ตามลำดับ การจำลองหัวเจาะอุโมงค์(TBM) สำหรับการศึกษานี้ใช้วิธีการปรับแรงดันเกร๊าท์ (Modified Grout Pressure Method)[7] รูปที่ 7 จะแสดงการจำลองกระจายตัวแรงดันที่หน้าอุโมงค์ (P_1 ถึง P_2) และตลอดแนวหัวเจาะอุโมงค์(TBM) ยาว 8.4 เมตร (P_3 ถึง P_4 และ P_5 ถึง P_6) ทำการจำลองการขุดอุโมงค์ทีละขั้นตอน ดินจะถูกขุดไปทีละ 1.4 เมตร ตามความกว้างของผนังอุโมงค์ (Segment Lining) และมีความหนาของผนังอุโมงค์ 0.3 เมตร แสดงดังรูปที่8

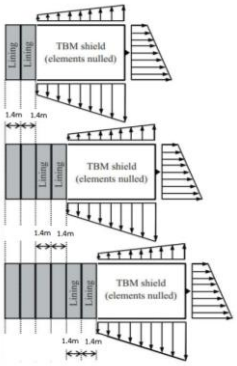
การจำลองเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่ ใช้โครงสร้างคานฝัง (Embedded Beam) โดยได้ทำการคำนวณน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่เสาเข็มสามารถรับได้ (Ultimate Capacity) และควบคุมด้วยค่าความปลอดภัยของเสาเข็ม (Factor of Safety) เท่ากับ 2.5 โดยในกรณีศึกษานี้ เสาเข็มดังกล่าวได้ถูกก่อสร้างและใช้งานมาเป็นเวลานานแล้วก่อนที่จะมีการเริ่มขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งส่งผลให้ไม่มีองค์ประกอบส่วนเกินอันเนื่องมาจากการก่อสร้างเสาเข็มหล่อในที่

การจำลองรูปแบบของการฉีดน้ำปูนซีเมนต์(เกร๊าท์) แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบควบคุมปริมาณของตัวเกร๊าท์ให้เท่ากันที่ 152.72 ลบ.ม. ซึ่งด้านบนสูงกว่าอุโมงค์ Westbound 1.0 เมตร และด้านล่างอยู่ต่ำกว่าอุโมงค์ Westbound 1.0 เมตร เท่ากันทั้ง 2 รูปแบบ

การศึกษาในครั้งนี้จะแบ่งช่วงที่ใช้ในการพิจารณาพฤติกรรมของเสาเข็มที่เกินขึ้นอันเนื่องมาจากอิทธิพลจากการขุดเจาะอุโมงค์เป็น 2 ช่วง คือช่วงที่เริ่มขุดเจาะอุโมงค์ Westbound (อุโมงค์ล่าง) และต่อจากนั้น คือช่วงขุดเจาะอุโมงค์ Eastbound (อุโมงค์บน) ขุดเจาะมาในทิศทางเดียวกัน โดยเว้นระยะเวลาห่างประมาณสามเดือน โดยแต่ละช่วงการพิจารณานั้น จะติดตามดูพฤติกรรมของเสาเข็มตั้งแต่ช่วงที่หัวขุดเจาะอยู่ในตำแหน่งก่อนถึงเสาเข็มเป็นระยะ -2D จนถึง ออกห่างจากเสาเข็มที่ +2D แสดงดังรูปที่9 และ 10



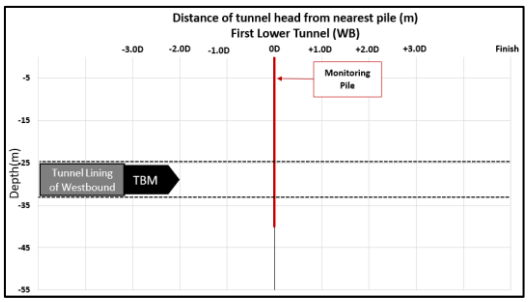
รูปที่ 7 การจำลองกระจายตัวแรงดันที่หน้าอุโมงค์ และตลอดแนวหัวเจาะอุโมงค์ [7]



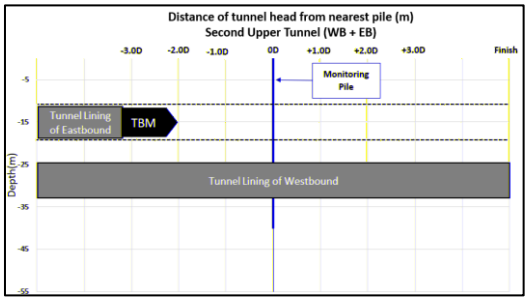
รูปที่ 8 การจำลองการขุดอุโมงค์ทีละขั้นตอน [7]

ตารางที่ 3 ค่าแรงดันหัวเจาะอุโมงค์ [3]

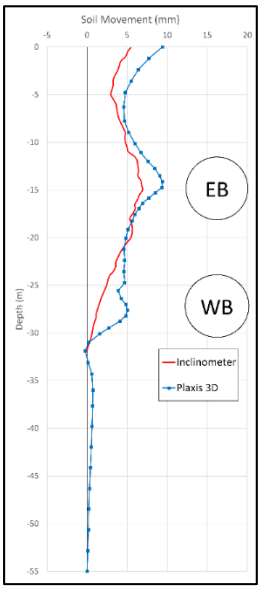
ค่าแรงดัน	Eastbound	Westbound
P_1(kPa)	100	160
P_2(kPa)	195	225
P_3(kPa)	100	160
P_4(kPa)	90	150
P_5(kPa)	195	225
P_6(kPa)	185	215



รูปที่ 9 ตำแหน่งติดตามดูพฤติกรรมของเสาเข็ม ระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ Westbound



รูปที่ 10 ตำแหน่งติดตามดูพฤติกรรมของเสาเข็ม ระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ Eastbound



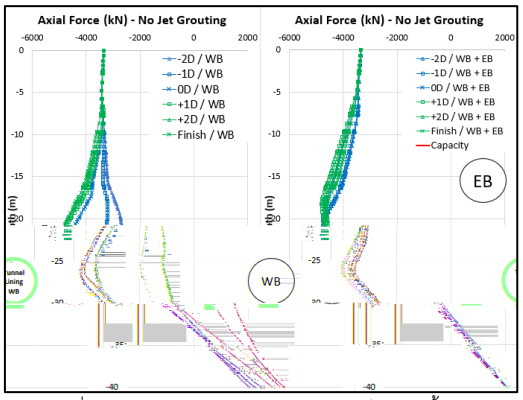
รูปที่ 11 ผลเทียบการตรวจวัดค่าเคลื่อนตัวของดินในแนวตั้งฉากกับแนวอุโมงค์ กับ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3. ผลการวิเคราะห์

3.1 การเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากรูปที่11 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าเคลื่อนตัวของดินจากผลตรวจวัดภาคสนามในแนวตั้งฉากกับแนวอุโมงค์ เทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และพารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ส่งผลให้เป็นตัวบ่งชี้ความถูกต้องของแบบจำลองการศึกษานี้ และจากผลการสอบเทียบจากรูปที่11 ได้นำมาวิเคราะห์ต่อและพบว่าพบว่าค่าการสูญเสียมวลดิน(Ground Loss) ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และพารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้นั้น มีผลลัพธ์เท่ากับ 1.5% จึงได้กำหนดใช้ค่าแรงดันที่หน้าอุโมงค์และตลอดแนวหัวเจาะอุโมงค์ (TBM) แสดงในตารางที่ 3 สำหรับแบบจำลองในส่วนของการวิเคราะห์ทุกกรณีศึกษา

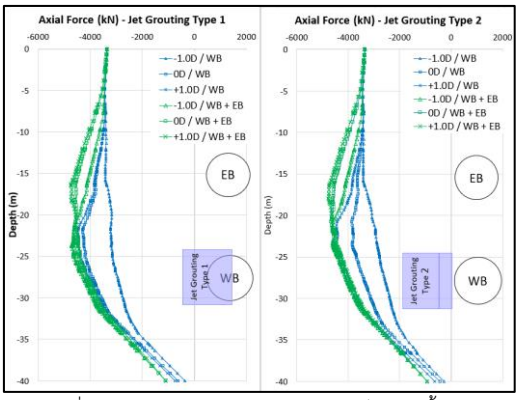
ในทุกผลการวิเคราะห์นั้น จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงในแนวแกนของเสาเข็มทั้งแบบที่ไม่ทำการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ โดยจะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนที่เข้าใกล้ และ ออกห่างจากตำแหน่งของเสาเข็ม โดยแบ่งออกเป็นระยะตั้งแต่ -2D ถึง +2D ของจากการเริ่มขุดเจาะอุโมงค์ Westbound (อุโมงค์ล่าง) ก่อน แล้วต่อด้วย -2D ถึง +2D ของจากการขุดเจาะอุโมงค์ Eastbound (อุโมงค์บน) ต่อเนื่อง



รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงของแรงในแนวแกนของเสาเข็มระยะตั้งแต่ -2D ถึง +2D แบบที่ไม่ทำการฉีดน้ำปูนซีเมนต์

(ก) การเริ่มขุดเจาะอุโมงค์ Westbound (อุโมงค์ล่าง)

(ข) การขุดเจาะต่อเนื่องอุโมงค์ Eastbound (อุโมงค์บน)



รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงของแรงในแนวแกนของเสาเข็มระยะตั้งแต่ -1D ถึง +1D ของจากการเริ่มขุดเจาะอุโมงค์ Westbound (อุโมงค์ล่าง) และ Eastbound (อุโมงค์บน)

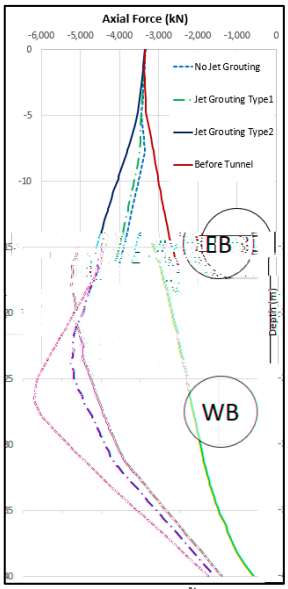
(ก) แบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์รูปแบบที่1

(ข) แบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์รูปแบบที่2

3.2 แรงในแนวแกนของเสาเข็ม

รูปที่12 จะเห็นได้ว่าเมื่อหัวเจาะอุโมงค์ Westbound (อุโมงค์ล่าง) เริ่มเข้าใกล้เสาเข็ม อิทธิพลจากการขุดเจาะอุโมงค์จะส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานลบเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในช่วง -25 ถึง -30 เมตร ของความยาวเสาเข็ม และจะลดลงเมื่อหัวเจาะอุโมงค์เคลื่อนตัวออกห่าง จากนั้นแรงเสียดทานลบในเสาเข็มช่วง -5 ถึง -20 เมตร จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ Eastbound (อุโมงค์บน) ตามลำดับ จากนั้นได้มีการทำแบบจำลองการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ทั้ง 2 รูปแบบและผลการวิเคราะห์พบว่า การฉีดน้ำปูนซีเมนต์ทั้ง 2 รูปแบบนั้น ส่งผลดีต่อแรงในแนวแกนของเสาเข็มเป็นอย่างมาก เป็นไปตามรูปที่ 13 และเมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่มากที่สุดของแต่ละรูปแบบมาเปรียบเทียบกับเสาเข็มที่ยังไม่มีการขุดเจาะอุโมงค์ จะพบว่า การขุดเจาะอุโมงค์โดยไม่ทำการฉีดน้ำปูนซีเมนต์นั้น ส่งผลให้แรงในแนวแกนเพิ่มขึ้นสูงสุด คิด

เป็น 69.5% โดยการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ทั้ง 2 รูปแบบ ช่วยลดแรงในแนวแกนได้ถึง 16.20% ในช่วง -25 ถึง -30 เมตร ของความยาวเสาเข็ม ถ้าเปรียบเทียบกับการไม่ทำการฉีดน้ำปูนซีเมนต์เป็นไปตามรูปที่ 14 และ ยังพบว่าค่าสูงสุดของแรงในแนวแกนแบบจำลองการฉีดน้ำปูนซีเมนต์รูปแบบที่ 2 นั้น อยู่ในช่วง+1D ของการขุดเจาะอุโมงค์Westbound (อุโมงค์ล่าง) + Eastbound (อุโมงค์บน)



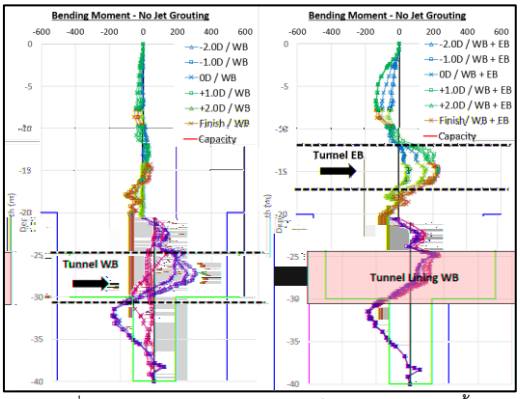
รูปที่ 14 การเปรียบเทียบรูปแบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ที่ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานลบในเสาเข็มมากที่สุด

3.3 โมเมนต์ดัดในเสาเข็ม

รูปที่15 และ 16 แสดงเห็นว่า อิทธิพลเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าโมเมนต์ดัดโดยเมื่อมีการขุดเจาะอุโมงค์ Westbound (อุโมงค์ล่าง) ที่ระดับ -25 ถึง -31 เมตร ค่าโมเมนต์ดัด ช่วงดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มขึ้นจึงสูงสุดที่ช่วง +1D และคงที่ ในส่วนของการขุดเจาะอุโมงค์ Eastbound (อุโมงค์บน) ก็มีลักษณะพฤติกรรมในทางเดียวกัน และเมื่อเทียบกับค่ากำลังการรับโมเมนต์ดัดในเสาเข็ม จากแบบการก่อสร้างจริงของเสาเข็มต้นดังกล่าว ส่งผลให้ช่วงความลึกที่ -30 ถึง -35 เมตร เสาเข็มไม่สามารถรับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นได้ ทั้งในแบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์รูปแบบที่2 และ แบบไม่ทำการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ ส่งผลให้กรณีศึกษานี้ การฉีดน้ำปูนซีเมนต์รูปแบบที่1 ส่งผลดีต่อเสาเข็มในทุกช่วงของการขุดเจาะอุโมงค์

3.4 การเสียรูปทิศทางเข้าหาแนวอุโมงค์ของเสาเข็ม (U_x)

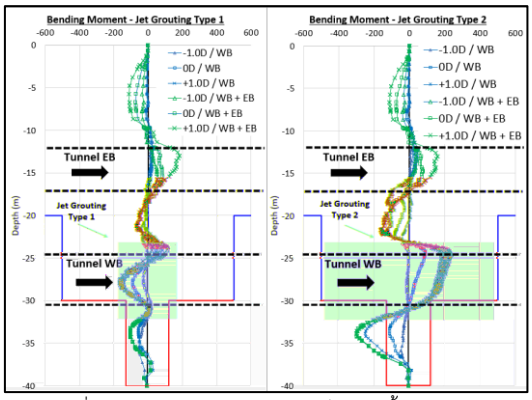
รูปที่17 และ 18 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนตัวในรูปแบบใกล้เคียงกัน โดยรูปแบบการไม่ทำการฉีดน้ำปูนซีเมนต์จะแสดงถึงการเคลื่อนตัวเข้าเสาเข็มในมากในช่วงเริ่มการขุดเจาะอุโมงค์Eastbound (อุโมงค์บน) ในส่วนรูปแบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์แบบที่1 นั้น มีลักษณะการพยายามต้านเคลื่อนตัว (การดัด) เข้าหาแนวอุโมงค์ซึ่งการฉีดน้ำปูนในรูปแบบที่1นั้นส่งผลดีที่สุดในด้านการเคลื่อนตัวเข้าเสาเข็มในทิศทางการเคลื่อนตัวเข้าหาแนวอุโมงค์



รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดในเสาเข็มแบบไม่มีการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ ระยะตั้งแต่ -2D ถึง +2D

(ก) การเริ่มขุดเจาะอุโมงค์ Westbound (อุโมงค์ล่าง)

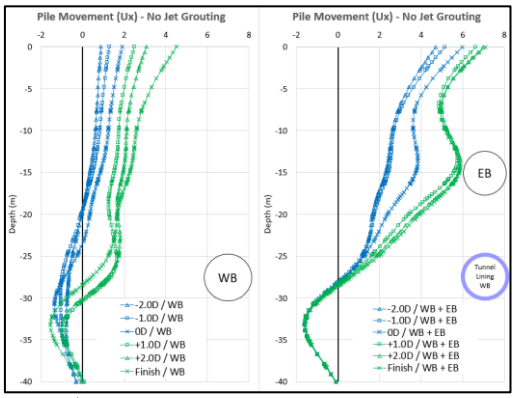
(ข) การขุดเจาะต่อเนื่องอุโมงค์ Eastbound (อุโมงค์บน)



รูปที่ 16 การเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดในเสาเข็มระยะตั้งแต่ -1D ถึง +1D ของจากการเริ่มขุดเจาะอุโมงค์ Westbound (อุโมงค์ล่าง) และ Eastbound (อุโมงค์บน)

(ก) แบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์รูปแบบที่1

(ข) แบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์รูปแบบที่2

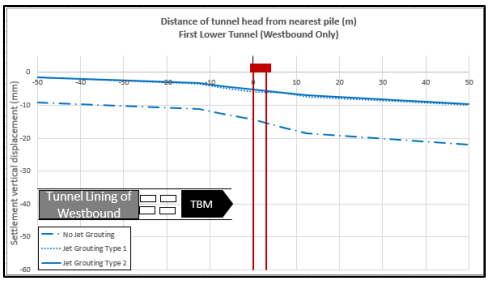


รูปที่ 17 การเคลื่อนตัวของเสาเข็มทิศทางเข้าหาแนวอุโมงค์แบบไม่มีการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ ระยะตั้งแต่ -2D ถึง +2D

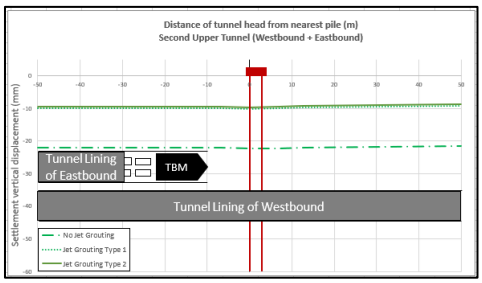
(ก) การเริ่มขุดเจาะอุโมงค์ Westbound (อุโมงค์ล่าง)

(ข) การขุดเจาะต่อเนื่องอุโมงค์ Eastbound (อุโมงค์บน)

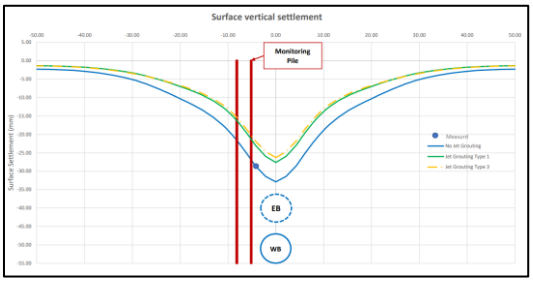
รูปแบบที่1 ส่งผลดีที่สุดต่อพฤติกรรมเสาเข็ม ในส่วนของ โมเมนต์ดัด, การเสียรูปทิศทางเข้าหาแนวอุโมงค์ (U_x) และ การเสียรูปในทิศทางตามแนวขุดเจาะอุโมงค์ (U_y) ส่วนการฉีดน้ำปูนซีเมนต์รูปแบบที่2 ส่งผลดีที่สุดต่อพฤติกรรมเสาเข็ม ในการพิจารณา แรงในแนวแกน และ การทรุดตัวในแนวดิ่ง(U_z)



รูปที่ 21 การทรุดตัวของเสาเข็มทิศตามระยะการขุดเจาะอุโมงค์ Westbound (อุโมงค์ล่าง)



รูปที่ 22 การทรุดตัวของเสาเข็มทิศตามระยะการขุดเจาะอุโมงค์ Westbound (อุโมงค์ล่าง) และ อุโมงค์ Eastbound (อุโมงค์บน)



รูปที่ 23 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดินในทุกกรณีศึกษาครั้งนี้

4.3 จากรูปที่23 จะเห็นได้ว่าในแบบจำลองในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ค่าการสูญเสียมวลดิน(Ground Loss) เท่ากับ 1.5% เป็นค่าตั้งต้นในการทำแบบจำลองที่ไม่ทำการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ และเมื่อได้มีการวิเคราะห์แบบจำลองการฉีดน้ำปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงชั้นดิน ทั้งรูปแบบที่1 และรูปแบบที่2 ส่งผลให้ค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground Loss) หลังปรับปรุงเท่ากับ 1.17% และ 1.13% ตามลำดับ ทำให้รูปแบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์แบบที่2 นั้น ส่งผลดีในด้านการลดค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground Loss) ได้ดีกว่า ถึงแม้ว่ารูปแบบการฉีดน้ำปูนซีเมนต์แบบที่1 นั้นจะมีความสามารถในการลดพฤติกรรมของเสาเข็ม ที่เพิ่มขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์ที่ดีกว่าก็ตาม

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Lueprasert, P., Jongpradist, P., Suwansawat, S. (2017). Tunneling simulation in soft ground using shell elements and grouting layer, International Journal of GEOMATE 12(31),51-557. DOI: 10.21660/2017.31.6535

[2] Likitlersuang, S., Surarak, C., Suwansawat, S., Wanatowski, D., Oh, E., & Balasubramaniam, A. (2014). Simplified finite-element modelling for tunnelling-induced settlements. GeotechnicalResearch,1(4),133-152.doi:10.1680/gr.14.00016

[3] Surarak, C. (2011). Geotechnical Aspects of the Bangkok MRT Blue Line Project. (PhD thesis). Griffith School of Engineering Science, Environment, Engineering and Technology, Griffith University, Queensland, Australia, Retrieved from http://hdl.handle.net/10072/367320

[4] N. Phien-wej, M. Humza, Z.Z. Aye (2012). Numerical modeling of diaphragm wall behavior in Bangkok soil using hardening soil model.

[5] P. Yensri1, P. Kitiyodom1, A. Asanprakit1, O. Duangsano1 and N. Phien-Wej2 (2022). Assessment of Tunnelling on Existing Pile Foundations in Bangkok MRT Orange Line. ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2022 and 47th General Assembly Bella Center, Copenhagen 22-28 April 2022

[6] Möller, S. C. (2006). Tunnel induced settlements and structural forces in linings. (PhD Thesis). The University of Stuttgart, Institute of Geotechnical Engineering, Stuttgart, Germany, Retrieved from https://www.igs.uni-stuttgart.de/dokumente/Mitteilungen/54_Moeller.pdf

[7] S.W.Lee, W.W.L. Cheang , W.M. Swolfs & R.B.J. Brinkgreve (2009). Tunnelling Near a Building Supported by End-bearing Piles. Hong Kong Tunnelling Conference 2009.

[8] Nagen Loganathan, PhD Principal Professional Associate January 2011.An Innovative Method For Assessing Tunnelling-Induced Risks To Adjacent Structures.

[9] Ahmed N. EL-Atta(2018). Reducing the Tunnelling Effecton Adjacent Pile Foundations. Springer International Publishing AG 2018 S. Agaiby and P. Grasso (eds.), Engineering Challenges for Sustainable Underground Use, Sustainable Civil Infrastructures, DOI 10.1007/978-3-319-61636-0_13