

การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างของการขุดอุโมงค์คู่แบบด้านต่อด้านที่มีผลต่อเสาเข็มที่มีอยู่เดิมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ 3D FINITE ELEMENT INVESTIGATION ON INFLUENCE OF THE LAGGING DISTANCE BETWEEN SIDE-BY-SIDE TWIN TUNNELING ON EXISTING PILE

สมเกียรติ เลิศกุลทาทานนท์¹, ชนา พุทธนานนท์^{1*}, นฤนาท เหมะ², พรเกษม จงประดิษฐ์¹ และ โอโชค ต้วงโสน³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, จังหวัดกรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, จังหวัดกรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

³ วิศวกรอุโมงค์, บริษัทวิศวกรรมธรณีและฐานราก จำกัด, จังหวัดกรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*Corresponding author address: chana.put13@gmail.com

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันจำนวนระบบขนส่งมวลชนใต้ดินในชุมชนเมืองที่มีความหนาแน่นมีการเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุโมงค์คู่ ด้วยเหตุนี้อุโมงค์จึงถูกก่อสร้างใกล้กับโครงสร้างที่มีอยู่เดิม (เช่น โครงสร้างเสาเข็ม) อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จากการศึกษาในอดีตพบว่าการก่อสร้างอุโมงค์ใหม่นั้นสามารถก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินที่มากเกินไป ซึ่งการเคลื่อนตัวนี้อาจทำให้เสาเข็มใกล้เคียงเสียหาย ดังนั้นผลกระทบของการขุดอุโมงค์คู่ที่มีต่อเสาเข็มที่มีอยู่เดิมนั้นควรถูกพิจารณา อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่ได้พิจารณาอิทธิพลเนื่องจากระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเสาเข็ม ดังนั้นการศึกษานี้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติถึงอิทธิพลของการขุดอุโมงค์คู่แบบด้านต่อด้านต่อพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวที่มีอยู่เดิม เพื่อที่จะเข้าใจอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของการขุดอุโมงค์คู่ต่อพฤติกรรมของเสาเข็มระยะห่างที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่าง $0L_S$ และ $8L_S$ เมื่อ L_S คือความยาวของตัวหัวเจาะ ถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษา วิธีจำลองและพารามิเตอร์ของดินได้รับการสอบเทียบกับการขุดอุโมงค์ของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพลายสีน้ำเงิน โดยผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของการขุดอุโมงค์คู่ไม่เพียงส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อการเสถียรของดินแต่ยังส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของเสาเข็มที่มีอยู่เดิมด้วย

คำสำคัญ: อุโมงค์คู่แบบด้านต่อด้าน, ระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของการขุดอุโมงค์คู่, การศึกษาอิทธิพลของตัวแปร

Abstract

Nowadays, there is a growing number of underground transportation systems in congested urban areas, especially twin tunnels. Consequently, these tunnels are unavoidably constructed adjacent to the existing structures (e.g., piled foundations). According to a large number of previous studies, they indicated that a new tunnel construction can cause an excessive ground movement and lead to a damage on the existing nearby piles. Therefore, the impact of twin tunneling on the existing piles should be comprehensively investigated. However, various studies have never been considered the influence of lagged distances between the twin tunnel faces on pile behaviors. In this study, a three-dimensional numerical analysis is performed to investigate the influence of side-by-side twin tunneling on the behaviors of the existing single pile. To understand the influence of lagging distance on the behaviors of existing pile, two different lagging distances (i.e., $0L_S$ and $8L_S$ where L_S is shield length) are carried out as the case studies. The finite element procedure and soil parameters are calibrated against well-documented tunneling case history of Bangkok MRTA blue line project. Numerical results indicate that the lagging distance between twin tunnel faces significantly affects not only on the ground movement but also on the behaviors of the existing pile.

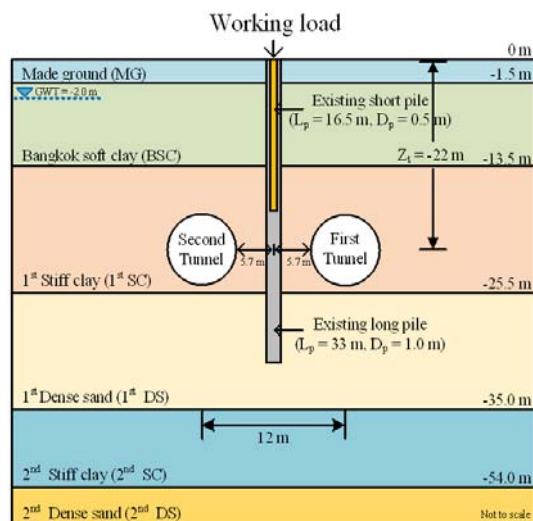
Keywords: Side-by-side twin tunneling, Lagging distance between twin tunnel faces, Parametric study

1. บทนำ

การก่อสร้างอุโมงค์ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินบริเวณโดยรอบหัวเจาะเนื่องจากในกระบวนการขุดอุโมงค์ ดินโดยรอบหัวเจาะจะสูญเสียเสถียรภาพ ส่งผลให้ความสามารถในการรับความเค้นของดินลดลง โดยที่การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นโดยรอบหัวเจาะสามารถ

ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่ผิวดิน หรืออาจก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างที่อยู่ใกล้เคียงได้ [1] จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการขุดอุโมงค์ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อเสาเข็มที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง โดยก่อให้เกิดการทรุดตัวและการเสถียรในทิศทางด้านข้างเพิ่มขึ้น รวมทั้งเกิดการเพิ่มขึ้นของแรงและโมเมนต์ดัดในแนวแกนของเสาเข็ม ซึ่งทั้งหมดนี้อาจส่งผลกระทบต่อเสาเข็ม

หรือโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนเสาเข็มได้ [2] โดยเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลเนื่องจากการขุดอุโมงค์ต่อเสาเข็มข้างเคียงพบว่าอิทธิพลที่เกิดขึ้นนั้นค่อนข้างมีความซับซ้อนและมีรูปแบบที่หลากหลายขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ ขนาดและตำแหน่งปลายของเสาเข็ม, ขนาดและตำแหน่งความลึกของอุโมงค์, ตำแหน่งที่สัมพันธ์กันระหว่างอุโมงค์และเสาเข็ม และการสูญเสียมวลดินระหว่างการขุดอุโมงค์ [3] ยิ่งไปกว่านั้น ในทางปฏิบัติอุโมงค์คู่ค่อนข้างได้รับความนิยมอย่างมากในระบบการขนส่งมวลชนใต้ดินเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการขนส่งที่ดีกว่าอุโมงค์เดี่ยว แต่ในทางกลับกันผลกระทบเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่นั้นก็มีมากกว่าการขุดอุโมงค์เดี่ยวอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในอดีตที่ผ่านมาจึงมีงานวิจัยหลายงานที่ทำการศึกษาลงถึงอิทธิพลเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่ต่อเสาเข็มข้างเคียงโดยคำนึงถึงเพียงแค่ปัจจัยที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นเท่านั้น โดยที่ไม่ได้คำนึงถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของทั้งสองอุโมงค์ (Lagging Distance, L_p) ในทางปฏิบัติสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์คู่ การก่อสร้างอุโมงค์ที่สองไม่ได้มีความจำเป็นที่จะต้องเริ่มขุดหลังจากที่อุโมงค์แรกก่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วเสมอไป แต่สามารถทำการขุดไปพร้อม ๆ กับการขุดอุโมงค์แรกได้ โดยงานวิจัยในอดีตได้ระบุไว้ว่าการก่อสร้างอุโมงค์คู่ด้วยระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่แตกต่างกันสามารถส่งผลให้เกิดรูปแบบของการเคลื่อนตัวของดินที่แตกต่างกันซึ่งมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเสียรูปและการเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์ที่ไม่เหมือนกัน [7] - [9] ดังนั้นการทำความเข้าใจถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่แตกต่างกันของการก่อสร้างอุโมงค์คู่จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรได้รับการพิจารณาและสามารถนำไปสู่ความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเสาเข็มข้างเคียงเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่ได้

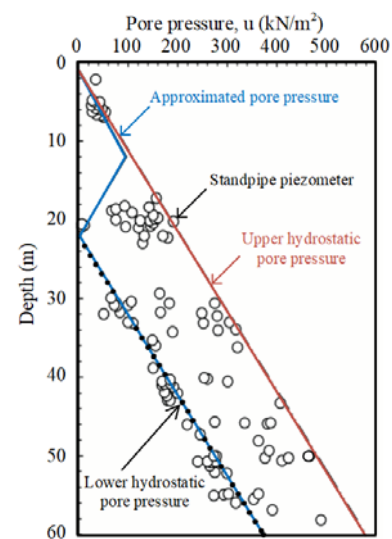


รูปที่ 1 ชั้นดินและหน้าตัดของแบบจำลองในการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว เมื่อได้รับอิทธิพลเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่แบบด้านต่อด้าน (Side-by-Side Twin Tunnel) โดยพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของทั้งสองอุโมงค์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำการวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของทั้งสองอุโมงค์ต่อค่าการทรุดตัว, การเสียรูปด้านข้าง, การเปลี่ยนแปลงของแรง และโมเมนต์ดัดในแนวแกนของเสาเข็มเดี่ยวข้างเคียงที่มีอยู่ก่อนหน้าการขุดอุโมงค์ โดยเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ของการขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อม ๆ กัน

2. ระเบียบวิธีการศึกษา

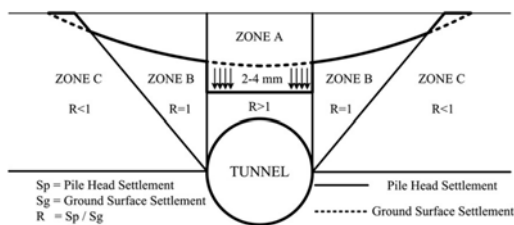
งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D จำลองการขุดอุโมงค์คู่ที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะผ่านเสาเข็มเดี่ยวข้างเคียงที่มีอยู่ก่อนการก่อสร้างอุโมงค์คู่ เพื่อศึกษาอิทธิพลที่เกิดขึ้นภายในเสาเข็มเดี่ยว โดยการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และพารามิเตอร์ของวัสดุโดยเปรียบเทียบกับผลตรวจวัดภาคสนาม [10] โดยการจำลองการขุดอุโมงค์คู่ขนาน ตามข้อมูลชั้นดิน (แสดงดังรูปที่ 1) และดำเนินการวิเคราะห์ตามขั้นตอนการก่อสร้างจริงของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน (MRTA Blue Line Project) หน้าตัด 23 AR-001 จังหวัดกรุงเทพมหานคร [10] ภายใต้แรงดันน้ำใต้ดินกรุงเทพฯ [11] แสดงดังรูปที่ 2 ส่วนที่สองคือการวิเคราะห์เชิงตัวแปร (Parametric Study) เพื่อศึกษาอิทธิพลที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็มเดี่ยวเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่ที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะ โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของการขุดอุโมงค์คู่ต่อเสาเข็มเดี่ยวทั้งหมด 2 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 เสาเข็มเดี่ยวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร และยาว 16.5 เมตร รูปแบบที่ 2 เสาเข็มเดี่ยวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร และยาว 33



รูปที่ 2 ระดับน้ำใต้ดินของชั้นดินกรุงเทพฯ [11]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของดินที่ใช้ในแบบจำลอง

พารามิเตอร์	MG [3]	BSC [3]	1 st SC [3]	1 st DS [3]	2 nd SC [15]	2 nd DS [3]
γ (kN/m ³)	17	16	18	20	20	22
E' (kPa)	6,000	-	-	20,000	-	30,000
E_{50}^{ref} (kPa)	-	5,000	20,000	-	35,200	-
E_{oed}^{ref} (kPa)	-	5,000	20,000	-	35,200	-
E_{ur}^{ref} (kPa)	-	15,000	60,000	-	105,700	-
ν	0.32	0.33	0.33	0.30	0.2	0.30
m	-	1	1	-	1	-
c' (kPa)	8	5	18	0	20	0
ϕ' (degree)	22	22	22	36	24	36
พฤติกรรมของวัสดุ	Drained	Undrained (A)	Drained	Undrained (A)	Drained	Undrained (A)



รูปที่ 3 แผนภาพการทรุดตัวของเข็มที่ตำแหน่งต่าง ๆ เนื่องจากการขุดอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะแรงดันดินสมดุลในชั้นดินลอนดอน [14]

เมตร เพื่อให้การศึกษานี้ครอบคลุมทั้งกรณีของการขุดอุโมงค์คู่ม่านเสาเข็มสั้น (บริเวณ A) และเสาเข็มยาว (บริเวณ B และ C) แสดงดังรูปที่ 3 ตามลำดับ โดยการศึกษาที่ใช้ข้อมูลเสาเข็มของตึก BECM [12] ที่ตั้งอยู่บริเวณใกล้เคียงกับหน้าตัดอุโมงค์ที่นำมาเป็นกรณีศึกษา

2.1. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 4 แสดงถึงขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Boundary Conditions) และ โครงตาข่าย (Mesh) สำหรับการศึกษา จากงานวิจัยในอดีต [13] ได้ระบุไว้ว่าขนาดของแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับงานอุโมงค์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิตินั้นต้องมีระยะของแบบจำลองในด้านข้างอย่างน้อย $4D_T$ จากตำแหน่งศูนย์กลางของอุโมงค์ ระยะด้านหน้าและด้านหลังของหัวเจาะต้องมีค่าอย่างน้อย $4D_T$ เมื่อ D_T คือเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของอุโมงค์ โดยขนาดของแบบจำลองสำหรับการศึกษาที่มีความกว้าง 120 เมตร ($\approx 19D_T$), ยาว 120 เมตร ($\approx 19D_T$) และลึก 80 เมตร ($\approx 12.7D_T$) จากผิวดิน สำหรับเงื่อนไขขอบเขตการเคลื่อนที่ (Displacement Boundary) ของระนาบที่ตั้งอยู่ทั้งหมดถูกกำหนดให้ยึดตรึงไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบ ส่วนระนาบในแนวนอนที่ขอบด้านล่างของ

แบบจำลองนั้นถูกยึดตรึงไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง โดยเงื่อนไขทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้ถูกนำไปใช้กับทุกแบบจำลองในทุกกรณีสำหรับการศึกษานี้

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของอุโมงค์ และ เสาเข็ม [13]

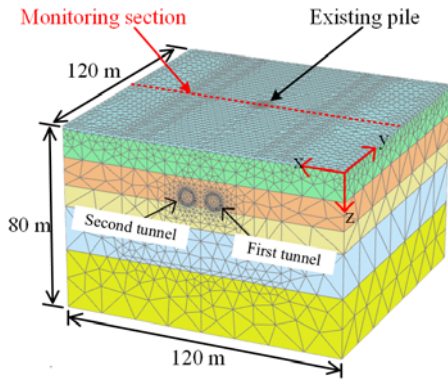
วัสดุ	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)
ดาตอโมงค์	31×10^6	0.20	24
หัวเจาะ	210×10^6	0.28	78
ชั้นปูนประสาน	1×10^6	0.30	21
เสาเข็ม	31×10^6	0.20	24

2.2. ชั้นดินและพารามิเตอร์ของวัสดุ

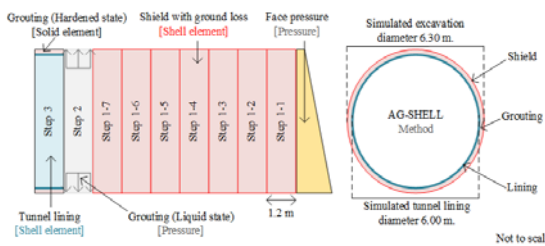
ในการศึกษานี้ใช้แบบจำลองดินฮาร์ดเดนนิ่ง (Hardening Soil Model) ในการจำลองพฤติกรรมดินเหนียวอ่อน (BSC) และดินเหนียวแข็ง (SC) สำหรับชั้นดินถม (MG) และดินทราย (DS) ใช้แบบจำลองดินมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model) ในการจำลองพฤติกรรมดิน โดยพารามิเตอร์วัสดุของดินที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 1 สำหรับเสาเข็ม, หัวเจาะ และอุโมงค์ประยุกต์ใช้แบบจำลองอีลาสติคเชิงเส้น (Linear Elastic Model) ในการจำลองพฤติกรรมโดยอ้างอิงพารามิเตอร์วัสดุจากงานวิจัยก่อนหน้าที่ทำกรจำลองการขุดอุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน [13] ดังแสดงในตารางที่ 2

2.3. ขั้นตอนการจำลอง

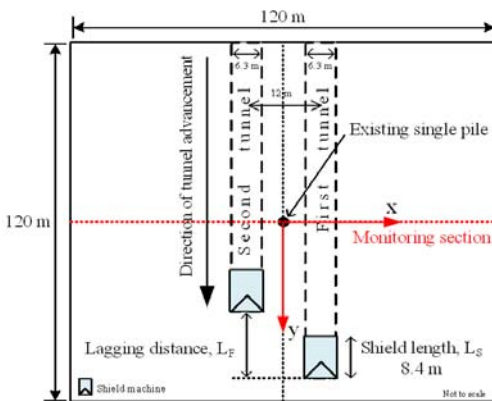
ในทุก ๆ กรณีศึกษา ความเค้นเริ่มต้นถูกจำลองโดยคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง (Coefficient of earth pressure at rest, K_0) ของดินในแต่ละชั้น หลังจากนั้นทำการจำลองเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่โดยใช้โครงสร้างคานฝัง (Embedded Beam) กำหนดให้มีแรงกระทำที่หัวเสาเข็ม (Working



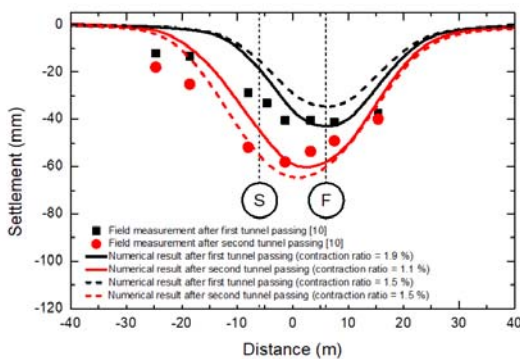
รูปที่ 4 โครงสร้างของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 5 ขั้นตอนจำลองกระบวนการขุดอุโมงค์



รูปที่ 6 ภาพด้านบนของแบบจำลองในกรณีศึกษา



รูปที่ 7 ผลสอบเทียบการทรุดตัวของผิวดิน ณ ระยะเวลาตรวจวัด(Monitoring Section)

Load) เท่ากับน้ำหนักบรรทุกทุกที่ยอมให้ของเสาเข็ม (Ultimate Capacity) ทหารด้วยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสาเข็ม (Factor of Safety) เท่ากับ 2.5 [3] โดยในการศึกษานี้จะไม่พิจารณาอิทธิพลเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็ม และพิจารณาว่าอุโมงค์เริ่มทำการก่อสร้างหลังจากการก่อสร้างเสาเข็มเสร็จแล้วนานมากจนกระทั่งแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มสลายไปหมดแล้ว

หลังจากการจำลองการมีอยู่ของเสาเข็มเดี่ยว ขั้นตอนต่อไปคือการจำลองการก่อสร้างอุโมงค์คู่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_T) เท่ากับ 6.3 เมตร โดยที่ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของทั้งสองอุโมงค์มีค่าเท่ากับ 12 เมตร และมีความลึก 22 เมตรจากผิวดิน การจำลองการขุดอุโมงค์สำหรับการศึกษานี้ประยุกต์ใช้วิธีการขุดอุโมงค์ด้วยการใช้หัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance) โดยทำการจำลองการขุดทีละขั้นตอน (Step-by-Step Approach) [7] ร่วมกับวิธี AG-Shell Method [13] ในแต่ละขั้นตอนของการขุดอุโมงค์ ดินจะถูกขุดไปที่ละ 1.2 เมตร ตามความกว้างของผนังอุโมงค์ (Segmental Lining) ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยรายละเอียดวิธีการจำลองการขุดอุโมงค์แสดงอยู่ในงานวิจัยก่อนหน้า [13]

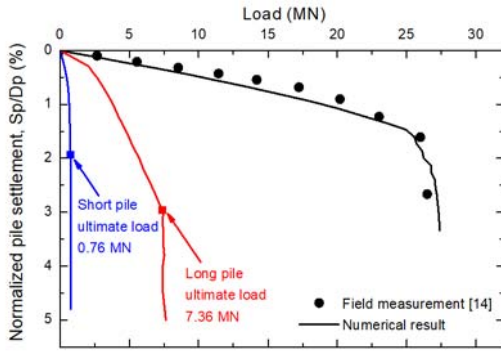
เมื่อจำลองการขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ด้านขวา) จนถึงระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่ทำการศึกษา ทำการจำลองการขุดอุโมงค์ด้านซ้ายตามมา โดยควบคุมระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะทั้งสองให้คงที่ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 6 โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะทั้งหมดสองค่าคือ $0L_S$ และ $8L_S$ เมื่อ L_S คือความยาวของหัวเจาะ โดยกรณีระยะห่างเท่ากับ $0L_S$ หมายถึงกรณีที่หัวเจาะของอุโมงค์ทั้งสองขุดไปพร้อมกัน และกรณี $8L_S$ หมายถึงกรณีที่หัวเจาะของอุโมงค์ที่สองขุดตามหลังอุโมงค์แรกโดยพิจารณาระยะห่างที่มากจนอิทธิพลเนื่องจากการขุดอุโมงค์แรกหมดไปแล้ว (Steady State) [8]

3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

3.1. การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

รูปที่ 7 และ 8 แสดงผลการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขุดอุโมงค์คู่และแบบจำลองการรับกำลังในแนวแกนของเสาเข็มเดี่ยวตามลำดับ จากผลสอบเทียบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และพารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการศึกษารับรู้ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลตรวจวัดในสนามทั้งค่าการทรุดตัวของผิวดินเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่และผลทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว

จากผลสอบเทียบในรูปที่ 7 พบว่าค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground Loss) ที่ทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้รับจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับผลตรวจวัดภาคสนามเหมาะสมที่สุดคือ ค่าการสูญเสียมวลดินเท่ากับ 1.9% สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์การรับน้ำหนักของเสาเข็ม

แรกและ 1.1% สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ที่สอง เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวข้างเคียง งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่าการสูญเสียมวลดินของทั้งสองอุโมงค์มีค่าที่เท่ากัน โดยทำการเฉลี่ยค่าการสูญเสียมวลดินของทั้งสองอุโมงค์ที่ได้จากการสอบเทียบความถูกต้องซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1.5% เพื่อใช้สำหรับแบบจำลองในส่วนของกรณีวิเคราะห์เชิงตัวแปรที่ควบคุมให้อิทธิพลจากการขุดอุโมงค์ของทั้งสองหัวเจาะเท่ากัน

3.2. น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็ม

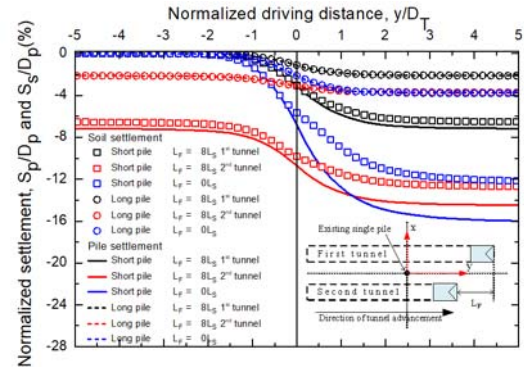
จากรูปที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์การรับน้ำหนักของเสาเข็มสั้นและเสาเข็มยาว จากผลการจำลองพบว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มสั้นและยาวมีค่าเท่ากับ 0.76 และ 7.36 เมกะนิวตันตามลำดับ โดยเมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสาเข็มเท่ากับ 2.5 [3] เสาเข็มสั้นและยาวจะได้รับแรงกระทำในแนวตั้งเท่ากับ 0.30 และ 2.94 เมกะนิวตันตามลำดับ ก่อนการจำลองการขุดอุโมงค์คู่

3.3. การทรุดตัวของเสาเข็ม

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของหน้าหัวเจาะในทิศทางขุดอุโมงค์ที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalize) ด้วยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ (y/D_T) และค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่มีอยู่ก่อนหน้าการขุดอุโมงค์และการทรุดตัวของดินข้างเสาเข็มเดี่ยวที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานด้วยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็ม (S_p/D_p) และ (S_s/D_p) ตามลำดับ โดยในการศึกษานี้พิจารณาเพียงการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการขุดอุโมงค์เท่านั้น

จากรูปแสดงให้เห็นว่าเสาเข็มจะเกิดการทรุดตัวเมื่อหัวเจาะของอุโมงค์เคลื่อนที่ใกล้เข้ามาถึงตำแหน่งเสาเข็ม ($-1.5D_T$ ถึง $+2.5D_T$) เนื่องจากเกิดการสะสมของมวลดินที่สูญเสียไประหว่างการขุดอุโมงค์ โดยเมื่อพิจารณาการทรุดตัวสุดท้ายของเสาเข็มในกรณีของ

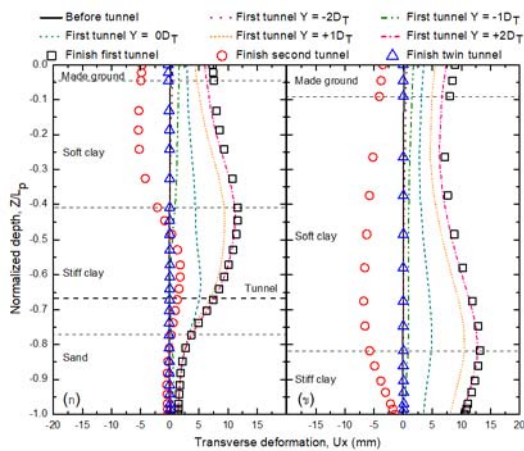
การขุดอุโมงค์คู่ที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ อิทธิพล



รูปที่ 9 การทรุดตัวของเสาเข็มและดินเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่

ที่เกิดจากการขุดอุโมงค์คู่ส่งผลกระทบต่อเสาเข็มสั้นและเสาเข็มยาวในรูปแบบที่แตกต่างกัน [4] ในกรณีของการขุดอุโมงค์คู่ผ่านเสาเข็มสั้น ปลายของเสาเข็มวางอยู่บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากหัวเจาะโดยตรง ทำให้กำลังรับแรงแบกทางที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) ลดลงอย่างมาก ส่งผลให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัวที่มากกว่าดินโดยรอบเพื่อที่จะกลับเข้าสู่สภาวะสมดุล [4] แต่ในกรณีของการขุดอุโมงค์คู่ผ่านเสาเข็มยาวซึ่งมีตำแหน่งปลายเสาเข็มอยู่ต่ำกว่าระดับอุโมงค์มาก อิทธิพลเนื่องจากการขุดอุโมงค์จึงส่งผลกระทบต่อเพียงแคบบางส่วนของเสาเข็มยาว โดยการขุดอุโมงค์ผ่านเสาเข็มยาวทำให้เกิดแรงฉุด (Drag Load) เนื่องจากการจำลองการขุดอุโมงค์ (Ground Loss) ขึ้นบริเวณเสาเข็มส่วนที่อยู่เหนือกว่าจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ ทำให้ดินรอบ ๆ เสาเข็มเคลื่อนตัวเข้าหาอุโมงค์ ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานลบที่ผิว (Negative Skin Friction) กระทำต่อเสาเข็มเพื่อให้เกิดความสมดุลเสาเข็มส่วนที่อยู่ต่ำกว่าจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากการขุดอุโมงค์จะเกิดการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานบวกที่ผิว (Positive Skin Friction) และความสามารถในการต้านทานแรงแบกทางที่ปลายเสาเข็ม (End-Bearing Resistance) เพื่อต้านอิทธิพลที่เกิดขึ้นในเสาเข็มส่วนบนเนื่องจากการขุดอุโมงค์ [3] ส่งผลให้เสาเข็มยาวเกิดการทรุดตัวเนื่องจากการขุดอุโมงค์ที่น้อย การทรุดตัวของเสาเข็มสั้น โดยจากรูปที่ 9 ค่าการทรุดตัวเสาเข็มยาว (36.80 มม.) เนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่ที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ มีค่าประมาณ 50.91% เทียบกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นของเสาเข็มสั้น (72.28 มม.) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [4] เมื่อพิจารณาการทรุดตัวสุดท้ายของเสาเข็มสั้นในกรณีของการขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อมกัน เสาเข็มสั้นมีการทรุดตัวที่มากขึ้นเท่ากับ $1.43\%D_p$ (9.0 มม.) เมื่อเทียบกับการทรุดตัวสุดท้ายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่ที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ เนื่องจากอิทธิพลของหัวเจาะที่ขุดไปพร้อมกันส่งผลให้เสาเข็ม

สันเกิดการสูญเสียกำลังรับแรงแบกทางที่ปลายเสาเข็มได้มากกว่า การขุดอุโมงค์คู่ที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ แต่ในกรณีที่ทำกรขุดอุโมงค์คู่พร้อมกันผ่านเสาเข็มยาว การทรุดตัวสุดท้ายที่เกิดขึ้นจากการขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อมกันมีค่าใกล้เคียง (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ) เมื่อเทียบกับการทรุดตัวสุดท้ายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่ที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ เนื่องจากการทรุดตัวที่เกิดจากแรงเสียดทานลบบที่บริเวณผิวของเสาเข็มเนื่องจากการขุดอุโมงค์ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความสำคัญต่อการทรุดตัวของเสาเข็ม ดังนั้นการขุดอุโมงค์คู่ในกรณีที่มีและไม่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะจึงส่งผลให้เสาเข็มยาวเกิดการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกัน

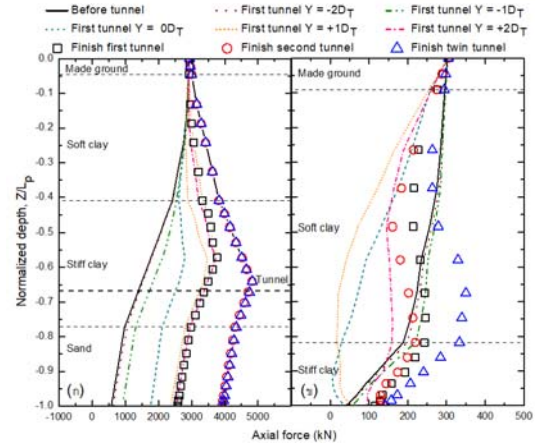


รูปที่ 10 การเสีรูปร่างข้างที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม
(ก) เสาเข็มยาว (ข) เสาเข็มสั้น

3.4. การเสีรูปร่างข้างของเสาเข็ม

รูปที่ 10(ก) และ 10(ข) แสดงการเสีรูปร่างข้าง (U_x) ตลอดความลึกของเสาเข็มของเสาเข็มยาวและสั้นตามลำดับ ตำแหน่งความลึกของเสาเข็มถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานด้วยความยาวของเสาเข็ม (Z/L_p) เพื่อให้ง่ายต่อการอภิปรายผลการวิเคราะห์เนื่องจากการขุดอุโมงค์ การขุดอุโมงค์คู่ผ่านเสาเข็มยาวที่มีอยู่โดยมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ แสดงในรูปที่ 10(ก) เมื่อหัวเจาะของอุโมงค์แรกเคลื่อนที่ใกล้เข้ามาถึงตำแหน่งเสาเข็ม ($-1.5D_T$ ถึง $+2.5D_T$) เสาเข็มจะได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดอุโมงค์ และส่งผลให้เกิดการเสีรูปร่างข้างที่คล้ายกันกับการขุดอุโมงค์ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [2] แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่เกิดการเสีรูปร่างข้างสูงสุดของเสาเข็มไม่ได้เกิดที่ความลึกเดียวกับความลึกของอุโมงค์ (Tunnel Springline) แต่เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับตำแหน่งการเปลี่ยนชั้นดินจากชั้นดินเหนียวอ่อนไปยังชั้นดินเหนียวแข็ง ด้วยเหตุที่ว่าเสาเข็มเกิดการดัดกลับเนื่องจากความแตกต่างของค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของดินทั้งสองชั้น และเมื่ออุโมงค์ที่สองขุดตามมาด้วยด้วยระยะห่างระหว่าง

หน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ เสาเข็มจะเกิดการดัดกลับไปในทิศทางที่อุโมงค์ที่สองถูกขุด โดยพฤติกรรมนี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับการขุดอุโมงค์คู่ผ่านเสาเข็มสั้นที่มีอยู่โดยมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ ดังแสดงในรูปที่ 10(ข)



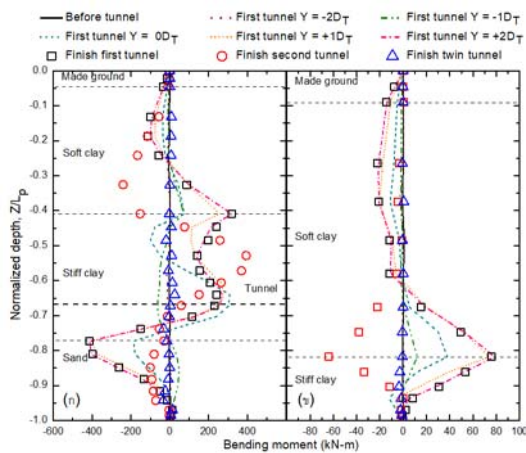
รูปที่ 11 แรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม
(ก) เสาเข็มยาว (ข) เสาเข็มสั้น

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อม ๆ กันพบว่าไม่มีการเสีรูปร่างข้างของเสาเข็มทั้งในกรณีของเสาเข็มสั้นและยาว ซึ่งอาจเกิดจากการที่การเคลื่อนตัวของดินในด้านข้างและขวาของเสาเข็มที่เกิดจากการขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อมกันนั้นมีขนาดใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าการเสีรูปร่างข้างของเสาเข็มเนื่องจากการขุดอุโมงค์จะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบของการเคลื่อนตัวของดินที่มากระทำ ดังนั้นการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของทั้งสองอุโมงค์จึงส่งผลให้เกิดการเสีรูปร่างของเสาเข็มที่แตกต่างกัน

3.5. การเปลี่ยนแปลงแรงในแนวแกนของเสาเข็ม

รูปที่ 11(ก) และ 11(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงในแนวแกนตลอดความลึกของเสาเข็มยาวและสั้นตามลำดับ โดยจากรูปที่ 11(ก) แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการขุดอุโมงค์คู่ผ่านเสาเข็มยาวที่มีอยู่โดยมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ เมื่อทำการขุดอุโมงค์แรกใกล้เข้ามาในช่วงอิทธิพล ($-1.5D_T$ ถึง $+2.5D_T$) อิทธิพลเนื่องจากการขุดอุโมงค์แรกจะส่งผลให้ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานลบบที่ผิวชั้น ด้วยเหตุนี้ทำให้แรงในแนวแกนของเสาเข็มเพิ่มขึ้น โดยที่หลังจากการขุดอุโมงค์แรกเสร็จสิ้น แรงในแนวแกนสูงสุดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มยาวมีค่าเท่ากับ 825 กิโลนิวตัน (คิดเป็น 28.06% ของน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็มยาว) ณ ตำแหน่ง $Z/L_p = -0.57$ เหนือจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ และเมื่อทำการขุดอุโมงค์สองเสร็จสิ้น แรงในแนวแกนของเสาเข็มยาวยังคงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยหลังก่อสร้างอุโมงค์สองแล้วเสร็จ แรงในแกนสูงสุดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มยาวมีค่าเท่ากับ 1,878 กิโลนิวตัน (คิดเป็น 63.88% ของน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้) ซึ่งมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้า

[4] อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากรณีที่ทำให้การขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อมกัน อิทธิพลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่อันไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงแรงในแนวแกนของเข็มยาว โดยจากรูปที่ 11(ก) แสดงให้เห็นว่าการขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อม ๆ กัน ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นในเสาเข็มยาวหลังขุดอุโมงค์คู่อุโมงค์คู่ทั้งสองกรณีผ่านเสาเข็มยาวที่มีอยู่ส่งผลให้ดินเกิดการเคลื่อนตัวสุดท้ายใกล้เคียงกันแสดงในรูปที่ 9 ดังนั้นแรงจุดที่ส่งผลต่อเสาเข็มเนื่องจากการเคลื่อนตัวของดินจึงมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 12 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม
(ก) เสาเข็มยาว (ข) เสาเข็มสั้น

กรณีของการขุดอุโมงค์คู่ผ่านเสาเข็มสั้นที่มีอยู่โดยมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ เมื่อทำการขุดอุโมงค์แรกมาถึงตำแหน่งของเสาเข็ม (ระยะ $y = 0D_T$) อิทธิพลจากการขุดอุโมงค์ส่งผลให้ปลายของเข็มสั้นสูญเสียกำลังรับแรงแบกทาน ส่งผลให้แรงภายในแนวแกนตลอดความยาวของเสาเข็มจะมีค่าลดลง หลังจากนั้นเมื่อขุดอุโมงค์แรกผ่านตำแหน่งเสาเข็มไปแล้ว (ระยะ $y > 0D_T$) ความสามารถในการต้านทานแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มจะมีค่าเพิ่มเพื่อให้เสาเข็มกลับเข้าสู่สภาวะสมดุล ส่งผลให้แรงภายในแนวแกนตลอดความยาวของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] และเมื่อทำการขุดอุโมงค์สองเข้ามาใกล้ตำแหน่งเสาเข็มอีกครั้ง พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแรงในแนวแกนจะมีลักษณะเดียวกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างการขุดอุโมงค์แรก แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออุโมงค์ทั้งสองทำการขุดมาพร้อม ๆ กัน ($0L_S$) ค่าแรงในแนวแกนสูงสุดกลับเพิ่มมากขึ้นเท่ากับ 65.48 กิโลนิวตัน (คิดเป็น 21.67% ของน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้) ซึ่งเกิดจากการที่หัวเจาะอุโมงค์คู่ที่ทำการขุดไปพร้อม ๆ กันส่งผลให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัวเนื่องจากสูญเสียกำลังรับแรงแบกทานที่มากกว่าการขุดอุโมงค์แบบมีระยะห่างระหว่างหัวเจาะ ($8L_S$) ด้วยเหตุนี้ความสามารถในการต้านทานแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มจึงมี

ค่าเพิ่มขึ้นมาก ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของแรงภายในแนวแกนของเสาเข็มสั้นเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อม ๆ กันจึงมากกว่ากรณีที่ทำให้การขุดอุโมงค์คู่แบบมีระยะห่างระหว่างหัวเจาะ

3.6. การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในเสาเข็ม

รูปที่ 12(ก) และ 12(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดในแนวแกนตลอดความลึกของเสาเข็มยาวและสั้นตามลำดับ โดยจากรูปที่ 12(ก) แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการขุดอุโมงค์คู่ผ่านเสาเข็มยาวที่มีอยู่โดยมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ เมื่ออุโมงค์แรกทำการขุดเสร็จสิ้นเกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 414.68 กิโลนิวตันเมตร ณ ตำแหน่งรอยต่อของชั้นดินเหนียวแข็งและทราย แต่เมื่อขุดอุโมงค์สองมาถึงตำแหน่งของเสาเข็ม (ระยะ $y = 0D_T$) ส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด (393.24 กิโลนิวตันเมตร) เนื่องจากเสาเข็มได้รับอิทธิพลจากการขุดอุโมงค์สองในทิศทางตรงกันข้ามกับการขุดอุโมงค์แรก

สำหรับการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในเสาเข็มสั้น เมื่อทำการขุดอุโมงค์คู่ที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ แสดงในรูปที่ 12(ข) โดยเมื่ออุโมงค์แรกก่อสร้างเสร็จ อิทธิพลเนื่องจากการขุดอุโมงค์จะส่งผลให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดเท่ากับ 75 กิโลนิวตันเมตรภายในเสาเข็มสั้นบริเวณรอยต่อของชั้นดินเหนียวอ่อนและชั้นดินเหนียวแข็ง และเมื่อทำการขุดอุโมงค์สองมาถึงตำแหน่งของเสาเข็มส่งผลให้ โมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าลดลงเท่ากับ 63.19 กิโลนิวตันเมตร

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อม ๆ กันพบว่าไม่มีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นในเสาเข็มสั้นและยาว เช่นเดียวกับผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อม ๆ กัน ที่มีต่อการเสีรูปด้านข้างของเข็ม

4. สรุป

การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของการขุดอุโมงค์คู่ที่มีผลต่อพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวข้างเคียง (สั้นและยาว) ที่มีอยู่ก่อนหน้า โดยจากผลการศึกษามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมของเสาเข็มที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่ ทั้งการเคลื่อนตัวในแนวแกน ด้านข้าง รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัด ถูกควบคุมโดยรูปแบบการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดอุโมงค์ ดังนั้นการขุดอุโมงค์คู่ที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่แตกต่างกัน จึงส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเสาเข็มที่แตกต่างกัน
2. การขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อม ๆ กัน ส่งผลให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัวและแรงภายในแนวแกนเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเสีรูปด้านข้างและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการขุดอุโมงค์คู่ที่มีระยะห่างระหว่างหัวเจาะมากเพียงพอ (เช่น $8L_S$)

3. ในทางปฏิบัติเมื่อต้องทำการขุดอุโมงค์คู่ผ่านเสาเข็มยาวเดิมที่มีอยู่ การขุดอุโมงค์คู่ไปพร้อม ๆ สามารถทำให้เสาเข็มยังคงมีความปลอดภัยมากกว่าการขุดอุโมงค์คู่แบบมีระยะห่างระหว่างหัวเจาะ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญต่อการเสถียรทางด้านข้างและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม ในขณะที่ค่าการทรุดตัวและแรงในแนวแกนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงแค่น้อยเมื่อเทียบกับการขุดอุโมงค์คู่ที่มีระยะห่างระหว่างหัวเจาะมาก ($8L_s$)

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาชีพวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่สนับสนุนเอื้อเฟื้อสถานที่, อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

6. การอ้างอิง

- [1] Peck, R.B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. *Proceedings of 7th International Conference Soil Mechanics and foundation Engineering*, Mexico.
- [2] Chen, L.T., Poulos, H.G., Loganathan, N. (1999). Pile responses caused by tunneling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **125**(3), 207–215. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1999) 125:3(207)
- [3] Jongpradist, P., Kaewsri, T., Sawatpanich, A., Suwansawat, S., Youwai, S., Kongkitkul, W., Sunitsakul, J. (2013). Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundations by numerical analyses. *Tunneling and Underground Space Technology* **34**, 96–109. DOI: 10.1016/j.tust.2012.11.005
- [4] Ng, C.W.W., Lu, H., Peng, S.Y. (2013). Three-dimensional centrifuge modelling of the effects of twin tunneling on an existing pile. *Tunneling and Underground Space Technology* **35**, 189–199. DOI: 10.1016/j.tust.2012.07.008
- [5] Soomro, M.A., Ng, C.W.W., Liu, K., Memon, N.A. (2017). Pile responses to side-by-side twin tunneling in stiff clay: Effects of different tunnel depths relative to pile. *Computers and Geotechnics* **84**, 101–116. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.11.011
- [6] Nematollahi, M., Dias, D. (2019). Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction – Case of the Shiraz subway line. *Tunneling and Underground Space Technology* **86**, 75–88. DOI: 10.1016/j.tust.2018.12.002

- [7] Do, N.A., Dias, D., Oreste, P., Djeran-Maigre, I. (2014a). Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground. *Tunneling and Underground Space Technology* **42**, 40–51. DOI: 10.1016/j.tust.2014.02.001
- [8] Do, N.A., Dias, D., Oreste, P. (2016). 3D numerical investigation of mechanized twin tunnels in soft ground - Influence of lagging distance between two tunnel faces. *Engineering Structures* **109**, 117–125. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.053
- [9] Nematollahi, M., Molladavoodi, H., Dias, 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* **24**(10), 1606–1622. DOI: 10.1080/19648189.2018.1476270
- [10] 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 of Massachusetts Institute of Technology, United States.
- [11] Likitlersuang, S., Surarak, C., Wanatowski, D., Oh, E., Suwansawat, S., Balasubramaniam, A. (2014). Simplified finite-element modelling for tunneling-induced settlements. *Geotechnical Research* **1**(4), 133–152. DOI: 10.1680/gr.14.00016
- [12] Thasnanipan, N., Anwar, M.A. (2001). Performance comparison of bored and excavated piles in the layered soils of Bangkok. *Proceedings of 40th Anniversary Celebration of Seafco Public Company Limited*, December 19, Thailand.
- [13] Lueprasert, P., Jonpradist, P., Suwansawat, S. (2017). Tunneling simulation in soft ground using shell elements and grouting layer, *International Journal of GEOMATE* **12**(31), 51–57. DOI: 10.21660/2017.31.6535
- [14] Selemetas, D., Standing, J.R., Mair, R.J. (2005). The response of full-scale piles to tunneling. *Proceedings of the 5th International Conference of TC28 of the ISSMGE*, Netherlands.

- [15] Latt, H. (2019). *Close Proximity Tunneling and Measures Adopted in the MRTA Orange Line - East Project*. Master Dissertation of Asian Institute of Technology, Thailand.