ผลกระทบของการขุดอุโมงค์คู่ซ้อนกันในแนวดิ่ง ที่มีระยะห่างระหว่างหน้าการขุดต่อโครงสร้างข้างเคียง
Effects of twin stacked tunnel excavation with lagging distance on adjacent structure

ณัฐวิช สิทธิอมรพร[1,*] สมเกียรติ เลิศกุลทานนท์[1] พรเกษม จงประดิษฐ์[1] ชณาภัทร แก้วพินิจ[1] ธนธัช เปรมศรี[1] มุกอันดา สุวัณณะสังข์[1]

[1] ศูนย์วิจัยด้านนวัตกรรมการก่อสร้างและระบบโครงสร้างพื้นฐานสำหรับอนาคต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
**Corresponding author; E-mail address: Pongsakorn.siri@mail.kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

จากสภาพพื้นที่ที่จำกัดของเมืองใหญ่ ทำให้มีการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินโดยเฉพาะอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งที่อาจถูกก่อสร้างใกล้เคียงกับโครงสร้างเสาเข็มที่มีอยู่เดิมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ นอกจากนี้การก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินจำเป็นต้องก่อสร้างอย่างรวดเร็วเพื่อไม่ให้กระทบต่อการปิดการจราจร ดังนั้นจะเป็นการขุดที่ระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะอยู่ใกล้กันมากขึ้น อย่างไรก็ตามในอดีตไม่ได้พิจารณาอิทธิพลเนื่องจากระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งต่อพฤติกรรมของเสาเข็มข้างเคียง การศึกษานี้วิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติของการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่แตกต่างกันได้แก่ $0L_S$ $1L_S$ $3L_S$ $5L_S$ และ $8L_S$ (L_S คือความยาวของหัวเจาะ) ต่อพฤติกรรมของเสาเข็มที่มีอยู่เดิม โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้พารามิเตอร์ดินและสอบเทียบวิธีการจำลองอุโมงค์จากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพสายสีน้ำเงิน จากผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่แตกต่างกันของการขุดอุโมงค์คู่แบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการเสียรูปของดินและพฤติกรรมของเสาเข็มที่มีอยู่เดิม

คำสำคัญ: อุโมงค์คู่ขนานซ้อนกันในแนวดิ่ง, ระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่ง, ผลกระทบต่อโครงสร้างเสาเข็ม

Abstract

In the dense urban area, twin stacked tunnels may inevitably be constructed near the existing pile foundations. Since rapid construction is required, the twin tunnels are constructed with short the lagging distance between twin stacked tunnel faces. However, the effect of lagging distance on the behavior of the adjacent piles has not been considered in past studies. In this study, a series of three-dimensional finite element analyses of twin stacked tunneling with different lagging distances of $0L_S$, $1L_S$, $3L_S$, $5L_S$ and $8L_S$ ($L_S$is the length of shield) adjacent to existing piles of a building. The research used soil parameters and calibrated tunnel simulation methods from the MRT blue line. The results of the analysis indicate that the lagging distance between twin stacked tunnel faces significantly affects soil deformation and the behavior of existing piles.

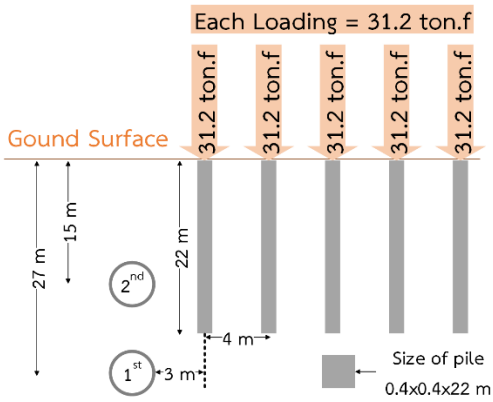
Keywords: twin stacked tunnel, Lagging distance between twin stacked tunnel faces, response on pile foundation

1. บทนำ

ในปัจจุบันจำนวนประชากรมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้การพัฒนาเมืองที่เป็นการก่อสร้างบนดินเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ส่งผลให้การจราจรภาคพื้นดินที่มีอยู่เริ่มไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ทำให้การคมนาคมของประชากรภายในเมืองเกิดความล้าช้า จึงจำเป็นต้องใช้ระบบขนส่งใต้ดินเพิ่มมากขึ้น ด้วยการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน ในแนวทางปฏิบัติระบบอุโมงค์คู่มีประสิทธิภาพในการขนส่งที่ดีกว่าอุโมงค์เดี่ยว เพราะสามารถคมนาคมไป-กลับได้ตลอดแนวเส้นทางในเมืองที่มีประชากรหนาแน่น แต่ในทางกลับกันการขุดอุโมงค์คู่ส่งผลกระทบมากกว่าการขุดอุโมงค์เดี่ยวอย่างมีนัยสำคัญ [1-2] และการก่อสร้างอุโมงค์อาจส่งผลกระทบและก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอาคารที่มีอยู่เดิม ดังนั้นในขั้นตอนการออกแบบการก่อสร้างอุโมงค์ควรต้องมีวิธีการประเมินถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อโครงสร้างเสาเข็มที่รับน้ำหนักอาคารเดิมที่มีอยู่ ในอดีตมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งต่อโครงสร้างเสาเข็มข้างเคียง [1-5] รวมทั้งวิธีการประเมินที่ให้ความปลอดภัยหรือมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเสาเข็มมากที่สุดซึ่งเป็นวิธีการประเมินแบบจำลองเสาเข็มรับแรง [2-3] แต่ไม่ได้คำนึงถึงระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของทั้งสองอุโมงค์ (Lagging Distance, L_F) ซึ่งการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งสามารถที่จะขุดไปพร้อม ๆ กันทั้งสองอุโมงค์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องเริ่มขุดอุโมงค์ที่สองหลังจากขุดอุโมงค์แรกเสร็จสิ้นหรือเทียบเท่ากับการขุดอุโมงค์แบบมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $8L_S$ ดังนั้นการทำความเข้าใจถึงอิทธิพลของระยะห่าง

ระหว่างหน้าหัวเจาะที่แตกต่างกันของการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ควรได้รับการพิจารณาควบคู่ไปกับผลกระทบต่อพฤติกรรมของเสาเข็ม

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มจากการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่ง แบบมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของทั้งสองอุโมงค์ทั้งหมด 5 กรณี คือ $0L_S$ $1L_S$ $3L_S$ $5L_S$ และ $8L_S$ ด้วยวิธีการประเมินแบบจำลองเสาเข็มรับแรงดังรูปที่ 1 โดยวิธีการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาค่า การทรุดตัวที่ผิวดิว (Soil settlement) การทรุดตัวของเสาเข็ม (Pile settlement) แรงในแนวแกนของเสาเข็ม (Axial force) โมเมนต์ดัดในเสาเข็ม (Bending moment) ค่าการเสียรูปด้านข้างของเสาเข็ม (Lateral displacement) ค่าการเสียรูปเชิงมุมของเสาเข็ม (Angular distortion) ค่าความลาดเอียงของเสาเข็ม (Rotation) และ ค่าการโก่งตัวของเสาเข็ม (Relative deflection)



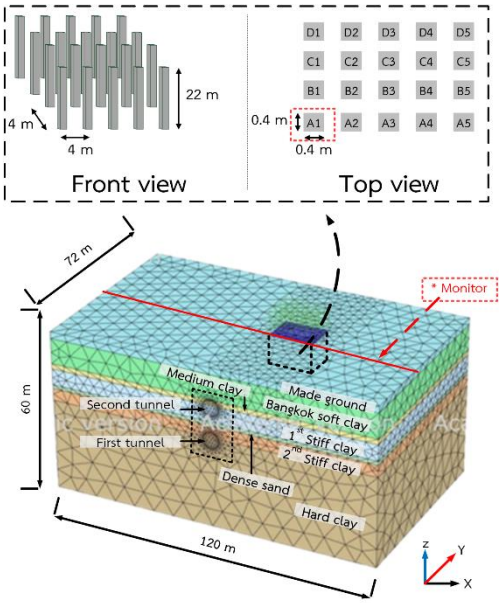
รูปที่ 1 การประเมินแบบจำลองเสาเข็มรับแรง

2. ระเบียบวิธีการศึกษา

การวิเคราะห์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อโครงสร้างข้างเคียงที่รองรับด้วยเสาเข็มเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 3D การวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งคือการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองการขุดอุโมงค์และเสาเข็มกับผลตรวจวัดภาคสนาม โดยจำลองชั้นดินและอุโมงค์มาจากรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน (MRTA blue line project) หน้าตัดที่ CS-4C [6] และโครงสร้างเสาเข็มเดี่ยวขนาด 0.4 x 0.4 เมตรและมีความยาวเท่ากับ 22 เมตรรองรับเสาในอาคารทุกต้นที่มีน้ำหนักบรรทุกออกแบบขนาด 31.2 ตัน แสดงดังรูปที่ 2 และตารางที่ 1 ตามลำดับ และส่วนที่สองคือการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มที่เกิดขึ้นจากการขุดอุโมงค์คู่ขนานที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยนี้พิจารณาเสาเข็มสี่เหลี่ยมที่อยู่ใกล้กับแนวการขุดอุโมงค์มากที่สุดหรือเสาเข็มต้น A1 แสดงในกรอบสีแดงดังรูปที่ 2 เนื่องจากเป็นเสาเข็มที่ได้รับอิทธิพลจากการขุดอุโมงค์มากที่สุด เนื่องจากอยู่ในโซนอิทธิพล (Influence zone) มากที่สุด [7]

2.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 2 แสดงชั้นดิน หน้าตัด และขอบเขตของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการศึกษานี้ จากงานวิจัยในอดีต [8] ระบุว่าแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางอุโมงค์ควรมีขนาดของแบบจำลองด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้างของหัวเจาะอย่างน้อย 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ (D_T) สำหรับการศึกษานี้มีขนาดของแบบจำลองกว้าง 120 เมตร (≈19D_T) ยาว 72 เมตร (≈12D_T) และลึก 60 เมตร (≈10D_T) จากผิวดิน และเงื่อนไขขอบเขตการเคลื่อนที่ของแบบจำลองในระนาบที่ตั้งอยู่ทั้งหมดถูกยึดรั้งไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบ ส่วนระนาบในแนวนอนของขอบด้านล่างถูกยึดรั้งไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง โดยในทุกแบบจำลองของการศึกษาจะใช้เงื่อนไขทั้งหมดที่ได้กล่าวไป



รูปที่ 2 ชั้นดิน หน้าตัด และขอบเขตของแบบจำลองในการศึกษา

2.2 ชั้นดินและพารามิเตอร์ของวัสดุ

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แบบจำลองดินแบบฮาร์ดเดนนิ่ง (Hardening soil model) ทั้งหมด โดยพารามิเตอร์ของดินที่ใช้สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ได้มาจากการทดสอบกำลังอัดของดินสามแกนแบบให้น้ำไหลผ่าน (Drain triaxial test) และการยุบตัวคายน้ำ (Oedometer test) [6] แสดงอยู่ในตารางที่ 1 ส่วนของอุโมงค์และเสาเข็มจะแสดงอยู่ในตารางที่ 2 ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้าที่ทำการจำลองการขุดอุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน [2]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของดินที่ใช้ในแบบจำลอง

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของ*อุโมงค์ และ เสาเข็ม*

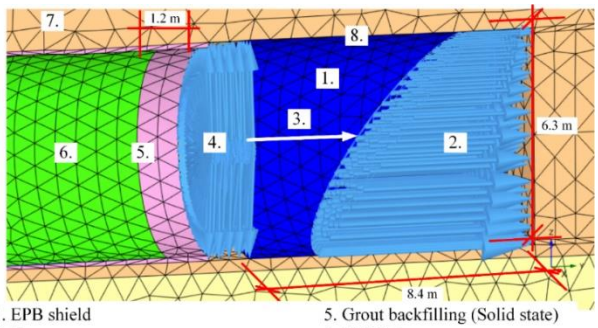
2.3 ขั้นตอนการจำลอง

ในแต่ละกรณีกำหนดเงื่อนไขการจำลองของดิน โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ความเค้นเริ่มต้น (Initial stress) ด้วยหน่วยน้ำหนักและค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินที่อยู่นิ่ง (Coefficient of earth pressure at rest, $\boldsymbol{K_0}$) ในแต่ละชั้นดิน หลังจากนั้นจะจำลองเสาเข็มและขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนกับในแนวดิ่ง ซึ่งมีระยะห่างระหว่างผิวหน้าของสองหัวเจาะ เพื่อตรวจสอบผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์ต่อโครงสร้างอาคาร ซึ่งสามารถแยกออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างแบบจำลองเสาเข็มโดยใช้โครงสร้างคานฝัง (Embedded beam) แบบหล่อในที่ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อทำการโมเดลคานฝังแบบหล่อในที่จะต้องลดค่าหน่วยน้ำหนักลงเท่ากับค่าหน่วยน้ำหนักของดินทุกชั้นเฉลี่ย ซึ่งลดลงเท่ากับ 18 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้เหลือค่าหน่วยน้ำหนักที่ใส่ในโปรแกรม Plaxis-3D เท่ากับ 6 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากคานฝังแบบหล่อในที่จะใช้พื้นที่ร่วมกันกับดิน (Interface) [1] ซึ่งโมเดล**โดย**ไม่คำนึงถึงอิทธิพลจากการก่อสร้าง รวมทั้งพิจารณาการก่อสร้างเสาเข็มที่สร้างเสร็จเป็นเวลานานมาก เพราะแรงดันน้ำส่วนเกินจากการก่อสร้างเสาเข็มสลายหมดแล้ว ซึ่งส่วนของน้ำหนักที่กระทำกับเสาเข็มจะใช้วิธีการหาน้ำหนักที่อนุญาตให้ทำงานได้ (Working load limit) โดยสามารถหาได้จากน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็ม (Ultimate capacity) หารด้วยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสาเข็ม (Factor of safety) เท่ากับ 2.5 [7]

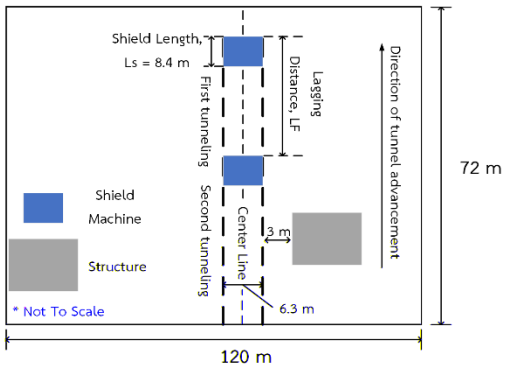
ขั้นตอนที่ 2 เป็นการจำลองการก่อสร้างอุโมงค์ภายใต้เงื่อนไขของดินที่มีคุณสมบัติไม่ระบายน้ำ (Undrained condition) โดยจำลองเป็นแบบคอนกรีตวงแหวนต่อเนื่องที่มีคุณสมบัติแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic model) ซึ่งในแต่ละครั้งของการขุดจะให้มีการเดินหน้าเท่ากับ 1.2 เมตร เท่ากับขนาดความกว้างของผนังอุโมงค์ และขั้นตอนการจำลองอุโมงค์จะใช้วิธีเดียวกับงานวิจัยในอดีต [1] ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 2.1 ขุดดินในบริเวณการก่ออุโมงค์



1. EPB shield
2. Face pressure
3. Translation vector for shield advancement
4. Grout pressure (Liquid state)
5. Grout backfilling (Solid state)
6. EPB lining
7. Surrounding soil
8. Contraction ratio

รูปที่ 5 การจำลองรูปร่างของอุโมงค์ด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ [1]

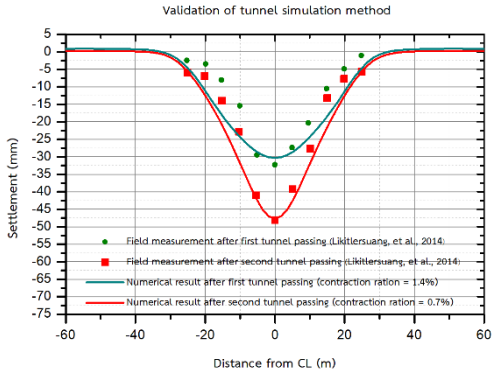


รูปที่ 6 มุมมองด้านบนของแบบจำลอง

3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

3.1 การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองอุโมงค์

รูปที่ 7 แสดงผลการสอบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทรุดตัวที่ผิวดินตามแนวตัดขวางการขุดอุโมงค์ที่ระนาบตัดขวางของรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินที่หน้าตัด CS-4C กับผลการตรวจวัดที่หน้าตัดเดียวกัน เส้นสีเขียวและแดงในรูปแสดงการทรุดตัวของดินเนื่องจากการจำลองการขุดอุโมงค์แรก (ตัวล่าง) และสอง (ตัวบน) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าจากผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 เส้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลตรวจวัด แสดงให้เห็นว่าค่าทั้งสองให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยจากการวิเคราะห์พบว่าค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss) ที่เหมาะสมของอุโมงค์ตัวแรก (ตัวล่าง) และตัวสอง (ตัวบน) มีค่าเท่ากับ 1.4% และ 0.7% ตามลำดับ ดังนั้นผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์และวิธีการขึ้นอุโมงค์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้ทำนายหรือจำลองพฤติกรรมต่าง ๆ ต่อไปได้

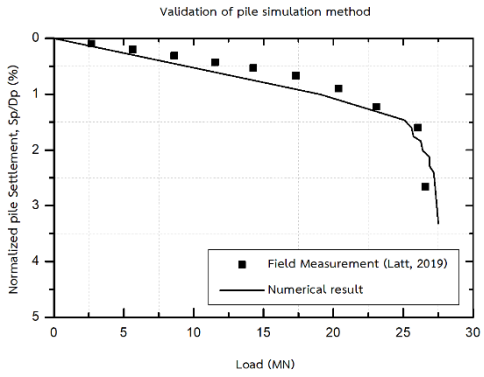


รูปที่ 7 การสอบเทียบค่าการทรุดตัวของผิวดินเนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่แบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งผ่าน

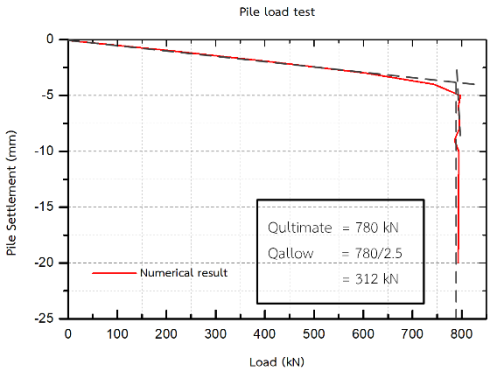
3.2 การสอบเทียบความถูกต้องและน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็ม

รูปที่ 8 แสดงการทรุดตัวของเสาเข็มกับแรงที่กระทำกับเสาเข็มด้วยวิธีการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Pile load test) ที่จำลองเสาเข็มโดยใช้การขึ้นรูปเสาเข็มด้วยแบบจำลองเสาเข็มโดยใช้โครงสร้างคานฝังแบบหล่อในที่ โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยวที่จำลองเสาเข็มโดยใช้โครงสร้างคานฝังแบบหล่อในที่ในเส้นสีดำ และผลการตรวจวัดในจุดสี่เหลี่ยมสีดำ ซึ่งมีความสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่าการขึ้นรูปเสาเข็มโดยใช้เสาเข็มโครงสร้างคานฝังแบบหล่อในที่ ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถนำมาใช้ทำนายหรือจำลองพฤติกรรมต่าง ๆ ของเสาเข็มเดี่ยวได้ [1]

รูปที่ 9 แสดงผลการจำลองการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการใช้วิธีการของ Buttler and Hoy [9] พบว่าเสาเข็มสามารถรับน้ำหนักได้มากที่สุดเท่ากับ 312 กิโลนิวตัน (31.2 ตัน) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้เสาเข็มจะมีแรงกระทำที่หัวเสาเข็ม (Working loads) เท่ากับ 312 กิโลนิวตัน



รูปที่ 8 ผลทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่จำลองโดยใช้ Embedded beam [1]

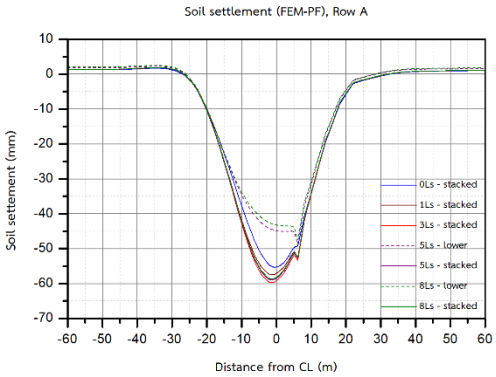


รูปที่ 9 ผลทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

3.3 การทรุดตัวของผิวดิน

รูปที่ 10 แสดงค่าการทรุดตัวที่ผิวดินตามแนวตัดขวางของการขุดอุโมงค์คู่ที่ระนาบตัดขวางผ่านเสาเข็มแถว A (y=30 เมตร) ที่ใช้การจำลองระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ล่าง) เสร็จสิ้น จะส่งผลทำให้ดินบริเวณนั้นเกิดการทรุดตัว โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่าผลการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะเป็นรูประฆังคว่ำ เนื่องจากบริเวณที่มีการขุดอุโมงค์จะเกิดการทรุดตัวของดินมากที่สุด แล้วจะลดลงเมื่อห่างออกจากระยะศูนย์กลางการขุดอุโมงค์ และเมื่ออุโมงค์ที่สอง (อุโมงค์บน) ถูกขุดเสร็จสิ้น ผลการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากจะเกิดการสะสมของการสูญเสียมวลดิน ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [10]

เมื่อพิจารณาค่าการทรุดตัวที่ผิวดินจากรูปที่ 10 จะเห็นว่าระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะมีผลต่อการทรุดตัวที่ผิวดิน เมื่อทำการขุดอุโมงค์แรก (ตัวล่าง) เสร็จสิ้น ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะลดลง ดังแสดงในเส้นประสีม่วงและสีเขียวซึ่งเป็นของระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $5\boldsymbol{L_S}$ (เส้นสีม่วง) และ $8\boldsymbol{L_S}$ (เส้นสีเขียว) ตามลำดับ แต่เมื่ออุโมงค์สอง (ตัวบน) ถูกขุด ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าการทรุดตัวที่ผิวดินในการขุดอุโมงค์แบบมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $0\boldsymbol{L_S}$ (เส้นสีน้ำเงิน) และ $3\boldsymbol{L_S}$ (เส้นสีแดง) จะเกิดค่าที่น้อยที่สุดเท่ากับ 55.41 มิลลิเมตร และมากที่สุดเท่ากับ 60.47 มิลลิเมตร ตามลำดับ

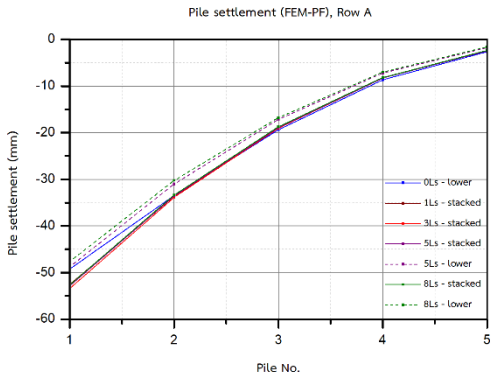


รูปที่ 10 การทรุดตัวที่ผิวดินตามแนวตัดขวางการขุดอุโมงค์คู่แบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งผ่าน

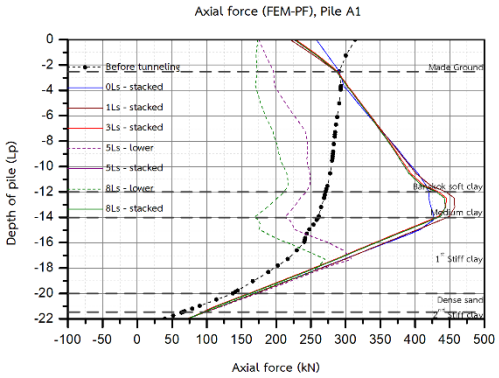
3.4 การทรุดตัวของเสาเข็ม

รูปที่ 11 แสดงค่าการทรุดตัวเสาเข็มที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของอุโมงค์คู่ขนานที่ซ้อนทับกันในแนวดิ่งที่แตกต่างกันของเสาเข็มในแถว A (y=30 เมตร) โดยจากรูปจะเห็นว่าเมื่อมีการขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ล่าง) เสร็จสิ้น จะส่งผลทำให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัว โดยเสาเข็มที่อยู่ใกล้กับระยะศูนย์กลางการขุดอุโมงค์จะเกิดค่าการทรุดตัวที่มากที่สุด เนื่องจากดินในบริเวณใกล้ระยะศูนย์กลางการขุดอุโมงค์จะเกิดการเคลื่อนตัวเข้าหาอุโมงค์มากที่สุด ทำให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัวที่มากที่สุดตามไปด้วย และลดลงเมื่ออยู่ห่างจากระยะศูนย์กลางการขุดซึ่งเป็นผลมาจากการทรุดตัวของผิวดิน และเมื่ออุโมงค์ที่สอง (อุโมงค์บน) ถูกขุดเสร็จสิ้น ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากดินเกิดการเคลื่อนตัวสะสมมากขึ้น (ค่าความเค้นในดินลดลง) ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [2]

และเมื่อพิจารณาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากรูปที่ 11 จะเห็นว่าค่าการทรุดตัวของเสาเข็มในต้น A1 ของการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งแบบมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $0\boldsymbol{L_S}$ (เส้นสีน้ำเงิน) และ $3\boldsymbol{L_S}$ (เส้นสีแดง) จะเกิดค่าที่น้อยที่สุดเท่ากับ 49.25 มิลลิเมตร และมากที่สุดเท่ากับ 53.39 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่ในเสาเข็มต้นที่เหลือค่าการทรุดตัวของเสาเข็มแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งค่าการทรุดตัวของเสาเข็มมีแนวโน้มเหมือนค่าการทรุดตัวของผิวดิน



รูปที่ 11 การทรุดตัวของเสาเข็มในแถว A เนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่แบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งผ่าน



รูปที่ 12 ค่าแรงในแนวแกนของเสาเข็ม A1 เนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่แบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งผ่าน

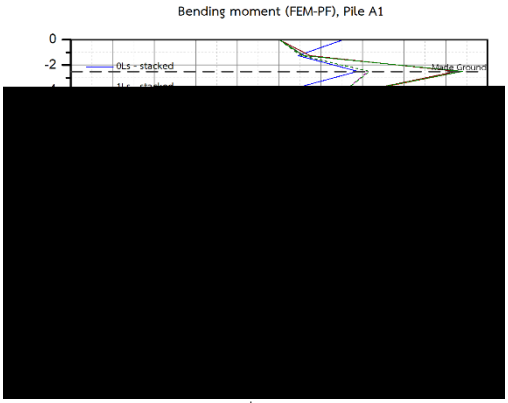
3.5 แรงในแนวแกนของเสาเข็ม

จากรูปที่ 12 แสดงค่าแรงในแนวแกนของเสาเข็มตามความลึกเสาเข็ม (L_p) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของอุโมงค์คู่ขนานที่ซ้อนทับกันในแนวดิ่งที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบแรงในแนวแกนก่อนการขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ล่าง) ดังแสดงเส้นจุดสีดำในรูปที่ 12 กับแรงในแนวแกนเมื่อขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ล่าง) เสร็จสิ้น จากรูปจะเห็นว่าแรงในแนวแกนส่วนบนเสาเข็มนั้นลดลงที่ระดับความลึกของเสาเข็มเท่ากับ 0 ถึง -16 เมตร แต่แรงในแนวแกนส่วนล่างเสาเข็มนั้นกลับมีค่ามากขึ้นที่ระดับความลึกของเสาเข็มเท่ากับ -16 ถึง -22 เมตร เนื่องจากเมื่อพิจารณาถึงโซนอิทธิพลของการขุดอุโมงค์ ตำแหน่งที่ทำการขุดอุโมงค์นั้นอยู่ลึกกว่าปลายเสาเข็ม (อุโมงค์ลึก) ส่งผลทำให้เสาเข็มเกิดการสูญเสียกำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเข็ม (End-Bearing) ทำให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัวเพื่อเข้าสู่เสถียรภาพใหม่ เป็นผลทำให้ค่าแรงเสียดทานผิวด้านข้างเสาเข็ม (Positive Skin friction) เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อเปรียบเทียบแรงในแนวแกนของแต่ละระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะก่อนการขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ล่าง) ดังแสดงเส้นจุดสีดำดังแสดงในรูปที่ 12 กับแรงในแนวแกนเมื่อขุดอุโมงค์สอง (อุโมงค์บน) เสร็จสิ้น แรงในแนวแกนจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากพิจารณาถึงโซนอิทธิพลของการขุดอุโมงค์ ตำแหน่งที่ทำการขุดอุโมงค์นั้นอยู่สูงกว่าปลายเสาเข็ม (อุโมงค์ตื้น) ส่งผลทำให้การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดจากการขุดอุโมงค์นั้นฉุดให้เสาเข็มเกิดการเสียรูป (Drag load) ส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานลบที่ด้านข้างเสาเข็ม (Negative Skin Friction) ซึ่งจากรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงแรงในแนวแกนเสาเข็มที่เกิดขึ้นนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตของ [11]

เมื่อพิจารณาค่าแรงในแนวแกนของเสาเข็มในรูปที่ 12 จะเห็นว่าการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งแบบมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $0L_S$ (เส้นสีน้ำเงิน) และ $1L_S$ (เส้นสีน้ำตาล) จะเกิดค่าที่น้อยที่สุดเท่ากับ 426.88 กิโลนิวตัน และมากที่สุดเท่ากับ 457.09 กิโลนิวตัน ตามลำดับ

3.6 โมเมนต์ดัดในเสาเข็ม

รูปที่ 13 แสดงค่าโมเมนต์ดัดในเสาเข็มตามความลึกเสาเข็ม (L_p) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของอุโมงค์คู่ขนานที่ซ้อนทับกันในแนวดิ่งที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ล่าง) เสร็จสิ้น ค่าโมเมนต์ดัดจะเกิดจุดดัดกลับของเสาเข็มที่ระหว่างเปลี่ยนชั้นดิน เนื่องจากมีค่า Young's Modulus ที่แตกต่างกัน และเมื่อขุดอุโมงค์ที่สอง (อุโมงค์บน) เสร็จสิ้น แนวโน้มการเกิดโมเมนต์ดัดในเสาเข็มจะมีพฤติกรรมเหมือนกับการขุดอุโมงค์แรกเสร็จสิ้น แต่มีค่าโมเมนต์ดัดที่มากกว่า โดยการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $0L_S$ จะมีแนวโน้มแตกต่างออกไป โดยจะเกิดค่าโมเมนต์ดัดของเสาเข็มในทิศทางตรงกันข้ามจากแนวโน้มเดิม



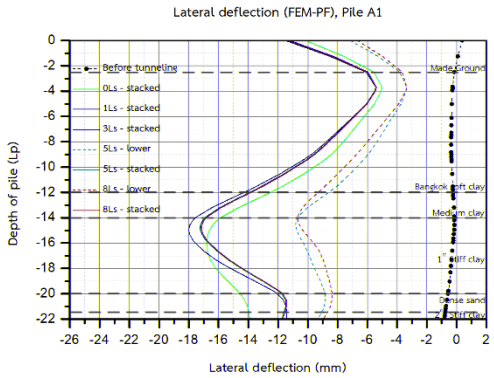
รูปที่ 13 ค่าโมเมนต์ดัดในเสาเข็ม A1 เนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่แบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งผ่าน

เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดในเสาเข็มในรูปที่ 13 จะเห็นว่าการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งแบบมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $0L_S$ (เส้นสีน้ำเงิน) จะเกิดค่าที่น้อยที่สุดเท่ากับ 47.12 กิโลนิวตัน - เมตร โดยจะเกิดบริเวณการเปลี่ยนชั้นดินระหว่าง Made ground ไปยังชั้นดิน Bangkok soft clay และ $8L_S$ (เส้นสีเขียว) จะเกิดค่าโมเมนต์ดัดมากที่สุดเท่ากับ 110.04 กิโลนิวตัน - เมตร โดยจะเกิดบริเวณการเปลี่ยนชั้นดินระหว่าง Dense sand ไปยังชั้นดิน Second stiff clay

3.7 ค่าการเสียรูปด้านข้างของเสาเข็ม

รูปที่ 14 แสดงค่าการเสียรูปด้านข้างเสาเข็มตามความลึกเสาเข็ม (L_p) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของอุโมงค์คู่ขนานที่ซ้อนทับกันในแนวดิ่งที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ล่าง) เสร็จสิ้น การเสียรูปด้านข้างของเสาเข็มที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าติดลบ ซึ่งเกิดจากดินเคลื่อนตัวเข้าหาตำแหน่งการขุดอุโมงค์ ส่งผลให้เสาเข็มเคลื่อนตัวเข้าหาอุโมงค์ด้วยเช่นกัน ซึ่งการเสียรูปด้านข้างของเสาเข็มจะมีค่ามากที่สุดที่ความลึกเท่ากับ -14 เมตร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนจากชั้นดิน Medium clay ไปยังชั้น First stiff clay โดยความแตกต่างของค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของดินทั้งสองชนิด [1] จึงทำให้เสาเข็มเกิดการดัดตัวกลับ และเมื่ออุโมงค์สอง (อุโมงค์บน) ถูกขุดเสร็จสิ้น ค่าการเสียรูปด้านข้างของเสาเข็มมากที่สุดจะย้ายมาบริเวณความลึกเท่ากับ -15 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ขุดอุโมงค์ตัวสอง (อุโมงค์บน) ถูกขุด

เมื่อพิจารณาค่าการเสียรูปด้านข้างของเสาเข็มในรูปที่ 14 จะเห็นว่าการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งแบบมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $0L_S$ (เส้นสีน้ำเงิน) และ $1L_S$ (เส้นสีน้ำตาล) จะเกิดค่าที่น้อยที่สุดเท่ากับ -16.78 มิลลิเมตร และมากที่สุดเท่ากับ -18.01 มิลลิเมตร ตามลำดับ

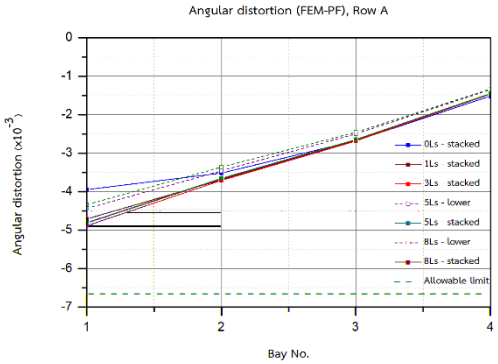


รูปที่ 14 ค่าการเสียรูปด้านข้างเสาเข็ม A1 เนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่แบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งผ่าน

3.8 ค่าการเสียรูปเชิงมุมของเสาเข็ม

รูปที่ 15 แสดงค่าการเสียรูปเชิงมุมที่เกิดขึ้นเนื่องจากระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของอุโมงค์คู่ขนานที่ซ้อนทับกันในแนวดิ่งที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าการเสียรูปเชิงมุมคือการประเมินการเสียรูปหรือการบิดตัวของโครงสร้าง รวมทั้งมุมที่เกิดขึ้นจากค่าความแตกต่างของค่าการทรุดตัว โดยหาได้จากค่าความแตกต่างของการทรุดตัวที่อยู่ติดกันของเสาเข็มสองต้นหารด้วยระยะห่างระหว่างเสาเข็มทั้งสองต้นเท่ากับ 4 เมตร โดยค่าการเสียรูปเชิงมุมของตึกควรมีค่าไม่เกิน 1/150 หรือเท่ากับ 6.66×10^{-3} (มยพ. 1552-51) ดังแสดงเส้นประสีกรมท่าในรูปที่ 15 โดยจากรูปจะเห็นว่าเมื่อขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ล่าง) เสร็จสิ้น ระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะจะส่งผลต่อค่าการเสียรูปเชิงมุมที่เกิดขึ้น โดยค่าการเสียรูปเชิงมุมของเสาเข็มจะยิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะลดลง แต่เมื่ออุโมงค์ที่สอง(อุโมงค์บน) ขุดเสร็จสิ้น ค่าการเสียรูปเชิงมุมของเสาเข็มจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากการขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ล่าง) เนื่องจากเกิดการสะสมของการเคลื่อนตัวของดินมากขึ้น ทำให้เกิดการทรุดตัวของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ค่าการเสียรูปเชิงมุมของเสาเข็มเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าการเสียรูปเชิงมุมของเสาเข็มต้นที่ 1 หรือ A1 ในรูปที่ 15 จะเห็นว่าการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งแบบมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $0L_S$ (เส้นสีน้ำเงิน) และ $3L_S$ (เส้นสีแดง) จะเกิดค่าที่น้อยที่สุดเท่ากับ -3.95×10^{-3} และมากที่สุดเท่ากับ -4.88×10^{-3} ตามลำดับ แต่ในเสาเข็มต้นที่เหลือค่าการเสียรูปเชิงมุมของเสาเข็มแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งค่าการเสียรูปเชิงมุมของเสาเข็มมีแนวโน้มเหมือนค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม

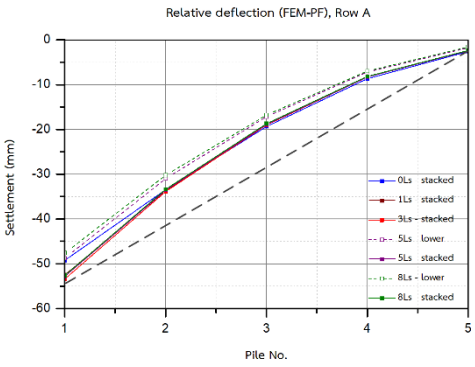


รูปที่ 15 ค่าการเสียรูปเชิงมุมของเสาเข็มในแถว A เนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่แบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งผ่าน

3.9 ค่าการโก่งตัวของเสาเข็ม

รูปที่ 16 แสดงค่าการโก่งตัวของเสาเข็มที่เกิดขึ้นเนื่องจากระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของอุโมงค์คู่ขนานที่ซ้อนทับกันในแนวดิ่งที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าการโก่งตัวของเสาเข็มหาได้จากการทรุดตัวของเสาเข็มต้นแรกและเสาเข็มต้นสุดท้ายในแถวเดียวกัน (เส้นประสีดำ) เป็นตัวอ้างอิง และลากเส้นตามแนวดิ่งสัมผัสกับเส้นอ้างอิง โดยระยะความยาวของเส้นที่ลากจะเป็นค่าการโก่งตัวของเสาเข็ม โดยจากรูปจะเห็นว่าเมื่อขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ล่าง) เสร็จสิ้น ค่าการโก่งตัวของเสาเข็มจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะอุโมงค์ลดลง แต่เมื่ออุโมงค์ที่สอง (อุโมงค์บน) ถูกขุดค่าการโก่งตัวของเสาเข็มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการขุดอุโมงค์แรก (อุโมงค์ล่าง) เสร็จสิ้น

เมื่อพิจารณาค่าการโก่งตัวของในรูปที่ 16 จะเห็นว่าการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งแบบมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ $0L_S$ (เส้นสีน้ำเงิน) และ $3L_S$ (เส้นสีแดง) จะเกิดค่าที่น้อยที่สุดเท่ากับ 6.55 มิลลิเมตร และ มากที่สุดเท่ากับ 8.89 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าค่าการโก่งตัวของเสาเข็มมักเกิดมากที่สุดในเสาเข็มต้นที่ A3 หรือต้นตรงกลางของเสาเข็มทั้งหมด



รูปที่ 16 ค่าการโก่งตัวของเสาเข็มในแถว A เนื่องจากการขุดอุโมงค์คู่แบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งผ่าน

4. สรุป

4.1 ตารางสรุปค่าผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง

ตารางที่ 4 ค่าสรุปผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง

Type / Value	8Ls	Minimum	Maximum	Unit
1.Soil settlement	-47.61	-55.41 (0Ls)	-60.47 (3Ls)	mm
2.Pile settlement	-52.59	-49.25 (0Ls)	-53.39 (3Ls)	mm
3.Axial force	443.89	426.88 (0Ls)	457.09 (1Ls)	kN
4.Bending moment	110.04	47.12 (0Ls)	110.04 (8Ls)	kN - m
5.Lateral deflection	-17.15	-16.78 (0Ls)	-18.01 (1Ls)	mm
6.Angular distortion	-4.80	-3.95 (0Ls)	-4.88 (3Ls)	$X10^{-3}$
7.Rotation	-4.80	-3.95 (0Ls)	-4.88 (3Ls)	$X10^{-3}$
8.Relative deflection	-8.75	-6.55 (0Ls)	-8.89 (3Ls)	mm

5. สรุปผล

การศึกษานี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะของการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งด้วยวิธีการประเมินแบบจำลองเสาเข็มรับแรง ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างเสาเข็มที่มีอยู่เดิม ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยต่อไปนี้เป็นข้อสรุปของการศึกษาในครั้งนี้ :

1. เมื่ออุโมงค์ที่สอง (อุโมงค์บน) ถูกขุดเสร็จสิ้นจะทำให้พฤติกรรมของเสาเข็มเปลี่ยนแปลงไปในทุก ๆ ค่า เช่น การทรุดตัวของผิวดิน การทรุดตัวของเสาเข็ม และค่าแรงในแนวแกนของเสาเข็ม เป็นต้น ดังนั้นการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่แตกต่างกัน จึงส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของโครงสร้างเสาเข็มที่แตกต่างกัน

2. ในการประเมินการขุดอุโมงค์คู่แบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งควรใช้การประเมินด้วยการขุดอุโมงค์แบบมีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ 3 เท่าของความยาวหัวเจาะหรือ $3L_S$ เพราะให้ค่าที่ส่งผลต่อพฤติกรรมโครงสร้างเสาเข็มมากที่สุด (Critical) ยกเว้นโมเมนต์ดัดในเสาเข็ม ในการประเมินจึงที่มีความปลอดภัยมากที่สุด (Conservative) ในทางกลับกันในทางปฏิบัติหากต้องขุดอุโมงค์คู่ขนานที่ซ้อนทับกันในแนวดิ่ง ควรรักษาระยะห่างระหว่างหัวเจาะให้เกิน 3 เท่าของความยาวหัวเจาะ

3. ในทางปฏิบัติการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งด้วยระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะเท่ากับ 0 เท่าของความยาวหัวเจาะหรือ $0L_S$ หรือขุดอุโมงค์ล่างและอุโมงค์บนไปพร้อม ๆ กัน จะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของโครงสร้างเสาเข็มที่มีอยู่เดิมน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการขุดอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนทับกันในแนวดิ่งที่มีระยะห่างระหว่างหน้าหัวเจาะที่เพียงพอ (เช่น $8L_S$)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้ทุนวิจัยพื้นฐานปี 2565 (โครงการ การก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ Thailand 4.0)

เอกสารอ้างอิง

[1] Lertkultanon, S. (2020). 3D Finite Element investigation on Influence of the lagging distance between side-by-side twin tunneling on pile group and pile raft. Master Thesis, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.

[2] กาญจน์รพี ศิวาพรเสถียร, อัญชิสา ศิลปะชัย และ ปภาวี รัตนแจ่มเจริญ (2563). การเปรียบเทียบผลกระทบจากการก่อสร้างอุโมงค์คู่ขนานแบบซ้อนกันในแนวดิ่งต่ออาคารข้างเคียงด้วยรูปแบบการวิเคราะห์ต่าง ๆ. ปริญญานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ประเทศไทย.

[3] Chayaroon, A. (2017). Influence of Analytical Method on Building Assessment due to Adjacent Tunneling. Master Thesis, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.

[4] Soomro, M.A., Mangi, N., Xiong, H., Kumar, M. and Mangnejo, A.D. (2020). Centrifuge and numerical modelling of stress transfer mechanisms and settlement of pile group due to twin stacked tunnelling with different construction sequences. Computers and Geotechnics, 121, pp.103449.

[5] Soomro, M.A. (2021). 3D finite element analysis of effects of twin stacked tunnels at different depths and with different construction sequence on a piled raft. Tunnelling and Underground Space Technology, 109, pp.103759.

[6] Surarak, C. (2010). Geotechnical Aspects of the Bangkok MRT Blue Line Project. Master Thesis, Griffith University, Australia.

[7] Jongpradist, P., Kaewsri, T., Sawatparnich, A., Suwansawat, S., Youwai, S., Kongkitkul, W. and Sunitsakul, J. (2013). Development of tunneling influence zones for adjacent

pile foundations by numerical analyses. Tunnelling and Underground Space Technology, 34, pp.96–109.

[8] Lueprasert, P., Jonpradist, P. And Suwansawat, S. (2017). Tunneling simulation in soft ground using shell elements and grouting layer. International Journal of GEOMATE, 12, pp.51–57.

[9] Olgun, O., Yenginar, Y. and Hanati, A. (2017). Interpreting Load-Settlement Curves of Pile Foundations by Graphical Methods. Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture, 1, pp.1-10.

[10] Do, N.A., Dias, D. and Oreste, P. (2014). Three-dimensional numerical simulation of mechanized twin stacked tunnels in soft ground. Journal of Zhejiang University: Science A, 15, pp.896–913.

[11] Soomro, M.A., Ng, C.W.W., Liu, K. and 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, pp.101–116.