



อิทธิพลของค่าอัตราส่วนพารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะอุโมงค์รถไฟฟ้า

ต่อการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

Influence of EPB Shield Operational Parameter Ratio

On Ground Movements of Bangkok Clay

อนันต์ อ่อนน้อม^{1*} และ อภินิติ โชติสังกา²

¹ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์กรุงเทพฯ

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะอุโมงค์ใต้ดิน ได้แก่ EPR, ESR, GFR และ GPR ที่มีผลต่อการควบคุมค่าทรุดตัวของดิน โดยพฤติกรรมการทรุดตัวของชั้นดิน ได้แก่ การทรุดตัวในทิศทางแนวขวาง ทิศทางขนานกับแนวเจาะ และแนวเส้นขอบเขตการทรุดตัว แต่ละโซนแต่ละตำแหน่งตรวจวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน จะถูกนำมาใช้อธิบายหลักการควบคุมความสมดุลดินของหัวเจาะอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ และเสนอแนะกราฟช่วงการปรับความดันของดินหน้าหัวเจาะอุโมงค์ ในกรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย โดยงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางและหลักการควบคุมพฤติกรรมการณ์เคลื่อนตัวของหัวเจาะอุโมงค์ในชั้นดินกรุงเทพฯ ต่อไปได้ในอนาคต

คำสำคัญ: อุโมงค์รถไฟฟ้า, หัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล, ค่าพารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะอุโมงค์, รถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย, ทรุดตัว

Abstract

This paper presents an analysis of the relationship between the ratio of the operational parameters for tunnel excavation such as EPR, ESR, GFR and GPR affecting to control the ground settlement, behavior of soil movements in the transverse direction, longitudinal direction same as direction and plan direction of each zone and measurement location at the surface will be used to explain the principles of soil balance for EPB shield tunneling in Bangkok clay. The recommended chart is presented

for soil pressure balance controlling in case of MRT Blue line Extension Project. This research may be used as a guideline to control behavior of tunnel excavation by shield tunneling in Bangkok soils for future projects.

Keywords: Tunnel, EPB Shield, Operational parameter, MRT Blue line Extension, settlement

1. คำนำ

ปัจจุบัน ระบบสาธารณูปโภคที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตประจำวันของประชากรที่อยู่ในเขตเมืองใหญ่ ชุมชนแออัด ได้แก่ ระบบรางขนส่งมวลชน ระบบท่อร้อยสายไฟฟ้า ระบบระบายน้ำ ระบบส่งน้ำประปา ระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น ซึ่งก็ได้ขยายขอบเขตการให้บริการอย่างต่อเนื่องและให้เป็นที่ไปอย่างเพียงพอ โดยนำเทคโนโลยีที่มีความล้ำสมัยมาใช้ขณะเดียวกันในเมืองใหญ่ พื้นที่บนดินกลับถูกจำกัดจากการพัฒนาที่ดินเป็นอสังหาริมทรัพย์ ได้แก่ บ้าน อาคารพาณิชย์ สวนสาธารณะเป็นต้น ดังนั้น อุโมงค์ใต้ดินเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกพิจารณา และในระบบสาธารณูปโภคต่างๆ เหล่านี้ที่อยู่บนดิน ย้ายลงสู่ใต้ดิน โดยปัจจุบันโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินในประเทศไทยกำลังได้รับการพัฒนาและก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง ส่วนใหญ่ก็จะใช้หัวเจาะอุโมงค์ชนิดปรับแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Shield) เหมือนกับอุโมงค์รถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล ที่ได้ก่อสร้างและประสบความสำเร็จไปแล้วนั้น โดยโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ที่กำลังก่อสร้างอยู่ และในอนาคต ที่จะมีการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ได้แก่ สายสีส้ม และสายสีม่วงได้ส่วนต่อขยาย เป็นต้น เพื่อให้การเดินทางครอบคลุมถึงพื้นที่เขตกรุงเทพฯ ชั้นในได้สะดวกมากขึ้น

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: anun_2@yahoo.com

การศึกษานววิจัยนี้จะทำการศึกษาก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน สีน้ำเงินส่วนต่อขยายสัญญา 2 ช่วงสนามไชย-ท่าพระ ดังรูปที่ 1 โดยศึกษาในเรื่อง พฤติกรรมทรุดตัวของดินในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการขุดเจาะอุโมงค์ โดยพิจารณาหลักการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์แบบความดันดินสมดุล และการควบคุมค่าพารามิเตอร์ (Operational Parameters) ซึ่งสามารถนำไปหาอัตราส่วนของพารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะ เพื่อนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมของดินที่จะเกิดการทรุดตัวในช่วงระหว่างการขุดเจาะนั้น เพื่อที่จะกำหนดและปรับค่าควบคุมพารามิเตอร์ ให้เหมาะสมตามสภาวะการขุดเจาะดินขณะนั้นได้และลดการเคลื่อนตัวที่ผิวดินน้อยที่สุด



รูปที่ 1 เส้นทางการก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย

2. พื้นฐานสมดุลความดันดินของหัวเจาะอุโมงค์

พฤติกรรมของหัวเจาะอุโมงค์ชนิดปรับความดันดินสมดุลจะถูกควบคุมค่าพารามิเตอร์หลายค่าประกอบกันในช่วงขณะหัวเจาะเคลื่อนตัวเพื่อทำการขุดเจาะดิน [1] ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของดินที่ส่วนหน้าและส่วนท้ายของหัวเจาะอุโมงค์ดังนี้

-ส่วนหน้าหัวเจาะ จะรักษาค่าความดันดินภายในห้องเก็บดินของหัวเจาะ ให้เท่ากับค่าความดันดินในสภาวะสถิตทางทฤษฎี อีกทั้งควบคุมปริมาณดินที่อยู่ในห้องเก็บดินที่จะลำเลียงออก ให้เทียบเท่าปริมาณดินที่ถูกใบตัดดินด้านหน้าหัวเจาะ เข้ามาแทนที่ภายในห้องเก็บดิน

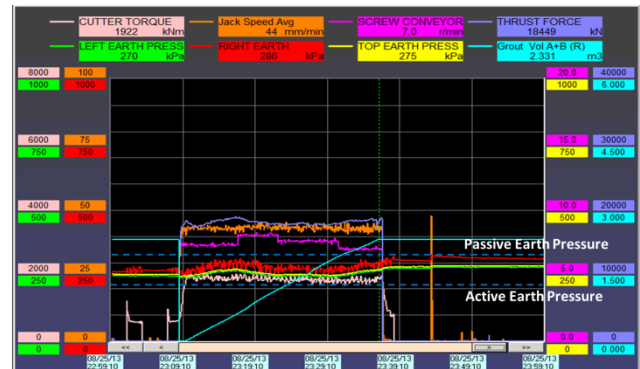
-ส่วนท้ายหัวเจาะจะทำการอัดฉีดน้ำปูนเพื่อเติมเต็มช่องว่างเนื่องจากความแตกต่างในเรื่องขนาดระหว่างหัวเจาะกับผนังอุโมงค์

ทั้งหมดนี้เป็นพื้นฐานสมดุลความดันดินของหัวเจาะอุโมงค์ดังกล่าว เพื่อให้ดินไม่เกิดการทรุดตัว หรือทรุดตัวน้อยที่สุด พารามิเตอร์ควบคุมการทำงานที่สำคัญ สำหรับพื้นฐานการรักษาสมดุลความดันดิน ได้แก่

2.1 ความดันดินหน้าหัวเจาะ

หลักการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์อันดับแรกคือ ค่าความดันดินที่หน้าหัวเจาะ จะถูกพื้นหัวเจาะตัดดินให้เคลื่อนเข้ามาในห้องเก็บดิน โดยรักษาค่าความดันดินภายในห้องเก็บดินนี้ ให้เท่ากับค่าความดันดินสภาวะสถิตที่คำนวณตามหลักวิชาการด้านปฐพีกลศาสตร์ ซึ่งความดันดินที่หน้าหัวเจาะไม่สามารถวัดค่าจริงได้แต่ดินหน้าหัวเจาะที่เคลื่อนเข้ามาภายในห้องเก็บดินสามารถวัดได้จาก load cell ที่ติดตั้งไว้ภายในบริเวณห้องเก็บดินดังนั้นจึงมีการควบคุมค่าความดันดินภายในห้องเก็บดินที่อ่านค่าได้ ให้อยู่ภายในช่วงความดันดินสภาวะแอคทีฟและพาสซีฟ หรือใกล้เคียงกับความดัน

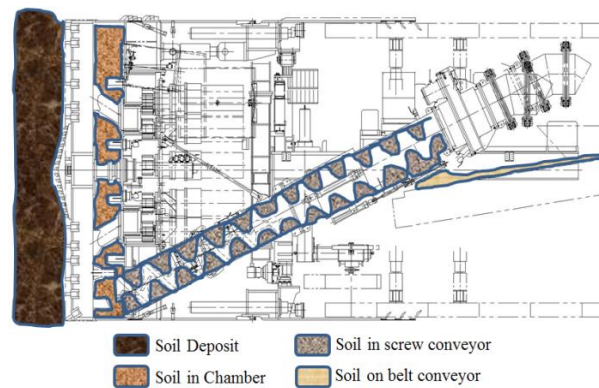
ดินสภาวะสถิตมากที่สุด ในช่วงระหว่างการขุดเจาะ และรักษาค่าความดันดินดังกล่าว ในช่วงระหว่างหยุดการขุดเจาะเพื่อประกอบผนังอุโมงค์หรือซ่อมบำรุงอุปกรณ์ภายในหัวเจาะอุโมงค์ ตามผลการเปลี่ยนแปลงค่าความดันดิน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 สภาวะความดันของดินขุดเจาะในห้องเก็บดิน ที่ถูกนำออกผ่านสกรูลำเลียงดินของหัวเจาะอุโมงค์ใน 1 รอบการขุดเจาะ[2]

2.2 ปริมาณดินที่ลำเลียงออกจากห้องเก็บดิน ผ่านสกรูลำเลียงดิน

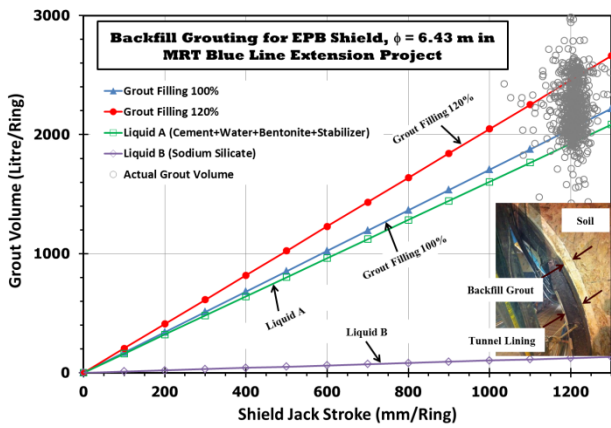
ดินที่ด้านหน้าหัวเจาะ (Soil Deposit) จะถูกใบตัดดินที่ Cutterhead ให้เคลื่อนเข้ามาภายในห้องเก็บดิน โดยปริมาณดินในห้องเก็บดิน (Soil in Chamber) จะถูกลำเลียงออกผ่านสกรูลำเลียงดิน (Soil in screw conveyor) ที่สัมพันธ์กับความเร็วในการขุดเจาะ เพื่อให้ปริมาณดินที่ถูกใบตัดดินหน้าหัวเจาะ เข้ามาแทนที่ปริมาณในห้องเก็บดินที่ลำเลียงออกได้ทัน เพื่อรักษาสสมดุลความดันดิน ซึ่งดินภายในสกรูลำเลียงดิน จะตกลงบนสายพานและถูกลำเลียงออกไปทั้งยังด้านนอกอุโมงค์ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 สภาวะของดินขุดเจาะและดินที่นำออกผ่านสกรูลำเลียงดินของหัวเจาะอุโมงค์ชนิดปรับความดันดินสมดุล

2.3 ปริมาณน้ำปูนที่อัดฉีดเติมช่องว่างด้านหลังหัวเจาะอุโมงค์

ปริมาณน้ำปูนที่อัดฉีดเติมช่องว่างที่ด้านหลังหัวเจาะ สามารถคำนวณจากปริมาตรช่องว่างระหว่างผิวนอกของหัวเจาะอุโมงค์ส่วนท้ายกับผิวนอกของผนังอุโมงค์ที่ประกอบ โดยพิจารณาระยะเคลื่อนตัวของหัวเจาะอุโมงค์ (Shield Jack Stroke) เพื่อประเมินปริมาณน้ำปูนที่ใช้ขณะใดๆ (Grout Volume) ในสัดส่วนเทียบกับปริมาตรช่องว่างทั้งหมดอีกทั้งเพื่อการไหลหนืดหรือสูญเสียข้างในท่ออิงน้ำปูน ประมาณ 20% ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำปูนที่อัดฉีดเติมเต็มในช่องว่างรอบผิวนอกของหัวเจาะอุโมงค์กับระยะเคลื่อนตัวของหัวเจาะอุโมงค์ในแต่ละรอบการขุดเจาะ

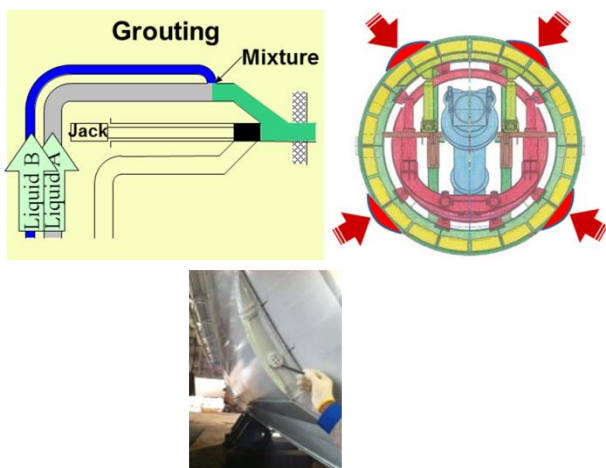
2.4 ความดันที่ใช้อัดฉีดน้ำปูน

ความดันที่ใช้อัดฉีดน้ำปูน จะขึ้นกับความลึกของดิน เพื่อวิเคราะห์น้ำหนักดินกดทับที่ตำแหน่งระดับด้านบนของผนังอุโมงค์และอัตราการไหลของน้ำปูน เพื่อเลือกใช้น้ำปูนอัดฉีดโดยน้ำปูนจะมีส่วนผสมของวัสดุต่างๆ และข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของน้ำปูนและการทดสอบคุณสมบัติ

ส่วนประกอบน้ำปูน	ข้อกำหนดคุณสมบัติ
Liquid A	-Specific gravity 1.20±0.05 กก/ลบ.ซม.
-ปูนซีเมนต์ ชนิด I 240 กก.	-Bleeding 0-5 % by 1000 Ltr @ 1 ชม.
-เบนโทไนท์ 30 กก.	-Consistency < 11 วินาที
-น้ำขุ่นขาว 1.04 ลิตร	-Gel time 4-12 วินาที
-น้ำ 840 ลิตร	-Compressive strength
	24 ชม. > 0.40 N/mm ²
	7 วัน > 0.80 N/mm ²
Liquid B	28 วัน > 1.50 N/mm ²
-น้ำโซเดียมซิลิเกต 70 ลิตร	

หมายเหตุ: อ้างอิงเฉพาะ โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย

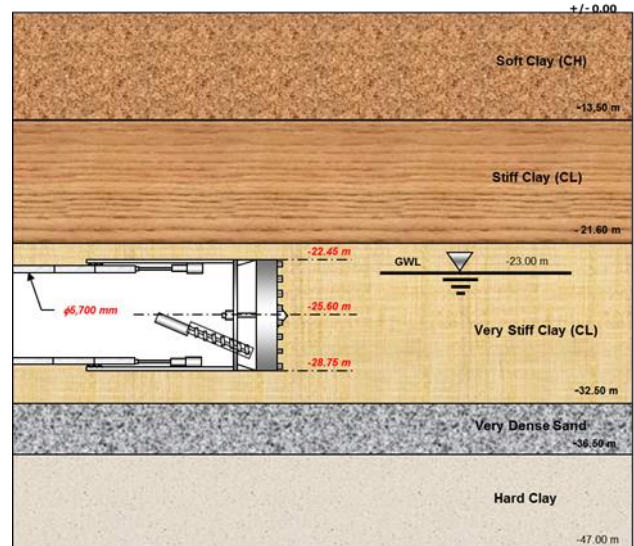


รูปที่ 5 ตำแหน่ง Grout Port และรูปแบบการอัดฉีดน้ำปูนที่ด้านหลังของหัวเจาะอุโมงค์ชนิดปรับความดันดินสมดุล

น้ำปูนส่วน Liquid A จะผสมกับ Liquid B ที่ปลายท่อก่อนที่จะถูกอัดฉีดเข้าไปในช่องว่าง ผ่าน Grout Port ตามตำแหน่งที่อัดฉีดน้ำปูน โดยจัดลำดับการอัดน้ำปูนให้เหมาะสม เพื่อให้ น้ำปูนไหลไปในช่องว่างได้ทั่วถึงรอบผนังอุโมงค์ แล้วเกิดการแข็งตัวของน้ำปูน ดังรูปที่ 5

3. อัตราส่วนของค่าพารามิเตอร์ควบคุมหัวขุดเจาะอุโมงค์

ผู้วิจัยได้ศึกษากรณีโครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ใช้หัวเจาะอุโมงค์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.430 เมตร ประกอบด้วยผนังอุโมงค์ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอก 6.300 เมตรและ 5.700 เมตร ตามลำดับ ตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดิน เหนือบริเวณที่หัวเจาะอุโมงค์ขุดเจาะผ่านในชั้นดินเหนียวแข็งมาก ที่ระดับความลึกจากผิวดินประมาณ 25 เมตร ดังรูปที่ 6 ทั้งนี้ จากหลักการควบคุมการทำงานของหัวเจาะอุโมงค์ชนิดปรับความดันดินสมดุล นำค่าพารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความดันดิน ปริมาณดินที่ลำเลียงออก ปริมาณน้ำปูนและความดันที่อัดฉีด มาแสดงในรูปอัตราส่วน เพื่อประเมินสถานะเคลื่อนตัวของดินที่ด้านหน้าและด้านหลังของหัวเจาะอุโมงค์ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของผิวดิน[4] ดังนี้



รูปที่ 6 ตัวอย่างตำแหน่งของหัวเจาะอุโมงค์ขุดเจาะในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

3.1 Earth Pressure Ratio (EPR)

ค่า EPR แสดงอัตราส่วนระหว่างความดันของดินภายในห้องเก็บดินซึ่งตรวจวัดค่าจาก Load Cell จำนวน 3 ตำแหน่ง ได้แก่ตำแหน่งบน ซ้าย และขวา เรียกว่าค่า Face Pressure ของดิน ต่อความดันดินหน้าหัวเจาะในสถานะสถิตที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวเจาะดังแสดงในสมการที่ (1)

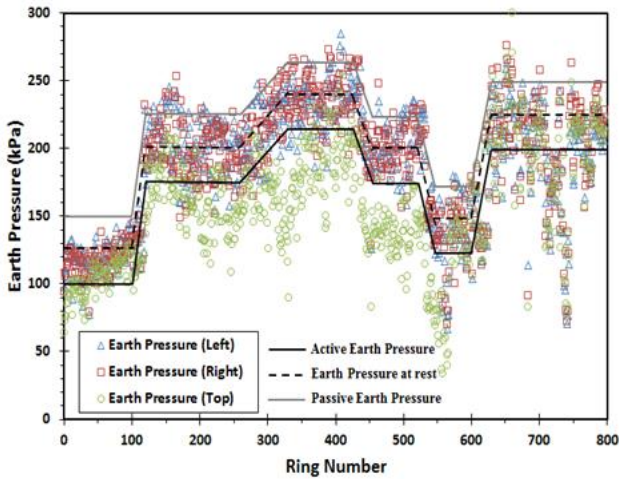
$$EPR = \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

เมื่อ EPR คือ Earth Pressure Ratio

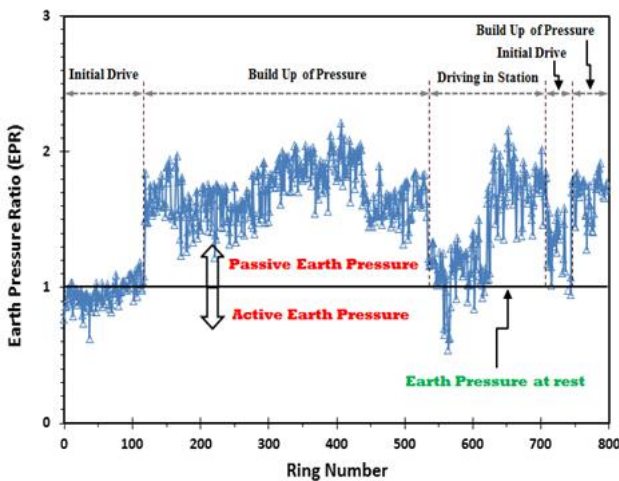
P คือค่าความดันดินที่ตรวจวัดภายในห้องเก็บดิน

P₀ คือค่าความดันดินด้านข้างกับความดันน้ำใต้ดินในสถานะสถิต

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับแต่ละชั้นดินในกรุงเทพฯ ทำให้ไม่สามารถกำหนดความดันดินสภาวะสถิตได้อย่างแม่นยำตรง ดังนั้นการควบคุมความดันดินภายในห้องเก็บดิน ระหว่างการขุดเจาะให้อยู่ในช่วงระหว่างสภาวะแอคทีฟ และสภาวะพาสซีฟตลอดตามแนวอุโมงค์ เพื่อให้สอดคล้องกับความดันดินในสภาวะสถิตมากที่สุด ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความดันดินในสภาวะแอคทีฟ สภาวะสถิต และสภาวะพาสซีฟตลอดตามแนวขุดเจาะอุโมงค์ รวมกับความดันน้ำใต้ดินของชั้นดินกรุงเทพฯ



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของค่า EPR ตามที่ควบคุมความดันดินหน้าหัวเจาะอุโมงค์ เทียบกับแนวขุดเจาะอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

จากรูปที่ 8 แปลงค่าความดันดินที่ตรวจวัดในห้องเก็บดิน ในรูปอัตราส่วน EPR ทำให้ทราบสภาวะการควบคุมหัวเจาะดังนี้
 -ช่วงขุดเจาะเริ่มแรก (Initial Drive) ช่วงหัวเจาะอุโมงค์ตัดผ่านผนังคอนกรีตเสริมเหล็กของสถานีรถไฟฟ้าวัดดิน เข้าไปในชั้นดิน จะรักษาค่า EPR เท่ากับหรือใกล้เคียง 1 เพื่อให้สภาวะดินสมดุล ลดการทรุดตัวที่ผิวดิน
 -ช่วงขุดเจาะแนวอุโมงค์ต่อเนื่อง (Main Drive) ระยะของแนวอุโมงค์ห่างจากผนังสถานีรถไฟฟ้าวัดดินมากพอที่แรงเสียดทานของผนังอุโมงค์ที่ประกอบ สามารถรับแรงต้านทานจากการดันหัวเจาะอุโมงค์ ไม่เกิดการถ่ายแรงไปยังผนังสถานีรถไฟฟ้าวัดดิน ซึ่งจะเพิ่มความเร็วในการขุดเจาะ

ทำให้ความดันดินในห้องเก็บดินเพิ่มขึ้น โดยที่ยังคงความเร็วรอบสกรูลำเลียงปริมาณดิน ซึ่งอาจมีความเป็นไปได้ที่ผิวดินจะเกิดการเคลื่อนตัวในแนวโน้มนวมตัว

-ช่วงขุดเจาะสุดท้าย (Arrival of Drive) เป็นช่วงที่หัวเจาะอุโมงค์ตัดผ่านเข้ามายังสถานีรถไฟฟ้าวัดดิน โดยจะลดความเร็วในการขุดเจาะ และรักษาค่า EPR เท่ากับหรือใกล้เคียง 1 เพื่อให้ดินหน้าหัวเจาะอุโมงค์และดินรอบผนังอุโมงค์ เกิดการเคลื่อนตัวน้อยที่สุด เช่นเดียวกับช่วงขุดเจาะเริ่มแรก

3.2 Excavated Soil Ratio (ESR)

ค่า ESR เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณดินขุดเจาะที่ลำเลียงออกมาจาก Soil Chamber ลำเลียงผ่านทาง Screw Conveyor ลงสู่ Muck Car ต่อปริมาณดินขุดเจาะที่หน้าหัวเจาะเมื่อหัวเจาะเคลื่อนตัวไปข้างหน้าด้วยระยะยัด Stroke เพียงพอที่จะประกอบ Segment จำนวน 1 วง ได้ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$ESR = \frac{V_{removal}}{V_{excavated}} \quad (2)$$

เมื่อ ESR คือ Excavated Soil Ratio

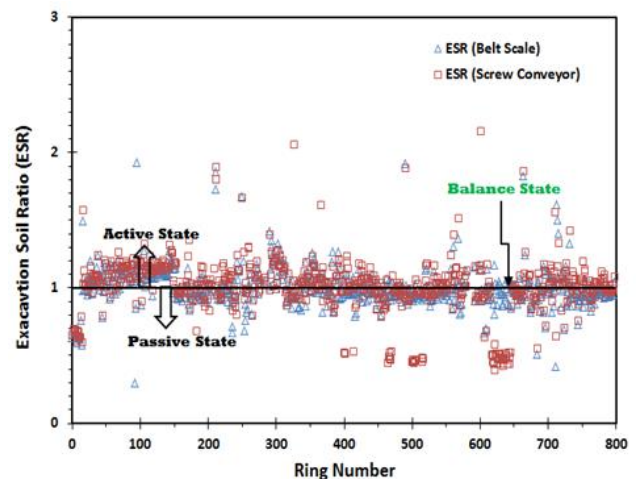
$V_{removal}$ คือ ปริมาณดินที่ลำเลียงออกจากห้องเก็บดิน

$V_{excavated}$ คือ ปริมาณดินที่ทำการขุดเจาะจากที่หัวเจาะเคลื่อนตัว

-ปริมาณดินที่ลำเลียงออกน้อยกว่าปริมาณดินที่ขุดเจาะทำให้ดินหน้าหัวเจาะเกิดสถานะพาสซีฟ คือ หัวเจาะดันดินข้างหน้า อาจทำให้เกิดการบวมตัวที่ผิวดิน

-ปริมาณดินที่ลำเลียงออกมากกว่าปริมาณดินที่ขุดเจาะทำให้ดินหน้าหัวเจาะเกิดสถานะแอคทีฟ คือ หัวเจาะดันดินข้างหน้า อาจทำให้เกิดการทรุดตัวที่ผิวดิน

ดังนั้น การควบคุมปริมาณดินที่ลำเลียงออกมา ควรให้ใกล้เคียงกับปริมาณดินที่ขุดเจาะจากที่หัวเจาะอุโมงค์เคลื่อนตัว เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุล ดินเกิดการเคลื่อนตัวน้อยที่สุดดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของค่า ESR ตามสภาพการเคลื่อนตัวของดินหน้าหัวเจาะอุโมงค์ เทียบกับแนวขุดเจาะอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

3.3 Grout Filling Ratio (GFR)

ค่า *GFR* เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำปูนที่อัดฉีดเข้าไปเพื่อทำ Backfill Grouting ต่อปริมาตรช่องว่างโดยรอบของผิวนอกของหัวเจาะกับ ปริมาตรของผนังอุโมงค์ (Tail Void) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$GFR = \frac{V_{grout}}{V_{void}} \quad (3)$$

เมื่อ *GFR* คือ Grout Filling Ratio

V_{grout} คือ ปริมาณน้ำปูนที่ใช้อัดฉีดเติมช่องว่างด้านหลังหัวเจาะ

V_{void} คือ ปริมาตรช่องว่างจากความต่างขนาดของหัวเจาะกับ

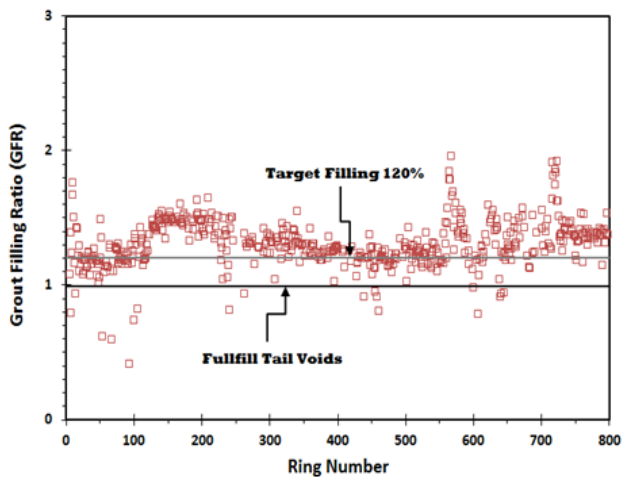
$$\text{ผนังอุโมงค์ เท่ากับ } \frac{\pi L}{4} x(D^2 - D_o^2)$$

L คือ ระยะเคลื่อนตัวของหัวเจาะใน 1 รอบการขุดเจาะ

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหัวเจาะ

D_o คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของผนังอุโมงค์

ปริมาณน้ำปูนที่อัดฉีดเข้าไป จะต่อปริมาณการสูญเสียร่วไหลเข้ามาที่ รอยต่อระหว่างผนังอุโมงค์และส่วนที่ค้างในท่อส่งน้ำปูนประมาณ 20 % ดังนั้น จะควบคุมปริมาณน้ำปูนที่อัดฉีด ไม่น้อยกว่า 120 % ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของค่า GFR ที่ด้านหลังหัวเจาะอุโมงค์ เทียบกับแนว ขุดเจาะอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

3.4 Grout Pressure Ratio (GPR)

ค่า *GPR* เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันที่ใช้อัดฉีดน้ำปูนผ่านรู Grout ที่ ผนังอุโมงค์เพื่ออุดช่องว่างโดยรอบ (Tail Void) ต่อความเค้นรวมของดิน ในแนวตั้งในรูป Total Stress ดังแสดงในสมการที่ (1)

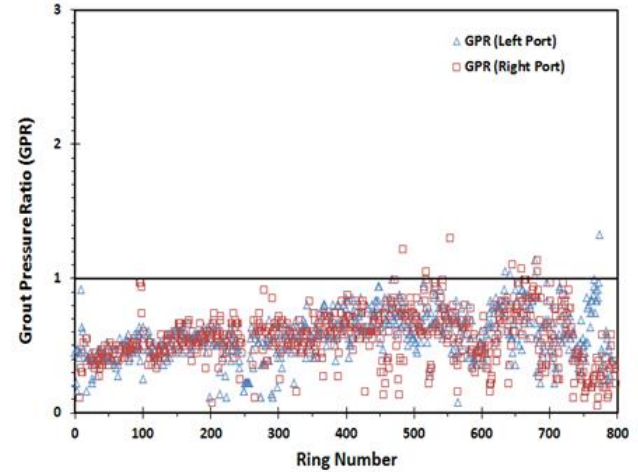
$$GPR = \frac{P_{grout}}{P_v} \quad (4)$$

เมื่อ *GPR* คือ Grout Pressure Ratio

P_{grout} คือ ค่าความดันที่ใช้อัดฉีดน้ำปูนเข้าไปเติมเต็มช่องว่าง

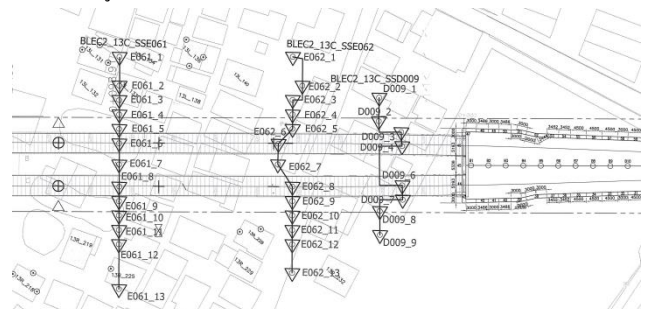
P_v คือ ความดันเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกของดินแนวตั้ง

ค่าความดันที่ใช้อัดฉีดน้ำปูนเป็นตัวแปรสำคัญอีกค่าหนึ่ง ซึ่งปกติจะ ควบคุมความดันให้มากกว่าความดันเนื่องจากน้ำหนักดินในแนวตั้ง เล็กน้อย แต่จากผลการตรวจวัด ค่า GPR จะต่ำกว่า เนื่องจากการเพิ่มความ ดันอัดฉีดน้ำปูน ทำให้ปริมาณน้ำปูนเข้าสู่ช่องว่างเร็วจนหมดปริมาณน้ำปูน ใน 1 รอบการเจาะ โดยที่ระยะเคลื่อนตัวของหัวเจาะยังไม่เสร็จสิ้นขั้นตอน การเจาะ 1 รอบ อาจทำให้เกิดช่องว่างที่ไม่มีน้ำปูนเข้าแทรกในช่องว่าง ดังกล่าว จึงได้ลดความดันอัดฉีดน้ำปูนลง ดังรูปที่ 11

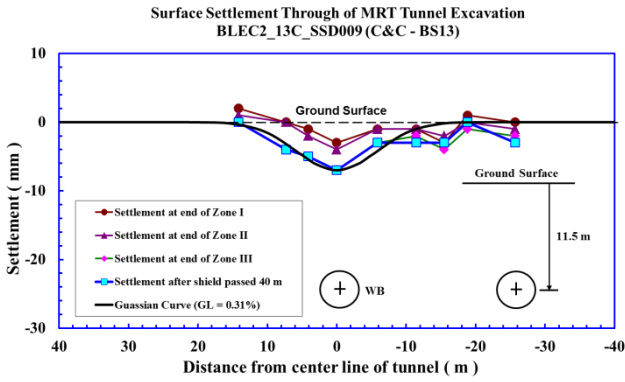


รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของค่า GPR ที่ด้านหลังหัวเจาะอุโมงค์ เทียบกับแนว ขุดเจาะอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

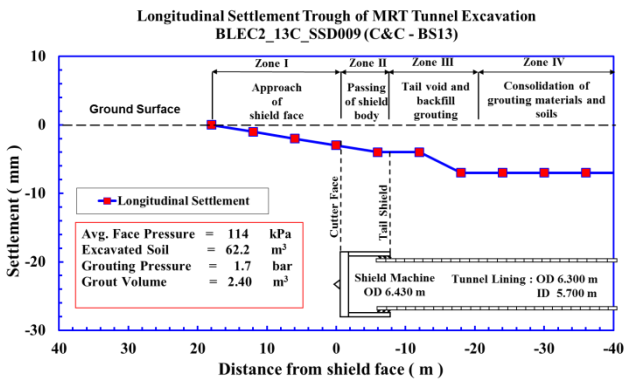
จากผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะทั้ง 4 ค่า นำมา พิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ตามการเคลื่อนตัวของหัวเจาะอุโมงค์ ทำให้ทราบว่า จะต้องควบคุมค่าเหล่านี้ ในหลักการสมดุลดินได้อย่างไร ซึ่งการวิจัยนี้ ได้พิจารณาผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะทั้ง 4 ค่านี้ มีผลต่อการเคลื่อนตัวของผิวดินมากน้อยเพียงใด ซึ่งมีการติดตั้ง เครื่องมือตรวจวัดหลายอย่างทั้งบนผิวดิน และได้ดิน ได้แก่ Surface Settlement Point, Extensometer และ Inclinator เป็นต้น รวมถึง เครื่องมือตรวจวัดภายในอุโมงค์ เช่น Tape Extensometer และ Pressure Cell เป็นต้น ทั้งนี้จะมุ่งเน้นที่การตรวจวัดค่าระดับดินจาก Surface Settlement Point เพื่อหาค่าการทรุดตัวที่ผิวดินตามแนวขุดเจาะอุโมงค์ ใน แต่ละตำแหน่งที่ได้ตรวจวัดค่าการทรุดตัวที่ผิวดินมีทั้งหมด 3 หน้าที่ด ในช่วงขุดเจาะจากพื้นที่ขุดแล้วกลบ (Cut & Cover) ถึงสถานีอิสรภาพ (BS13) ดังรูปที่ 12



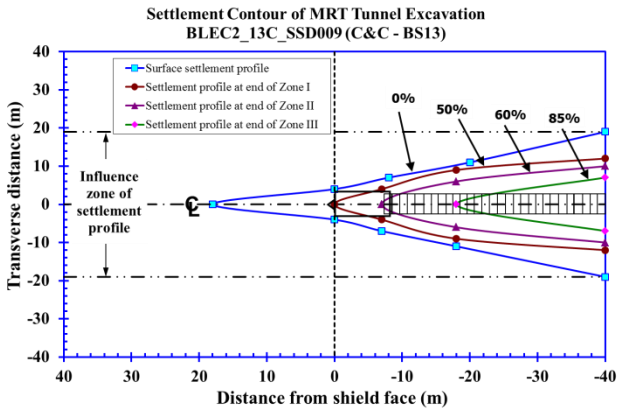
รูปที่ 12 ตำแหน่งติดตั้งการตรวจวัดค่าระดับการทรุดตัวที่ผิวดินของแนวขุดเจาะ อุโมงค์ ช่วง Cut & Cover – BS13



(ก) การทรุดตัวที่ผิวดินในทิศทางแนวขวาง



(ข) การทรุดตัวที่ผิวดินในทิศทางขนานกับแนวขุดเจาะ



(ค) แนวเส้นขอบเขตการทรุดตัวที่ผิวดิน

รูปที่ 13 ผลตรวจวัดการทรุดตัวที่ผิวดินในลักษณะ 3 แกน ที่หน้าตัด BLEC2_13C_SSD009 เนื่องจากขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

จากการศึกษาวิจัย พบว่า การเคลื่อนตัวของผิวดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ในลักษณะ 3 แกน ได้แก่ ทิศทางแนวขวาง ทิศทางขนานกับแนวขุดเจาะอุโมงค์ และแนวเส้นขอบเขตการทรุดตัว ดังรูปที่ 13 ที่ตำแหน่งตรวจวัด BLEC2_13C_SSD009 โดยแบ่งโซนของการทรุดตัวตามการเคลื่อนตัวของหัวเจาะอุโมงค์ เป็น 4 โซน คือ

-โซน 1 ขณะที่หัวเจาะเข้าใกล้ตำแหน่งตรวจวัดค่าทรุดตัว ซึ่งอยู่ที่ด้านหน้าหัวเจาะอุโมงค์

-โซน 2 ขณะที่หัวเจาะผ่านตำแหน่งตรวจวัดค่าทรุดตัว จากด้านหน้าถึงด้านท้ายสุดของหัวเจาะอุโมงค์

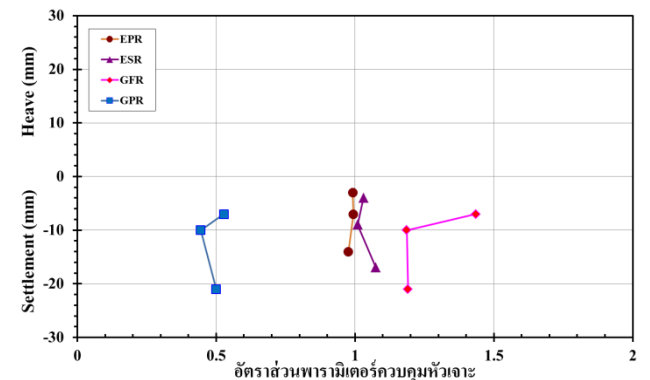
-โซน 3 ขณะที่หัวเจาะส่วนท้ายผ่านตำแหน่งตรวจวัดค่าทรุดตัวออกไปเป็นระยะไม่เกิน 20 ม. หรือบริเวณที่อัดฉีดน้ำปูนที่ด้านหลังหัวเจาะ

-โซน 4 ช่วงบริเวณหลังจากอัดฉีดน้ำปูนด้านท้ายหัวเจาะอุโมงค์ และดินด้านบนเหนือพื้นที่อัดฉีดน้ำปูน จะเกิดการทรุดตัวในลักษณะคืนสู่สภาพสมดุลของดิน แบบที่เรียกว่า อัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ซึ่งจะเกิดขึ้นในชั้นดินเหนียว

พบว่า รูปที่ 13(ก) การขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ เกิดการทรุดตัวน้อย ปริมาณการสูญเสียมวลดินไม่เกิน 2.5% อยู่ในการควบคุมคุณภาพการขุดเจาะระดับดี [3] รูปที่ 13(ข) การทรุดตัวที่ด้านหน้าหัวเจาะเริ่มเกิดขึ้นที่ระยะห่างจากด้านหน้าหัวเจาะประมาณ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวเจาะ รูปที่ 13(ค) ขอบเขตความกว้างของบริเวณโซนพื้นที่การทรุดตัวที่ผิวดิน เป็นระยะประมาณ 3-4 เท่า ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเจาะ

4. ผลของอัตราส่วนของค่าพารามิเตอร์ควบคุมหัวขุดเจาะอุโมงค์ต่อการทรุดตัวที่ผิวดิน

จากผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะทั้ง 4 ค่า นำมาหาความสัมพันธ์ร่วมกับค่าทรุดตัวที่ผิวดินหลังจากทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ด้านหลังของหัวเจาะอุโมงค์ ในแต่ละตำแหน่งที่ได้ตรวจวัดที่หน้าตัดขวางแนวอุโมงค์ ทั้ง 3 แนว ดังรูปที่ 14 พบว่าเมื่อค่า EPR และ ESR เข้าใกล้ 1 ส่งผลให้ค่าทรุดตัวที่ผิวดินลดลง ค่า GFR ซึ่งต้องมากกว่า 1.2เล็กน้อย แต่ถ้ามีแนวโน้มมากขึ้นอีก ส่งผลให้ค่าทรุดตัวลดลง อีกทั้ง ค่า GPR มีแนวโน้มค่ามากขึ้น จะช่วยลดค่าทรุดตัวทั้งนี้ จะควบคุมปริมาณน้ำปูนที่จะเติมเต็มช่องว่างให้ได้มากกว่า โดยความดันอัดฉีดประมาณครึ่งหนึ่งของความดันดินในแนวโค้งโดยค่าทรุดตัวเกิดขึ้นในช่วง 3-21 มม. หรือปริมาณสูญเสียมวลดินจากการขุดเจาะอุโมงค์มากที่สุด ไม่เกิน 1.1%ถือว่า อยู่ในเกณฑ์ควบคุมการขุดเจาะในระดับดี



รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนพารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะต่อการทรุดตัวที่ผิวดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

5. บทสรุป

การควบคุมอัตราส่วนพารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะทั้ง 4 ค่า ได้เหมาะสม ตามหลักการพื้นฐานสมมูลความดันดินของหัวเจาะอุโมงค์ สามารถลดค่าการทรุดตัวที่ผิวดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ให้น้อยลงได้ โดยให้อยู่ในช่วงคุณภาพการขุดเจาะระดับดี ควบคุมการสูญเสียมาดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ น้อยกว่า 1.5% ซึ่งจากผลการวิจัยของโครงการฯ สรุปผล ได้ดังนี้

- ความดันดินในห้องเก็บดิน ควรมีค่าใกล้เคียงกับความดันดินสภาวะสถิตเฉลี่ยที่ระดับความลึกอุโมงค์(EPR เท่ากับ 1.0) ผลการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์ที่หน้างานจริงวิเคราะห์ค่า EPR อยู่ในช่วง1.0-2.0

- ปริมาณดินที่ลำเลียงออก ควรจะมีค่าใกล้เคียงปริมาณดินที่ขุดเจาะจากที่หัวเจาะอุโมงค์เคลื่อนตัว(ESR เท่ากับ 1.0) ผลการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์ที่หน้างานจริง วิเคราะห์ค่า ESR อยู่ในช่วง 0.9-1.2

- ปริมาณน้ำปูนที่อัดฉีด ไม่น้อยกว่า 120 % ของปริมาตรช่องว่างเนื่องจากขนาดหัวเจาะอุโมงค์และผนังอุโมงค์(GFR มากกว่า 1.2) ผลการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์ที่หน้างานจริง วิเคราะห์ค่า GFR อยู่ในช่วงเท่ากับ 1.2-1.5

- ความดันอัดฉีดน้ำปูน ไม่น้อยกว่าความดันดินเนื่องจากน้ำหนักดินในแนวคิ่งเล็กน้อย (GPR มากกว่า 1.0 เล็กน้อย) ผลการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์ที่หน้างานจริง วิเคราะห์ค่า GPR อยู่ในช่วงเท่ากับ 0.3-1.1

ซึ่งทั้ง 4 ค่า ดังกล่าว ถ้าปรับค่าควบคุมระหว่างที่หัวเจาะอุโมงค์ขุดเจาะในชั้นดินที่มีสภาพแตกต่างกันได้อย่างเหมาะสม ถูกต้องตามหลักการพื้นฐานสมมูลความดันดิน โดยส่งผลกระทบต่อารเคลื่อนตัวของโครงสร้างข้างเคียงที่อยู่ในโซนพื้นที่ทรุดตัวของแนวขุดเจาะอุโมงค์ให้เกิดผลกระทบเกิดความเสียหายน้อยที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. M. Das, "Principles of Geotechnical Engineering", 7th Edition Thomson-Engineering Inc., 2009, pp. 488-497.
- [2] ENZAN. *AGRiGATAYA version 3 User's manual*. ENZAN KOUBOU Company, Ltd., Kyoto, Japan, 2009.
- [3] สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์, *วิศวกรรมอุโมงค์*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2554, พิมพ์ครั้งที่ 2, 708 หน้า.
- [4] สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ และ ชินวุฒิชัยญาญา, "อิทธิพลของพารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะต่อการเคลื่อนตัวของดินขณะก่อสร้างอุโมงค์", *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13*, ชลบุรี, 14-16 พฤษภาคม พ.ศ.2551.