พฤติกรรมของดินโดยรอบและการลดแรงเสียดทานในการดันท่อใต้ชั้นดินกรุงเทพ

Behavior of Surrounding Soil and Reduction of Friction Resistance in Underground Pipe Jacking of Bangkok Clay

ปัณฑ์ งามแสงรัตน์[1,*] และ ฐิรวัตร บุญญะฐี[2]

[1,2] ภาควิชา วิศวกรรมโยธา, คณะ วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
**Corresponding author; E-mail address: 6170385921@student.chula.ac.th*

บทคัดย่อ

การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบดันท่อเป็นการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินโดยไม่เปิดหน้าดิน แรงเสียดทานระหว่างดินและผิวภายนอกของท่อดันเป็นแรงต้านทานหลักที่ส่งผลต่อแรงดันรวมที่ต้องใช้ในการดันท่อ ดังนั้นการลดแรงเสียดทานโดยการฉีดสารหล่อลื่นจึงเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในงานดันท่อ อย่างไรก็ตามพฤติกรรมของดินรอบท่อดันนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของแรงเสียดทานจากสารหล่อลื่น ในปัจจุบันวิธีการและขั้นตอนในการฉีดสารหล่อลื่นระหว่างการดันท่อนั้นเป็นไปอย่างไม่มีแบบแผน งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดลองเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมที่แท้จริงของดินโดยรอบท่อดันที่เกิดขึ้นระหว่างการดันท่อ นำไปสู่การนำเสนอวิธีการและขั้นตอนการฉีดสารหล่อลื่นเพื่อให้การลดแรงเสียดทานมีประสิทธิผลสูงสุด วิธีการและขั้นตอนการฉีดสารหล่อลื่นที่ได้นำเสนอนั้นถูกนำไปทดสอบในการดันท่อทั้งหมด 2 ช่วงดัน โดยผลของการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการลดลงของแรงเสียดทานมากถึงร้อยละ 45 เมื่อเปรียบเทียบกับการฉีดสารหล่อลื่นอย่างไม่มีแบบแผน

คำสำคัญ: การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบดันท่อ, พฤติกรรมของดิน, แรงเสียดทาน, สารหล่อลื่น

Abstract

Pipe jacking is a trenchless process for laying of pipes. Successful pipe jacking requires a low skin friction resistance between jacked pipe and surrounding soil. This is accomplished with well-planned lubrication. However, the behavior of surrounding soil should be understood before applying any lubrication. This paper demonstrates the results of a series of experiment carried out to investigate the behavior of surrounding soil. The new approach for lubricant injection is introduced in this paper. In addition, two field cases were carefully selected to check out the capability of a new approach. As a result, the new approach represented a greater satisfaction up to 45 percent reduction of skin friction resistance comparing to the existing and prevalent method which is indicated that the new approach has higher efficiency.

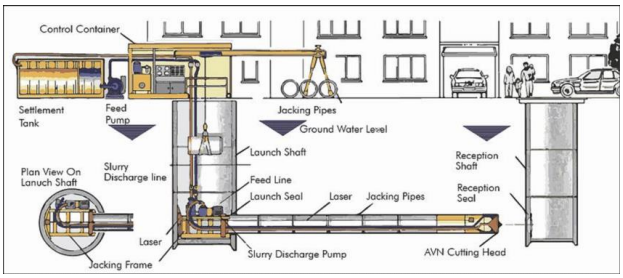
Keywords: Pipe Jacking, Behavior of Soil, Frictional Resistance, Lubrication

1. คำนำ

ในช่วงตลอดหลายปีที่ผ่านมาความหนาแน่นของประชากรและการเติบโตของเศรษฐกิจในกรุงเทพมหานครเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้ปริมาณความต้องการในการใช้ระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ในเขตพื้นที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้เกิดการจัดการด้านระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ให้เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้น แต่ด้วยพื้นที่ก่อสร้างบนดินที่มีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งเพื่อทัศนียภาพที่สวยงาม ระบบสายระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ที่เดิมถูกติดตั้งอยู่บนอากาศ จึงถูกทยอยนำลงไปติดตั้งอยู่ใต้ดิน ในการติดตั้งระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ใต้ดินนั้นจำเป็นต้องมีการก่อสร้างอุโมงค์หรือท่อใต้ดินเพื่อเป็นเกราะป้องกันตัวระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดความเสียหายจากแรงดันดิน น้ำใต้ดิน หรืออุปสรรคต่าง ๆ ที่อยู่ใต้ดิน

การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินสำหรับการติดตั้งระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ นั้นจะนิยมทำด้วยวิธีที่ไม่มีการขุดเปิดหน้าดินโดยเฉพาะด้วยวิธีการดันท่อ ซึ่งจะใช้ดาดอุโมงค์สำเร็จรูปที่เรียกว่าท่อดัน โดยท่อดันจะถูกทำการหย่อนลงไปในบ่อดันและใช้ชุดแม่แรงไฮดรอลิคในการดันท่อดันที่พึ่งถูกหย่อนลงมาต่อเข้ากับท่อดันที่ถูกดันไปก่อนหน้าตามการเคลื่อนที่ของหัวเจาะที่ถูกดันเข้าไปเป็นอย่างแรกสุด โดยจะทำการดันท่อต่อเนื่องกันไปตลอดความยาวของอุโมงค์จนไปถึงบ่อรับดังแสดงในรูปที่ 1

เนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีดันท่อนั้นไม่ จำเป็นต้องใช้แรงงานคน เครื่องจักร รวมทั้งระบบขนาดใหญ่ติดตั้งอยู่ภายในอุโมงค์ อาศัยแค่เพียงระบบลำเลียงดินซึ่งมักจะอยู่ในรูปแบบของการส่งผ่านท่อส่งและสายไฟฟ้าเชื่อมต่อไปยังหัวเจาะ จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2-3 เมตร) ซึ่งเป็นขนาดเดียวกับขนาดของอุโมงค์ใต้ดินสำหรับระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ส่วนใหญ่



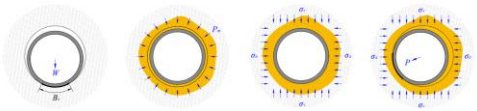
รูปที่ 1 การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีการดันท่อ

ในการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีการดันท่อนั้น ค่าแรงดันรวมที่จะต้องใช้ในการดันท่อนั้นเป็นค่าที่มีความสำคัญมาก ซึ่งค่าแรงดันรวมนั้นจะถูกนำมาใช้ในการออกแบบองค์ประกอบต่าง ๆ ในโครงการดันท่อเช่น จำนวนและตำแหน่งของบ่อดันและบ่อรับ, ความหนาของท่อดัน, กำแพงรับแรงดันและชุดแม่แรงไฮดรอลิก องค์ประกอบหลักในค่าแรงดันรวมคือค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวภายนอกของท่อดันตลอดแถวของท่อดันและผิวดิน

การใช้สารหล่อลื่นในโครงการดันท่อเป็นหนึ่งในวิธีการที่จะสามารถลดค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการออกแบบระบบการฉีดสารหล่อลื่นให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจำเป็นที่จะต้องเข้าใจพฤติกรรมของดินรอบท่อดันอย่างถ่องแท้

2. พฤติกรรมของดินรอบท่อดัน

สมการในการคำนวณค่าแรงเสียดทานได้ถูกศึกษาและนำเสนอโดยนักวิจัยหลาย ๆ ท่านทั่วโลก อย่างไรก็ตามสมการเหล่านี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานจากพฤติกรรมของดินรอบท่อดันต่าง ๆ กันไป โดยสมมติฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมของดินรอบท่อดันนั้นจะสามารถแบ่งได้เป็น 4 สมมติฐานตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 4 สมมติฐานตั้งต้นของพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน

สมมติฐานตั้งต้นที่ 1

ดินที่อยู่รอบช่องว่างอุโมงค์ที่ถูกขุดโดยหัวเจาะมีสเถียรภาพเพียงพอด้วยความแข็งแรงของตัวดินเอง ซึ่งจะส่งผลให้ท่อดันที่ถูกดันตามหัวเจาะสัมผัสกับผิวดินเฉพาะส่วนฐานของท่อดันอันเป็นผลมาจากน้ำหนักของตัวท่อดันเอง โดยไม่มีการฉีดสารหล่อลื่นในระหว่างการดันท่อ

สมการที่ใช้ในการคำนวณแรงเสียดทานที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานตั้งต้นที่ 1 นั้นตั้งอยู่บนพื้นฐานของสมการกำลังรับแรงเฉือนของดิน ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\tau_f = c + \sigma \tan \emptyset \quad (1)$$

τ_f คือ กำลังรับแรงเฉือน, c คือค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน, σ คือหน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบวิบัติ และ ϕ คือ มุมเสียดทานภายใน

อย่างไรก็ตาม Norris [1] ได้ข้อสรุปจากการทำการทดลองว่าในการดันท่อในชั้นดินเหนียวที่มีค่าความชื้นของดินสูงนั้น ค่ามุมเสียดทานภายในจะมีค่าลดลง และค่าแรงเสียดทานจะไม่ขึ้นกับพจน์หลังของสมการที่ (1)

ข้อสรุปนี้เป็นไปตามการทดลองของ Potyondy [2] และได้สรุปสมการในการคำนวณค่าแรงเสียดทานให้เป็นไปตามสมการที่ (2) ตามที่ Haslem [3] ได้นำเสนอไว้

$$F = \alpha S_u B_s \quad (2)$$

F คือ ค่าแรงเสียดทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวท่อ, α คือ ค่า adhesion factor, S_u คือค่าหน่วยแรงเฉือยแบบไม่ระบายน้ำ และ B_s คือความกว้างของผิวสัมผัสระหว่างท่อดันและผิวดิน

สมมติฐานตั้งต้นที่ 2

ช่องว่างระหว่างผิวนอกของท่อกับผิวดิน (Annulus) ถูกเติมเต็มไปด้วยสารหล่อลื่นที่ถูกฉีดเข้าไปในระหว่างการดันท่อ ประกอบกับดินที่อยู่รอบช่องว่างอุโมงค์มีสเถียรภาพจากแรงค้ำยันของสารหล่อลื่นนี้เอง ดังนั้นท่อดันจึงลอยอยู่ในสารหล่อลื่นโดยไม่มีการสัมผัสกับผิวดิน

สมการที่ใช้ในการคำนวณแรงเสียดทานที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานตั้งต้นที่ 2 นั้นจะขึ้นอยู่กับเฉพาะค่าของคุณสมบัติของสารหล่อลื่นดังสมการที่ (3)

$$F = (C_m)(\pi D_p) \quad (3)$$

F คือ ค่าแรงเสียดทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวท่อ, C_m คือค่าคุณสมบัติของสารหล่อลื่น และ D_p คือค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์

สมมติฐานตั้งต้นที่ 3

ดินที่อยู่รอบช่องว่างอุโมงค์ไม่มีสเถียรภาพเพียงพอจึงเกิดการพังทลายลงมาสัมผัสกับพื้นที่ผิวโดยรอบทั้งหมดของท่อดัน โดยอาจจะมีหรือไม่มีการฉีดสารหล่อลื่นในระหว่างการดันท่อ

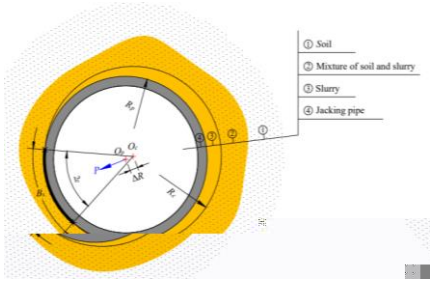
สมการที่ใช้ในการคำนวณแรงเสียดทานที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานตั้งต้นที่ 3 นั้นจะคล้ายกับสมการที่ (2) ดังสมการที่ (4)

$$F = \alpha_{collabse} S_u (\pi D_p) \quad (4)$$

สมมติฐานตั้งต้นที่ 4

ดินที่อยู่รอบช่องว่างอุโมงค์มีสเถียรภาพจากแรงค้ำยันของสารหล่อลื่นถูกฉีดเข้าไป อย่างไรก็ตามบางส่วนของท่อดันได้มีการสัมผัสกับผิวดินดังแสดงในรูปที่ 3

สมการที่ใช้ในการคำนวณแรงเสียดทานที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานตั้งต้นที่ 4 จะเป็นไปดังสมการที่ (5) อย่างไรก็ตามในการดันท่อนั้นมีหลากหลายปัจจัยที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่างดิน, สารหล่อลื่นและท่อดัน จึงเป็นการยากที่จะทราบค่าของ adhesion factor และค่าความกว้างของผิวสัมผัสระหว่างท่อดันและผิวดิน (X) จึงเป็นการที่ง่ายและสะดวกกว่าที่จะปรับลดรูปสมการให้เป็นไปดังสมการที่ (6)



รูปที่ 3 สมมติฐานตั้งต้นที่ 4

$$F = (\alpha)(S_u)(X)+(c_m)(\pi D_p - X) \quad (5)$$

$$F = \alpha_{avg}(S_u)(\pi D_p) \quad (6)$$

สรุปสมมติฐานตั้งต้น

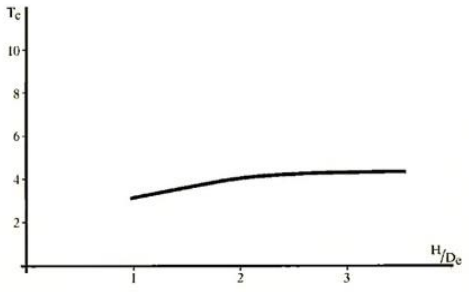
สมการที่ (4) และ (6) มีความคล้ายคลึงกันอย่างมาก ข้อแตกต่างนั้นอยู่ที่ค่า adhesion factor ซึ่งอาจจะมองให้เป็นตัวแปรเดียวกัน โดยที่ตัวแปร adhesion factor นั้นจะมีค่าอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างกว้าง เนื่องจากเป็นฟังก์ชันของหลากหลายปัจจัย โดยมีปัจจัยหลักดังต่อไปนี้

3. สเถียรภาพของอุโมงค์

สเถียรภาพของอุโมงค์เองนั้นก็ขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัยโดยเฉพาะดินที่มีแรงยึดเหนี่ยงภายในอย่างในกรณีของดินเหนียวกรุงเทพฯ ประวัติของหน่วยแรงของดินจะส่งผลต่อพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน เช่นดินเหนียวที่มีค่า OCR และ Plasticity Index แตกต่างกันนั้นจะส่งผลให้พฤติกรรมการยุบตัวของดินและความแน่นในการสัมผัสผิวของท่อดันแตกต่างกันไป

PJA [4] ได้นำเสนอสมการในการคำนวณที่ใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพของสภาพดินโดยรอบของท่อดัน ในกรณีของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวภายใน ดังสมการที่ (7) และรูปที่ 4

$$\frac{\sigma_T}{S_u} = \frac{\gamma D_e}{S_u}\left(\frac{H}{D_e}+\frac{1}{2}\right) - T_c \quad (7)$$

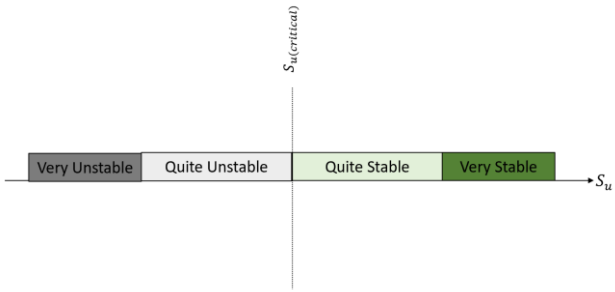


รูปที่ 4 ค่า Tc

ค่า σ_T แสดงถึงค่าแรงดันภายในอุโมงค์ที่ต้องการในการค้ำยันอุโมงค์ให้มีสเถียรภาพเพียงพอ ไม่มีการยุบตัวของดินรอบท่อดัน หากค่า σ_T ที่คำนวณออกมาได้เป็นค่าบวกนั้นแสดงถึงว่าอุโมงค์จำเป็นต้องมีแรงดันภายใน เช่น จากสารหล่อลื่น อย่างน้อยไม่น้อยกว่าค่า σ_T นั้นเพื่อที่จะค้ำยันดินบริเวณรอบไม่ให้เกิดการยุบตัว ในทำนองเดียวกันหากค่า σ_T คำนวณออกมาได้นั้นมีค่าติดลบ จะแสดงให้เห็นว่าอุโมงค์มีสเถียรภาพที่เพียงพอ ต้องเกิดแรงดันจากภายนอกเพิ่มเท่ากับค่า σ_T นั้น ๆ เพื่อที่จะให้ดินบริเวณรอบเริ่มเกิดการยุบตัว ดังนั้น PJA ได้สรุปว่าอุโมงค์จะมีเสถียรภาพเมื่อค่าของ σ_T มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 และไม่มีเสถียรภาพเมื่อค่าของ σ_T มีค่ามากกว่า 0 ดังนั้นจะสามารถจัดรูปสมการเพื่อหาค่า $S_{u(critical)}$ ได้ดังสมการที่ (8)

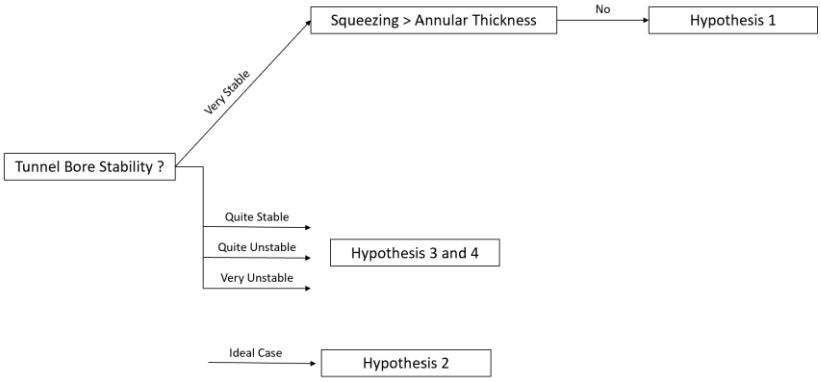
$$S_{u(critical)} = \frac{\gamma D_e}{T_c}\left(\frac{H}{D_e}+\frac{1}{2}\right) \quad (8)$$

อย่างไรก็ตามดังที่กล่าวไปพฤติกรรมของดินเหนียวนั้นจะขึ้นกับตัวแปรหลายๆปัจจัย ดังนั้นการนำสมการที่ (7) และ (8) มาใช้จะสามารถใช้ได้แค่เป็นแนวทางว่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินนั้นจะส่งผลให้เสถียรภาพของอุโมงค์อยู่ในช่วงประมาณใด โดยที่เส้นแบ่งของแต่ละช่วงนั้นจะไม่มีการแบ่งได้อย่างชัดเจน จึงทำได้แค่การประมาณว่าน่าจะตกอยู่ในช่วงใด ดังแสดงในรูปที่ (5)



รูปที่ 5 ช่วงของเสถียรภาพของอุโมงค์ที่เป็นไปได้

โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุโมงค์และสมการคาดคะเนแรงเสียดทานจะสามารถทำได้ตามขั้นตอน (Work flow) ดังแสดงในรูปที่ (6)

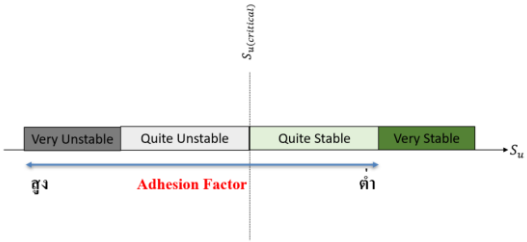


รูปที่ 6 Workflow

การขุดเจาะอุโมงค์ด้วยวิธีดันท่อในชั้นดินกรุงเทพฯนั้นส่วนมากเป็นการขุดเจาะที่ระดับความลึกน้อยจากผิวดินซึ่งจะอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงดินเหนียวปานกลาง ค่า σ_T ที่คำนวณได้จากสมการที่ (7) นั้นจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1 – 2 ตันต่อตารางเมตร โดย Chang et al. (1997) [5] ได้อธิบายถึงสเถียรภาพของอุโมงค์ตามค่า σ_T ที่คำนวณออกมาได้ โดยค่า σ_T ที่อยู่ระหว่าง 0 – 2 ตันต่อตารางเมตร นั้นแสดงถึงอุโมงค์ที่มีสเถียรภาพที่ไม่เพียงพอเพียงเล็กน้อยในการค้ำยันตัวเอง จึงทำให้การยุบตัวของดินจะเกิดขึ้นอย่างไม่ทันทีทันใด และสัมผัสผิวอุโมงค์แบบหลวมๆ

ช่วงของเสถียรถาพของอุโมงค์จึงน่าจะตกอยู่ในช่วงของ Quite Stable, Quite Unstable และ Very Unstable ซึ่งควรจะนำสมการที่ (4) หรือ (6) มาใช้ในการคำนวณ โดยผู้อ่านจะสามารถรู้สึกได้ว่าหากเป็นเช่นนั้นค่า adhesion factor จะมีช่วงที่ค่อนข้างกว้าง

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า adhesion factory คือคุณลักษณะของระบบการใช้สารหล่อลื่นในโครงการการดันท่อ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบขั้นตอนและวิธีการฉีดสารหล่อลื่นให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจะทำให้ค่า adhesion factory มีค่าน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ (7)



รูปที่ 7 ช่วงของค่า Adhesion factor

4. คุณลักษณะของระบบสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นในการดันท่อนั้นจะถูกฉีดเข้าไปในช่องว่างระหว่างผิวของท่อดันและผิวดิน โดยมีวัตถุประสงค์ 2 ประการได้แก่

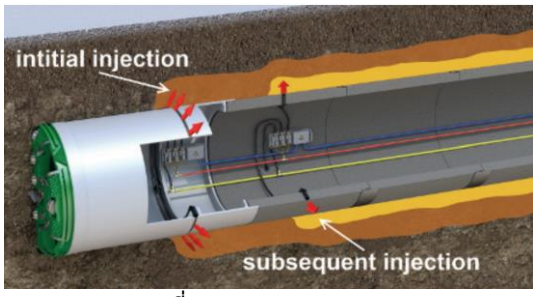
1) ในการค้ำยันเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของอุโมงค์

2. เพื่อลดค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวของท่อดันและผิวดิน

เนื่องจากชั้นดินในกรุงเทพฯนั้นไม่มีสเถียรภาพที่เพียงพอในการค้ำยันตนเอง ดังนั้นจุดประสงค์ของการใช้สารหล่อลื่นในการดันท่อในชั้นดินกรุงเทพฯนั้นควรจะมุ่งไปที่การค้ำยันเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของอุโมงค์เป็นความสำคัญหลัก

การออกแบบการฉีดสารหล่อลื่นให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยหลักได้แก่ เวลาและตำแหน่งในการฉีด, ปริมาณของสารหล่อลื่นและชนิดของสารหล่อลื่น

ตำแหน่งและลำดับในการฉีดสารหล่อลื่นเพื่อที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ในการค้ำยันเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของอุโมงค์นั้นจำเป็นต้องฉีดสารหล่อลื่นก่อนที่ดินจะยุบตัวลงมาสัมผัสกับผิวของท่อดัน หากดินได้ยุบตัวลงมาสัมผัสกับผิวท่อแล้วนั้น การฉีดสารหล่อลื่นเพื่อดันผิวของดินกลับและแทรกสารหล่อลื่นระหว่างกลางจะเป็นงานที่ยากและเกิดประสิทธิภาพต่ำกว่ามาก ดังนั้นการฉีดสารหล่อลื่นที่หัวเจาะ TBM เพื่อให้มั่นใจว่าจะเป็นการฉีดสารหล่อลื่นก่อนที่ดินจะยุบตัวลงมาจึงเป็นสิ่งที่สมควรทำและมีเหตุผลซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะเรียกการฉีดสารหล่อลื่นในขั้นตอนนี้ว่า initial injection โดยสารหล่อลื่นนั้นจะมีการเสื่อมสภาพหรือซึมหายเข้าไปในชั้นดินผ่านผิวดินจึงจำเป็นต้องมีการฉีดสารหล่อลื่นซ้ำในบริเวณดินที่เคยถูกฉีดสารหล่อลื่นในขั้น initial injection ไปแล้ว โดยการฉีดสารหล่อลื่นเพื่อทดแทนนี้จะเรียกว่า subsequent injection ซึ่งจะเป็นการฉีดผ่านท่อดันที่ออกแบบไว้โดยเฉพาะ (lubrication Pipe) ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 Lubricant Injection

Praetorious (2017) [5] ได้แนะนำปริมาณของสารหล่อลื่นที่เหมาะสมในการฉีดสำหรับทั้งขั้นตอนของ initial และ subsequent injection ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10

Table 7.10 Guideline values for the suspension quantities for initial injection (at the machine) in m^3/m per jacked metre depending on the geological conditions and annular gap volume.

Ground	Initial injection volume	Ground	Initial injection volume
Soil		Rock	
gravel	$4.18 \times V_{annular\ gap}$	rock with very closely spaced fissures	$1.6 \times V_{annular\ gap}$
gravel/sand	$2.8 \times V_{annular\ gap}$	rock with medium to closely spaced fissures	$1.04 \times V_{annular\ gap}$
sand	$1.36 \times V_{annnular\ gap}$	porous rock	$1.01 \times V_{annular\ gap}$
fine sand	$1.17 \times V_{annular\ gap}$	compact rock	$1 \times V_{annular\ gap}$
silt	$1.02 \times V_{annular\ gap}$		
clay	$1 \times V_{annular\ gap}$		

รูปที่ 9 ปริมาณสารหล่อลื่นที่แนะนำในขั้น initial injection

Table 7.11 Guideline values for suspension quantities in [m^3/m per jacked metre] for subsequent injection depending on the geology and the supplementary factor for the excavation surface area $C_{excavation}$

Ground	Subsequent injection volume	Ground	Subsequent injection volume
Soil		Rock	
gravel	0.196 m × excavation surface area	rock with very closely spaced fissures	0.112 m × excavation surface area
gravel/sand	0.132 m × excavation surface area	rock with medium to closely spaced fissures	0.067 m × excavation surface area
sand	0.097 m × excavation surface area	porous rock	0.052 m × excavation surface area
fine sand	0.078 m × excavation surface area	compact rock	0.046 m × excavation surface area
silt	0.054 m × excavation surface area		
clay	0.042 m × excavation surface area		

For the supplementary factors given in Table 7.11, it should be noted that these have been determined for comparative distances of 500 m. The supplement factor $C_{excavation}$ from Formula 7.27 can be used to calculate the suspension quantities at the pipe string independent of the jacked length.

รูปที่ 10 ปริมาณสารหล่อลื่นที่แนะนำในขั้น subsequent injection

5. การวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันท่อในชั้นดินกรุงเทพฯ

การศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำข้อมูลแรงเสียดทานรวมของการดันท่อในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯมาทำการวิเคราะห์ โดยเริ่มจากการพลอตกราฟระหว่างแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นตามระยะการดันเป็นแกนนอน และระยะการดันนับจากบ่อดันเป็นแกนตั้ง ประกอบกับนำข้อมูลของดินจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินมาวิเคราะห์ตามสมการที่ (7) และ workflow ในรูปที่ 6 ที่ได้นำเสนอไปแล้ว

โครงการการดันท่อที่นำข้อมูลมาวิเคราะห์นั้นมาจาก 2 โครงการได้แก่ โครงการการดันท่อที่ถนนแพรกษาและโครงการการดันท่อที่ถนนร่มกล้า โดยโครงการทั้ง 2 มีสภาพดินที่ใกล้เคียงกันมาก รวมถึงมีลักษณะของการดันท่อที่คล้ายคลึงกันอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 11

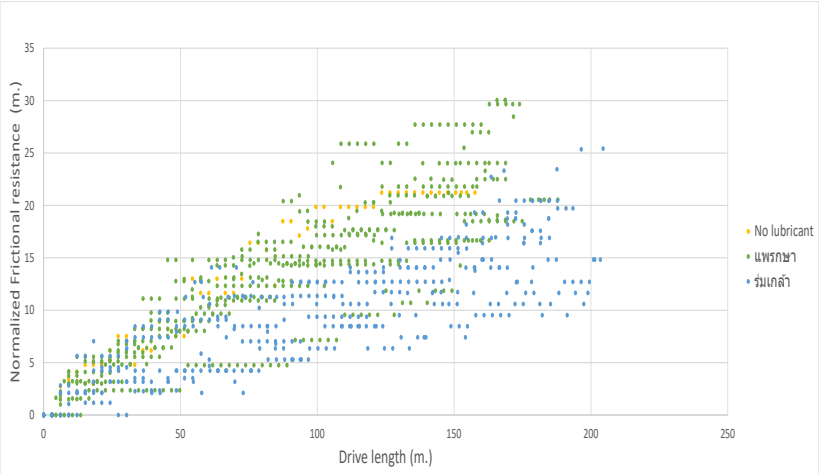
ในการดันท่อทั้ง 2 โครงการนี้นั้นใช้สารหล่อลื่นเป็นสารโพลิเมอร์ โดยจากข้อมูลการดันทั้งหมดมี 2 ช่วงดันทีไม่ได้ใช้สารหล่อลื่นในการดัน โดยค่าแรงเสียดทานเป็นไปดังรูปที่ 12

ผลของการวิเคราะห์สภาพดินตามสมการที่ (7) พบว่าทั้ง 2 โครงการในทุกๆช่วงดันนั้น ค่า σ_T ที่คำนวณออกมาได้นั้นอยู่ในช่วง 1.2 ถึง 1.6 ตันต่อตารางเมตร ดังนั้นดินรอบอุโมงค์จะมีสเถียรภาพที่ไม่เพียงพอเพียงเล็กน้อยในการค้ำยันตัวเอง จึงทำให้การยุบตัวของดินจะเกิดขึ้นอย่างไม่ทันทีทันใดและสัมผัสผิวอุโมงค์แบบหลวมๆ อย่างไรก็ตามควรมีการฉีดสารหล่อลื่นในขั้นตอน initial injection เพื่อเพิ่มเถียรภาพในการค้ำยันตนเองของอุโมงค์

เมื่อนำสมการที่ (4) หรือ (6) มาใช้ในการวิเคราะห์โดยการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่า Adhesion Factor ผลจากการวิเคราะห์ย้อนกลับพบว่าในกรณีที่ไม่มีการฉีดสารหล่อลื่นนั้น ค่า Adhesion Factor จะอยู่ที่ 0.1408 ซึ่งมีค่ามากกว่าในช่วงดันที่มีการฉีดสารหล่อลื่นในโครงการแพรกษาและร่มเกล้า ซึ่งมีค่า Adhesion Factor เท่ากับ 0.1288 และ 0.0797 ตามลำดับ

ลักษณะที่ส่งผล	เปรียบเทียบระหว่าง โครงการ
อัตราส่วนช่องว่าง	เท่ากัน
ความลึกจากผิวดิน	เท่ากัน
ชนิดของสารหล่อลื่น	เหมือนกัน
ความเข้มข้นของสารหล่อลื่น	เท่ากัน
ขนาดหัวเจาะ	เท่ากัน
ขนาดท่อดัน	เท่ากัน
วัสดุของท่อดัน	เหมือนกัน
เวลาหยุดงาน	รูปแบบเดียวกัน
เส้นทางการดัน	เส้นตรงทั้งคู่

รูปที่ 11 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของ 2 โครงการ



รูปที่ 12 กราฟระหว่างแรงเสียดทานรวมและระยะจากบ่อดัน

เมื่อเปรียบเทียบค่า Adhesion factor ในการดันท่อในชั้นดินกรุงเทพฯ กับ Adhesion factor ในงานเสาเข็มเจาะเปียก จะพบว่าค่า Adhesion factor สำหรับงานดันท่อนั้นมีค่าน้อยกว่ามาก ซึ่งเป็นเพราะในกรณีของการดันท่อในชั้นดินกรุงเทพฯ ค่าแรงดันภายในอุโมงค์ที่ต้องการในการค้ำยันอุโมงค์ให้มีสเถียรภาพเพียงพอหรือ σ_T นั้นถือว่ามีค่าต่ำซึ่งทำให้ดินที่ยุบตัวลงมาสัมผัสกับท่อดันนั้นเป็นไปอย่างหลวมๆ ตรงกันข้ามกับในงานเสาเข็มเจาะเปียกที่ดินที่สัมผัสรอบตัวเสาเข็มนั้นมีแรงดันดินด้านข้างค่อนข้างสูง

ความแตกต่างระหว่างค่า Adhesion Factor อย่างมากในโครงการแพรกษาและร่มเกล้านั้นถือว่าเป็นประเด็นที่น่าสนใจ เนื่องจากทั้ง 2 โครงการนั้นมีลักษณะโครงการที่คล้ายคลึงกันมากดังที่แสดงไปแล้ว อีกทั้งชนิดและความเข้มข้นของสารหล่อลื่นที่ใช้ก็เหมือนกัน จึงน่าเป็นไปได้ว่าเวลาและตำแหน่งในการฉีดสารหล่อลื่นน่าจะมีผลอย่างมากต่อค่า Adhesion factor

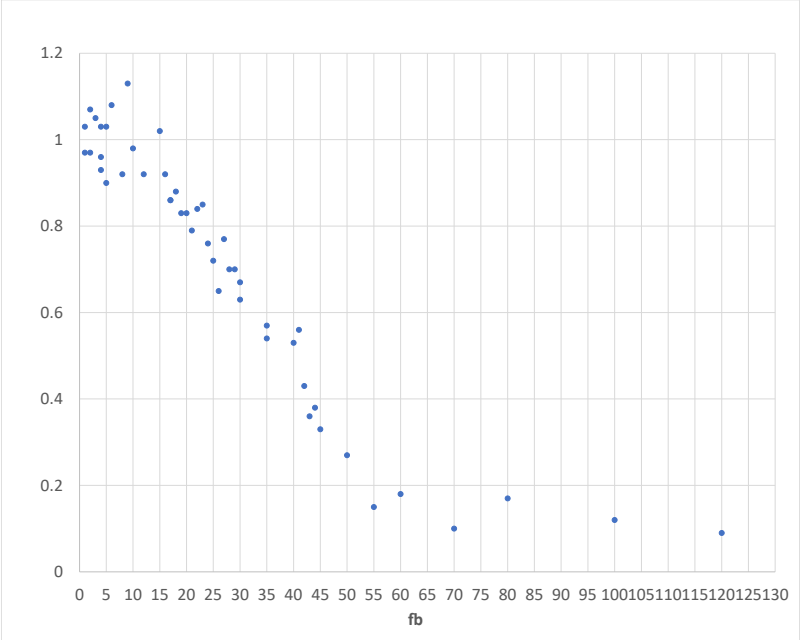
จากการศึกษาและสอบถามทีมก่อสร้างโดยละเอียดพบว่า ทั้ง 2 โครงการดันท่อนั้น ถูกก่อสร้างโดยทีมงานคนละทีมกัน โดยโครงการดันท่อที่ถนนแพรกษานั้นมักจะเริ่มต้นการใช้สารหล่อลื่นเมื่อการดันท่อดำเนินเข้าสู่ 4 วัน โดยมักจะเปิด lubricant injection ports เฉพาะท่อดันที่ 15 เป็นต้นไป ในส่วนของการดันท่อในโครงการร่มเกล้านั้น ทีมงานที่ดำเนินการดันท่อมักจะเริ่มต้นการใช้สารหล่อลื่นเมื่อการดันท่อดำเนินไปแล้วเข้าสู่วันที่ 2 โดยมักจะเปิด lubricant injection ports ของท่อที่ 10 เป็นหลัก

ทั้ง 2 โครงการใช้หัวเจาะ TBM ที่ไม่สามารถฉีดสารหล่อลื่นทันทีเมื่อหัวเจาะทำการขุดเจาะดินได้ซึ่งอาจจะเปรียบได้ว่าทั้ง 2 โครงการไม่มีการฉีดสารหล่อลื่นในขั้น initial injection ซึ่งมีความสำคัญมากกว่าการฉีดในขั้น subsequent injection

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้มีการทำการทดลองโดยการนำ lubrication pipe ไปดันเป็นท่อดันแรก ต่อจากหัวเจาะ TBM เพื่อให้สารหล่อลื่นถูกฉีดก่อนที่ดินจะเกิดการยุบตัวตามวัตถุประสงค์ของการฉีด initial injection โดยทำการทดลองในโครงการการดันท่อสำหรับก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีเหลืองซึ่งเป็นโครงการที่มีลักษณะของดินและลักษณะของการดันท่อคล้ายคลึงกับ 2 โครงการแรก โดยอุปสรรคของการดันท่อในการทดลองเกิดขึ้นโดยเกิดจากที่สารหล่อลื่นไหลย้อนกลับเข้าไปทางหัวเจาะและเกิดการรั่วซึมของสารหล่อลื่นที่บริเวณหัวเจาะ ซึ่งหัวเจาะที่ใช้ไม่ได้มีการออกแบบผนึกเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของสารหล่อลื่น

ช่วงเวลานับจากเวลาที่ดินถูกขุดเจาะจนถึงเวลาที่ดินเกิดการยุบตัวลงมาสัมผัสกับท่อดันนั้นจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่จำเป็นต้องทราบเพื่อใช้ในการออกแบบตำแหน่งของ lubrication pipe แรกที่พยายามให้ไกลหัวเจาะมากที่สุดเพื่อลดความเสี่ยงในการไหลย้อนกลับของสารหล่อลื่นไปยังหัวเจาะซึ่งอาจจะสร้างความเสียหายกับเครื่องยนต์ต่าง ๆ ได้ อย่างไรก็ตามสภาพดินโดยรอบ lubrication pipe นั้นจำเป็นต้องยังไม่เกิดการยุบตัวลงมาสัมผัสกับผิวท่อเพื่อยังคงวัตถุประสงค์ของการฉีดสารหล่อลื่นในขั้นตอน initial injection

ในงานวิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ทราบเวลาดังกล่าวโดยทำการฉีดสารหล่อลื่นโดยใช้ปั๊มที่มีแรงดันต่ำกว่าค่าแรงดันดินในแนวดิ่ง มาทำการฉีดผ่าน lubrication pipe ที่อยู่ในช่วงบริเวณของดินที่ผ่านการขุดเจาะด้วยหัวเจาะมาโดยนับระยะเวลาของบริเวณดินนั้นตั้งแต่ที่โดนขุดเจาะจนถึงเวลาที่ทำการฉีดสารหล่อลื่นต่าง ๆ กัน ประกอบกับวัดอัตราการไหลของสารหล่อลื่น แล้วจึงนำมาพลอตกราฟระหว่างระยะเวลาที่นับตั้งแต่เมื่อดินถูกขุดเจาะจนถึงจุดที่ทำการฉีดสารหล่อลื่นเป็นแกนนอน และอัตราการไหลของสารหล่อลื่นเป็นแกนตั้ง โดยผลของการพลอตกราฟเป็นไปดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟระหว่างอัตราการไหลและเวลานับจากการขุดเจาะ

ผลของกราฟจะสามารถสรุปได้ว่าดินรอบตัวท่อดันจะเริ่มเกิดการยุบตัวหลังจากผ่านการขุดเจาะไปแล้วเป็นเวลาประมาณ 20 ชั่วโมง และจะยุบตัวลงมาอย่างเป็นสัดส่วนกับเวลาที่ผ่านไป จนเริ่มสัมผัสกับผิวภายนอกของท่อเกือบจะทั้งหมดเมื่อเวลาผ่านหลังจากการถูกขุดเจาะเป็นเวลาประมาณ 40 ชั่วโมง

ผลของการทดลองนำไปสู่การนำเสนอวิธีการและขั้นตอนการฉีดสารหล่อลื่นในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่มีคุณสมบัติของดินและคุณลักษณะของโครงการคล้ายคลึงกับทั้ง 3 โครงการที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ โดยจะให้ทำการวาง lubrication pipe ไว้ในตำแหน่งที่ไกลจากหัวเจาะมากที่สุดที่ดินในช่วงบริเวณของ lubrication pipe นั้นยังไม่ผ่านการขุดเจาะไปเกิน 20 ชั่วโมง โดยที่ให้ทำการฉีดด้วยปริมาณเท่ากับปริมาณช่องว่างระหว่างผิวดินกับท่อดัน โดยในการดันท่อในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑลนั้น การก่อสร้างมักจะทำตอนกลางคืนและหยุดการก่อสร้างเพื่อเปิดการจราจรในตอนกลางวัน ประกอบกับเวลาเฉลี่ยที่ใช้การดันท่อต่อ 1 ท่อดันคือ 1 ชั่วโมง ดังนั้น การวาง lubrication pipe ไว้ที่ท่อดันที่ 4 นับจากหัวเจาะจึงเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด

ในส่วนของ subsequent injection นั้น หากคำนวณตามรูปที่ 10 จะพบว่าในกรณีดินเหนียวที่มีความซึมผ่านของน้ำได้น้อยมาก ส่งผลให้การซึมหายของสารหล่อลื่นผ่านผิวดินมีค่าน้อย เมื่อทำการคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณของ initial injection ที่ฉีดผ่าน lubrication pipe แรกข้างต้น นั้นพบว่า ปริมาณที่ต้องการใช้ในการฉีด subsequent injection มีค่าประมาณเพียง 0.18 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมากจึงทำให้การฉีด subsequent injection ไม่มีความจำเป็น

วิธีการและขั้นตอนที่ได้นำเสนอนั้นถูกนำไปทดลองในสนามในโครงการดันท่อรถไฟฟ้าสายสีเหลืองทั้งหมด 2 ช่วงดัน โดยผลของการพลอตกราฟแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับโครงการแพรกษาและร่มเกล้าเป็นดังรูปที่ 14

รูปที่ 14 เปรียบเทียบแรงเสียดทานจากการดันท่อในสนามด้วยวิธีที่นำเสนอ

ผลของการคำนวณค่า Adhesion Factor ของแต่ละกรณีเป็นไปดังนี้

- กรณีที่ไม่มีการใช้สารหล่อลื่น: Adhesion Factor = 0.1408
- กรณีที่ initial injection อยู่ในช่วงมากกว่า 40 ชั่วโมงหลังจากการขุดเจาะ (โครงการแพรกษา): Adhesion Factor = 0.1288
- กรณีที่ initial injection อยู่ในช่วงระหว่าง 20 - 40 ชั่วโมงหลังจากการขุดเจาะ (โครงการร่มเกล้า): Adhesion Factor = 0.0797
- กรณีที่ initial injection อยู่ในช่วงต่ำกว่า 20 ชั่วโมงหลังจากการขุดเจาะ: Adhesion Factor = 0.0719

6. บทสรุป

การทราบพฤติกรรมของดินรอบท่อดันอย่างแน่ชัดนำไปสู่การออกแบบวิธีการและขั้นตอนการฉีดสารหล่อลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถก้าวข้ามอุปสรรคที่เกิดขึ้นโดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการก่อสร้าง ซึ่งจะก่อให้เกิดการไม่คุ้นเคยในการทำงานหรือค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่มากขึ้น เช่นการเปลี่ยนหัวเจาะที่สามารถฉีดสารหล่อหลื่นทันทีที่ขุดเจาะหรือติดตั้งระบบควบคุมการณ ท นี ติดตั้

Control Centenary Conference, Manchester, England, North West Association, Institution of Civil Engineers, pp. 173-180.

[4] PJA. (1995). *Guide to best practice for the installation of pipe jacks and micro-tunnels.* Pipe Jacking Association.

[5] Chang et al. (1997). *Pipe jacking in Cohesive Soil*. n.p.

[6] Praetorius, S. and Schößer, B. (2017). *Bentonite Handbook Lubrication for Pipe Jacking.* Ernst & Sohn.