แรงต้านทานต่อการดันท่อของชั้นดินเหนียวอ่อนในกรุงเทพฯ

นายปัณฑ์ งามแสงรัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RESISTANCE AGAINST PIPE JACKING OF BANGKOK'S SOFT CLAY

Mr. Pun Ngamsangrat

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แรงต้านทานต่อการดันท่อของชั้นดินเหนียวอ่อนในกรุงเทพฯ
โดย	นายปัณฑ์ งามแสงรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร.วีรยุทธ โกมลวิลาศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปัณฑ์ งามแสงรัตน์ : แรงต้านทานต่อการดันท่อของชั้นดินเหนียวอ่อนในกรุงเทพฯ. (RESISTANCE AGAINST PIPE JACKING OF BANGKOK'S SOFT CLAY) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี

การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบดันท่อเป็นการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินโดยไม่เปิดหน้าดิน แรงเสียดทานระหว่างดินและผิวภายนอกของท่อดันเป็นแรงต้านทานหลักที่ส่งผลต่อแรงดันรวมที่ต้องใช้ในการดันท่อ ดังนั้นการลดแรงเสียดทานโดยการฉีดสารหล่อลื่นจึงเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในงานดันท่อ อย่างไรก็ตามพฤติกรรมของดินรอบท่อดันนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของแรงเสียดทานจากสารหล่อลื่น ในปัจจุบันวิธีการและขั้นตอนในการฉีดสารหล่อลื่นระหว่างการดันท่อนั้นเป็นไปอย่างไม่มีแบบแผน งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดลองเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมที่แท้จริงของดินโดยรอบท่อดันที่เกิดขึ้นระหว่างการดันท่อ นำไปสู่การนำเสนอวิธีการและขั้นตอนการฉีดสารหล่อลื่นเพื่อให้การลดแรงเสียดทานมีประสิทธิผลสูงสุด วิธีการและขั้นตอนการฉีดสารหล่อลื่นที่ได้นำเสนอนั้นถูกนำไปทดสอบในการดันท่อทั้งหมด 2 ช่วงดัน โดยผลของการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการลดลงของแรงเสียดทานมากถึง 45 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับการฉีดสารหล่อลื่นอย่างไม่มีแบบแผน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2564 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

6170385921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Pipe Jacking, Lubricant

Pun Ngamsangrat : RESISTANCE AGAINST PIPE JACKING OF BANGKOK'S SOFT CLAY. Advisor: Asst. Prof. TIRAWAT BOONYATEE

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.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Civil Engineering Student's Signature .....

Academic Year: 2021 Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ รศ.ดร. ฐิรวัตร บุญญะฐี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ขอขอบคุณ ดร.วีรยุทธ โกมลวิลาศ สำหรับข้อแนะนำและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านในการทำวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ปัณฑ์ งามแสงรัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

..... ค

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 แรงจูงใจในการศึกษา 6

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 8

1.4 ขอบเขตของการวิจัย 8

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 9

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม 10

2.1 แรงดัน (Jacking Force) 10

2.2 การคาดคะเนค่าแรงเสียดทาน (Friction Resistance Force) 12

2.2.1 เสถียรภาพของดินรอบท่อดัน 12

2.2.2 การทดลองเพื่อทราบค่าแรงเสียดทานต่อหน่วย 14

2.2.3 สมมติฐานตั้งต้นของพฤติกรรมของอุโมงค์ 17

2.2.4 ระบบการฉีดสารหล่อลื่น 20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3 Longitudinal Deformation Profile 22
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย 24
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย 24
3.1.1 ข้อมูลแรงดันท่อ 24
3.1.2 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน 24
3.1.3 ข้อมูลจากการทำการทดลอง 24
3.2 วิธีการวิเคราะห์ 25
3.2.1 การหาพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน 25
3.2.2 การหาขอบเขตของค่า Adhesion Factor 26
3.2.3 การทดลองในสนามเพื่อเข้าใจพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน 29
3.2.4 การคำนวณเพื่อหาค่าปริมาตรการฉีดเสริม (subsequent injection volume) 35
3.2.5 การศึกษาระบบการฉีดสารหล่อลื่นและข้อจำกัดต่าง ๆ 36
3.2.6 การออกแบบระบบการฉีดสารหล่อลื่นและการทดสอบในภาคสนาม 36
บทที่ 4 การวิเคราะห์และอภิปรายผล 39
4.1 การหาพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน 39
4.2 การหาขอบเขตของค่า Adhesion Factor (α) 40
4.3 การทดลองในสนามเพื่อเข้าใจพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน 42
4.5 การคำนวณเพื่อหาค่า subsequent injection volume 46
4.6 การศึกษาระบบการฉีดสารหล่อลื่นและข้อจำกัดต่างๆ 47
4.7 การออกแบบระบบการฉีดสารหล่อลื่นและการทดสอบในภาคสนาม 50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 53
5.1 สรุปผลการวิจัย 53
5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของดินรอบท่อดัน 53
5.1.2 สรุปผลการหาขอบเขตของค่า α 54

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1.3 สรุปผลการทดลองในสนามเพื่อเข้าใจพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน 55
5.1.4 การออกแบบระบบการฉีดสารหล่อลื่นและการทดสอบในภาคสนาม 59
5.2 ข้อเสนอแนะ 60
บรรณานุกรม 61
ประวัติผู้เขียน 63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาตรของ initial injection ที่แนะนำ ในหน่วย ลบ.ม/ม ค่อระยะดันท่อ 1 ม. 21

ตารางที่ 2.2 ปริมาตรของ subsequent injection ที่แนะนำ ในหน่วย ลบ.ม/ม ค่อระยะดันท่อ 1 ม..... 21

ตารางที่ 3.1 ปริมาตรของ subsequent injection ที่แนะนำ ในหน่วย ลบ.ม/ม ค่อระยะดันท่อ 1 ม..... 35

ตารางที่ 4.1 Subsequent injection volume 46

ตารางที่ 5.1 ปริมาตรของของเหลวที่สามารถฉีดเข้าไปในแต่ละช่วงท่อดัน 55

ตารางที่ 5.2 ปริมาตรสารหล่อลื่นที่แนะนำในการฉีดสารหล่อลื่นขั้นต้นตามแต่ละท่อดัน 59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 วิธีหลักในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินสำหรับระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ 2

รูปที่ 1.2 วิธีย่อยในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินสำหรับระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ 4

รูปที่ 1.3 ท่อดัน (Jacking Pipes) 5

รูปที่ 1.4 การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีการดันท่อ 5

รูปที่ 1.5 ผังเส้นทางอุโมงค์ของระบบสาธารณูปโภค 6

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของแรงดันรวม 10

รูปที่ 2.2 วิธีการในการคาดคะเนแรงดัน 12

รูปที่ 2.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการ 12

รูปที่ 2.4 Stability Chart 13

รูปที่ 2.5 Stability Ratio 14

รูปที่ 2.6 เครื่องมือที่ติดตั้งกับท่อดัน 15

รูปที่ 2.7 กราฟพลอตระหว่างค่าแรงเค้นตั้งฉากกับแรงเค้นเฉือน 16

รูปที่ 2.8 แบบจำลองแรงเสียดทาน 16

รูปที่ 2.9 Hertzian Contact Model 17

รูปที่ 2.10 สมมติฐานตั้งต้นทั้ง 4 รูปแบบ 18

รูปที่ 2.11 ลำดับการฉีดสารหล่อลื่น 20

รูปที่ 2.12 ลักษณะการยุบตัวตามแนวอุโมงค์ 22

รูปที่ 2.13 ลักษณะการยุบตัวตามแนวอุโมงค์ ที่รัศมีของพลาสติกโซนต่าง ๆ 23

รูปที่ 3.1 สมมติฐานตั้งต้นของสภาพของดินรอบท่อดัน 25

รูปที่ 3.2 Stability Chart สำหรับกรณีที่ H/D ประมาณ 2 26

รูปที่ 3.3 กราฟระหว่างแรงเสียดทานกับระยะการดัน 28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.4 การทดลองเพื่อหาปริมาตรช่องว่างที่เหลืออยู่สำหรับระยะ 0 – 3 เมตรจากหัวเจาะ ... 30
รูปที่ 3.5 การทดลองเพื่อหาปริมาตรช่องว่างที่เหลืออยู่สำหรับระยะ 0 – 12 เมตรจากหัวเจาะ 30
รูปที่ 3.6 Volume Deformation Profile 31
รูปที่ 3.7 Longitudinal Deformation Profile 31
รูปที่ 3.8 ดินบริเวณ 0 – 3 เมตรจากบ่อดันมีค่า TE เท่ากับ 17 ชั่วโมง 32
รูปที่ 3.9 ดินบริเวณ 0 – 3 เมตรจากบ่อดันมี่ค่า TE เท่ากับ 25 ชั่วโมง 32
รูปที่ 3.10 ผลกระทบของอัตราการไหลที่เกิดจากความยาวของสาย 33
รูปที่ 3.11 สายส่งและช่องสำหรับอัดฉีดสารหล่อลื่น 34
รูปที่ 3.12 กราฟระหว่าง Time Elapsed after Excavated กับ Normalized Flow Rate..... 34
รูปที่ 3.13 กราฟระหว่างระยะห่างจากหัวเจาะ กับ Normalized Flow Rate 35
รูปที่ 4.1 กราฟระหว่างระยะจากบ่อดันและค่าแรงเสียดทาน 41
รูปที่ 4.2 Adhesion factor ในกรณีต่าง ๆ 42
รูปที่ 4.3 การทดลองเพื่อหาปริมาตรที่เหลือจากการยุบตัวของดิน 43
รูปที่ 4.4 รัศมีการยุบตัวของดินเมื่อเปรียบเทียบกับ annular width กับระยะจากหัวเจาะ 43
รูปที่ 4.5 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับการยุบตัวของดินที่มีค่ารัศมีพลาสติก
โซนต่าง ๆ 44
รูปที่ 4.6 กราฟระหว่างอัตราการไหลกับ TE 45
รูปที่ 4.7 กราฟระหว่างอัตราการไหลกับระยะจากหัวเจาะ 45
รูปที่ 4.8 หัวเจาะ 47
รูปที่ 4.9 แผนแสดงลำดับการดันท่อและตำแหน่งของท่อดันที่มีการฉีดสารหล่อลื่น 48
รูปที่ 4.10 รูสำหรับฉีดสารหล่อลื่นใน lubrication pipe 49
รูปที่ 4.11 ถังผสมและปั๊มสำหรับการฉีดสารหล่อลื่น 49
รูปที่ 4.12 วาล์วความคุมการไหลของสารหล่อลื่นในแต่ละ lubrication pipe 50
รูปที่ 4.13 กราฟระหว่างระยะจากบ่อดันและค่าแรงเสียดทาน 51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.14 Adhesion factor ในกรณีต่าง ๆ 52
รูปที่ 5.1 Adhesion factor ในกรณีต่าง ๆ 54
รูปที่ 5.2 รัศมีการยุบตัวของดินเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการยุบตัวสูงสุดกับระยะจากหัวเจาะ 55
รูปที่ 5.3 กราฟระหว่างอัตราการไหลกับระยะจากหัวเจาะ 57
รูปที่ 5.4 การยุบตัวของดินที่มีค่ารัศมีพลาสติกโซนเท่ากับ 15 58
รูปที่ 5.5 ปอร์เซ็นต์การยุบตัวของดินที่ระยะต่าง ๆ จากหัวเจาะ 58
รูปที่ 5.6 Adhesion factor ในกรณีต่าง ๆ 59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

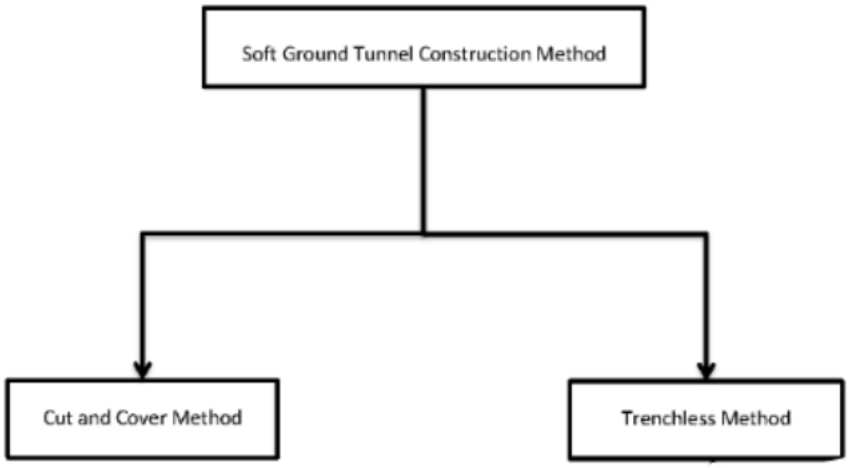
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในช่วงตลอดหลายปีที่ผ่านมาความหนาแน่นของประชากรและการเติบโตของเศรษฐกิจในกรุงเทพมหานครเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้ปริมาณความต้องการในการใช้ระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ในเขตพื้นที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย รัฐบาลจึงจำเป็นต้องก่อสร้างและรักษาสภาพระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ให้เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็น ระบบไฟฟ้า ระบบน้ำประปาและสุขาภิบาล ระบบระบายน้ำ ระบบโทรศัพท์ ฯลฯ ประกอบกับเพื่อรองรับการเป็นมหานครแห่งอาเซียน ระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ จึงควรจะมีคุณภาพ ประสิทธิภาพ และความปลอดภัยอยู่ในระดับที่สูงขึ้น อีกทั้งเพื่อทัศนียภาพที่สวยงาม คณะรัฐมนตรีจึงมีมติอนุมัติโครงการเพื่อเปลี่ยนระบบสายระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ที่เดิมถูกติดตั้งอยู่บนอากาศไปติดตั้งอยู่ใต้ดิน

ในการติดตั้งระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ใต้ดินนั้นจำเป็นต้องมีการก่อสร้างอุโมงค์หรือท่อใต้ดินเพื่อเป็นเกราะป้องกันตัวระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดความเสียหายจากแรงดันดิน น้ำใต้ดิน หรืออุปสรรคต่าง ๆ ที่อยู่ใต้ดิน ไม่ว่าจะเป็นท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน หรือระบบน้ำประปา ซึ่งท่อภายนอกนี้จะสามารถป้องกันการกัดกร่อนและยังจำเป็นสำหรับการตรวจสอบและซ่อมแซมระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ที่อยู่ภายในให้เป็นไปอย่างที่ออกแบบวางแผนไว้ ดังนั้นในการนำระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ลงไปติดตั้งอยู่ใต้พื้นผิวดินนั้น นอกเหนือจากการให้ความสำคัญกับการติดตั้งตัวระบบและส่วนประกอบอื่น ๆ การก่อสร้างตัวอุโมงค์หรือท่อใต้ดินล้วนเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญไม่แพ้กัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินสำหรับระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ นั้นถูกจำแนกได้เป็น 2 วิธีหลัก ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยวิธีแรกจะเป็นการก่อสร้างโดยวิธีขุดเปิด ซึ่งจะเป็นการก่อสร้างโดยเริ่มจากการขุดร่องเปิดหน้าดินไว้เป็นแนวยาวไปตลอดทั้งเส้นความยาวของอุโมงค์โดยจะทำการขุดจนถึงความลึกที่ได้รับการออกแบบไว้และจึงทำการวางตัวอุโมงค์ในร่องขุดนั้น จากนั้นจึงค่อยทำการกลบดินให้กลับคืนสู่สภาพเดิม ในส่วนของวิธีที่สองในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินนั้นคือการก่อสร้างโดยที่ไม่มีการขุดเปิดซึ่งจะถูกใช้เป็นคำนิยามที่นิยามคลอบคลุมถึงเทคนิควิธีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินทุก ๆ วิธีที่มีการก่อสร้างตัวอุโมงค์ใต้ดินหรือท่อใต้ดินอยู่ระหว่างจุด 2 จุด โดยจะมีการขุดเปิดหน้าดินน้อยมากหรือไม่มีการขุดเปิดหน้าดินตลอดระยะแนวระหว่างจุด 2 จุดนั้นเลย



รูปที่ 1.1 วิธีหลักในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินสำหรับระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ

วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีขุดเปิดนั้นเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนน้อยและจะมีราคาค่าก่อสร้างถูกสำหรับโครงการที่อุโมงค์วางอยู่ในระดับตื้นจากผิวดิน เนื่องจากต้องมีการเปิดหน้าดินตลอดแนวอุโมงค์ การก่อสร้างย่อมจะส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและการจราจรในระดับที่สูงมาก จึงเหมาะสำหรับการก่อสร้างในพื้นที่โล่ง ๆ

ในโครงการการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินแต่ละโครงการนั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการพิจารณาเลือกวิธีที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้างจำเป็นที่จะต้องพิจารณาความเหมาะสมภายใต้ปัจจัยแต่ละปัจจัย นักวิจัยได้ทำการรวบรวมคำตอบจากการตอบแบบสอบถามของผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานถึงปัจจัยที่ควรจะนำมาใช้ในการพิจารณาเลือกวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินระหว่างวิธีขุดเปิดและวิธีที่ไม่มีการขุดเปิด โดยอันดับความสำคัญของปัจจัยเป็นไปดังนี้

1. สภาพการจราจรบนถนน
2. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
3. ตำแหน่งที่ตั้งของแนวท่อ
4. ลักษณะทางกายภาพของถนน
5. ขนาดและลักษณะของอุปสรรคใต้ดิน
6. ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณที่วางท่อ
7. ราคาค่าก่อสร้าง
8. ความลึกของอุโมงค์

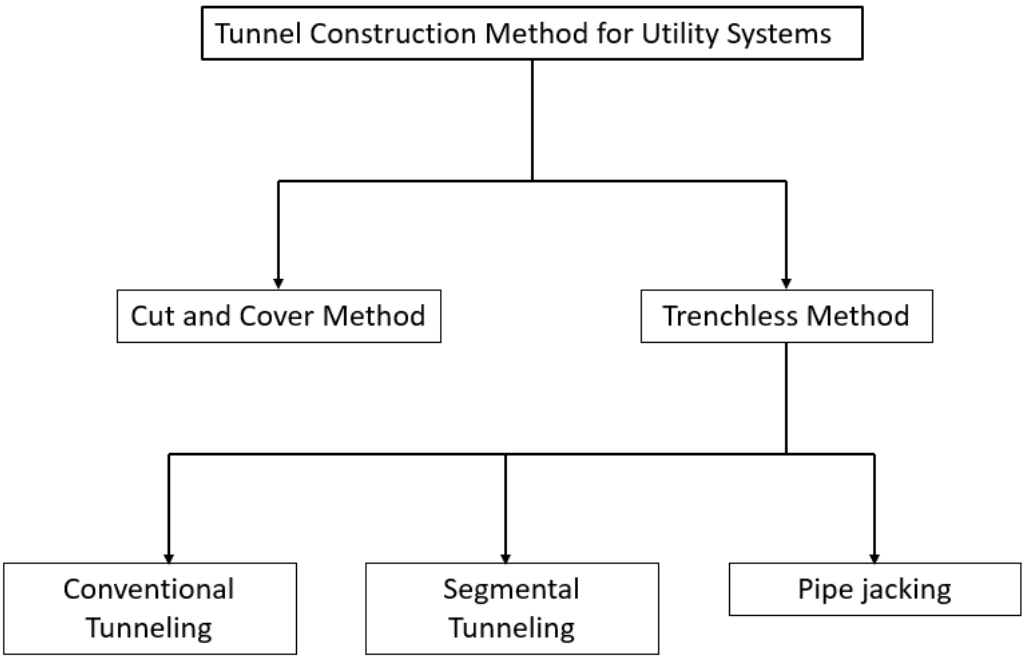
โครงการการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในเขตเมืองใหญ่จะมีลักษณะปัจจัยที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกันในแต่ละโครงการ เช่นสภาพการจราจรบนถนนที่ติดขัด มีย่านที่คนอยู่อาศัยหนาแน่นมากตลอดแนว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โครงการ ความลึกของอุโมงค์จำเป็นต้องอยู่ที่ระดับความลึกมากกว่า 2 เมตร จากระดับผิวดิน ซึ่งจากการพิจารณาความเหมาะสมภายใต้ปัจจัยแต่ละปัจจัยแล้วนั้น การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินโดยวิธีที่ไม่มีการเปิดขุดแนวจะมีความเหมาะสมมากกว่า ประกอบกับการที่ปัจจุบันรัฐบาลมีนโยบายให้การวางระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ให้เป็นไปอย่างเรียบร้อย ทางกรุงเทพมหานครซึ่งตระหนักถึงความจำเป็นในการลดผลกระทบและมลภาวะที่จะเกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินโดยวิธีขุดเปิดจึงมีนโยบายที่จะไม่อนุญาตให้มีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีการขุดเปิดในพื้นที่เขตเมืองและชุมชน

การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินโดยวิธีที่ไม่มีการขุดเปิดสำหรับการติดตั้งระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ นั้นจะนิยมทำการก่อสร้างในรูปแบบของ 3 วิธีย่อย ดังที่แสดงในรูป 1.2 โดยวิธีแรกเป็นวิธีการขุดเจาะแบบดั้งเดิม (Conventional Tunnelling Method) ซึ่งใช้ค้ำยันเพื่อป้องกันดินถล่มจากหลังคาและผนังอุโมงค์ และใช้แรงงานคนหรือรถขุดดินในการขุดดินหน้าอุโมงค์ ในปัจจุบันนิยมใช้โครงเหล็กโค้งและเหล็กสลักเย็บดินเป็นค้ำยัน โดยจะพ่นคอนกรีตร่วมด้วย การก่อสร้างวิธีนี้เรียกว่า วิธี NATM (New Austrian Tunnelling Method) ซึ่งจะออกแบบให้ใช้ค้ำยันเท่าที่จำเป็นโดยยอมให้เกิดการยุบตัวของดินหรือหินที่อยู่รอบตัวอุโมงค์ในระดับที่เหมาะสม การปรับสภาพการกระจายหน่วยแรงจะเกิดขึ้นในดินหรือหินที่เกิดการยุบตัว และหน่วยแรงในดินและหินนั้นจะกลับเข้าสู่สภาวะสมดุล การใช้กำลังของดินแข็งหรือหินที่ได้กลับเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วนั้นมาช่วยในการค้ำยันจะสามารถลดปริมาณค้ำยันที่ต้องทำการติดตั้งซึ่งส่งผลให้ค่าก่อสร้างต่ำลงตามลำดับ การวางแผนการแบ่งย่อยการขุดพื้นที่หน้าตัดอุโมงค์ทีละช่วงและติดตั้งค้ำยันจะทำการออกแบบโดยอิงจากผลการตรวจวัดในสนาม ดังนั้นการตรวจวัดค่าการยุบตัวและหน่วยแรงในสนามจะเป็นเครื่องบ่งชี้ว่าระบบที่ค้ำยันที่เลือกใช้นั้นสอดคล้องและเหมาะสมกับสภาพดินหรือไม่ หรือจำเป็นต้องเพิ่มการค้ำยันเพื่อปรับให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นหรือไม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 1.2 วิธีย่อยในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินสำหรับระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ

การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีการขุดเจาะแบบดั้งเดิมในชั้นดินที่มีเสถียรภาพต่ำนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีเสริมเข้ามาช่วย ยกตัวอย่างเช่น การใช้อากาศอัดหรือการลดระดับและความดันน้ำใต้ดิน การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีการขุดเจาะแบบดั้งเดิมนั้นเป็นงานที่มีความยากและมีความเสี่ยงสูง ดังนั้นการทำงานจะต้องดำเนินไปด้วยความรัดกุมและสิ่งสำคัญคือต้องอาศัยการเฝ้าตรวจวัดพฤติกรรมการตอบสนองของผนังอุโมงค์และการเคลื่อนตัวของดินอย่างต่อเนื่องตลอดการก่อสร้าง เนื่องจากต้นทุนการก่อสร้างที่ต่ำกว่าการขุดเจาะโดยใช้หัวเจาะ การก่อสร้างด้วยวิธีการนี้ยังคงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับอุโมงค์ที่มีความยาวไม่มากนัก แม้ว่าการขุดเจาะโดยใช้หัวเจาะจะควบคุมเสถียรภาพได้ดีกว่าและมีผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวของดินต่อสิ่งก่อสร้างข้างเคียงน้อยกว่าก็ตาม

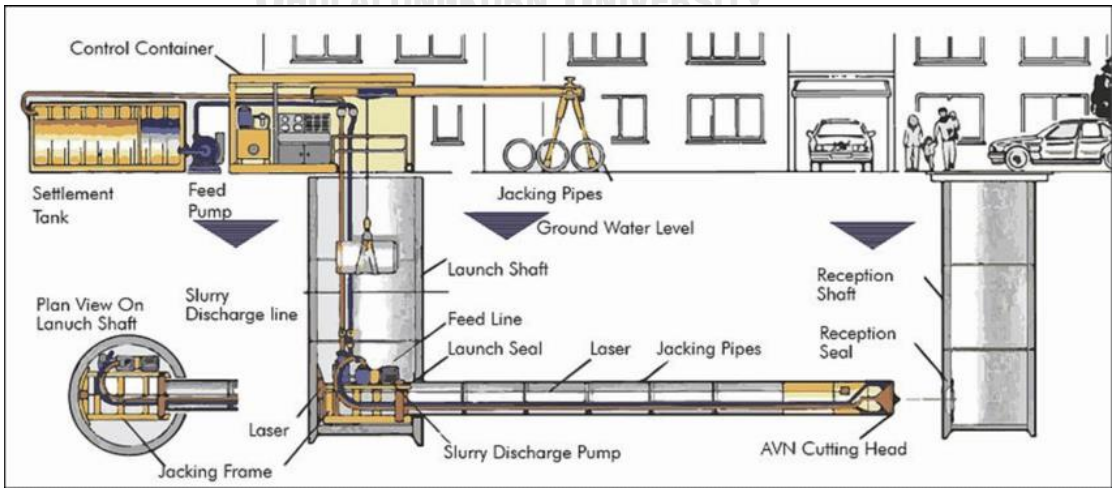
วิธีย่อยที่ 2 สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินโดยที่ไม่มีการขุดเปิดคือวิธีการขุดเจาะโดยใช้ดาดผนังอุโมงค์ (Segmental Tunneling) ซึ่งในปัจจุบันจะใช้หัวเจาะอุโมงค์เพื่อยันผนังและหน้าอุโมงค์ในขณะที่ทำการขุดเจาะดิน โดยจะทำการลำเลียงดินขุดออกไปทางท้ายหัวเจาะเพื่อลำเลียงไปทิ้งต่อไป บริเวณด้านท้ายของหัวเจาะจะทำการติดตั้งวงคอนกรีตดาดผนังอุโมงค์สลับกับการขุดเจาะดิน ซึ่งวงคอนกรีตดาดผนังอุโมงค์จะประกอบมาจากชิ้นส่วนดาดอุโมงค์ การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีนี้ไม่เหมาะกับอุโมงค์ขนาดเล็ก ด้วยข้อจำกัดด้านขนาดของตัวอุโมงค์การที่จะนำชิ้นส่วนของดาดอุโมงค์เข้าไปทำการติดตั้งที่บริเวณท้ายหัวเจาะ พื้นที่สำหรับการติดตั้งระบบลำเลียงดินและระบบอื่น ๆ รวมถึงขั้นตอนการติดตั้งโดยใช้เครื่องจักร ในตัวอุโมงค์จะเป็นไปด้วยความยากลำบากมากหรือเป็นไปไม่ได้เลย

วิธีย่อยที่ 3 ที่เป็นที่นิยมสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินโดยที่ไม่มีการขุดเปิด สำหรับระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ คือ การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีการดันท่อ ใช้ดาดอุโมงค์สำเร็จรูปซึ่งจะถูกเรียกว่าท่อดัน ดังที่แสดงในรูปที่ 1.3

รูปที่ 1.3 ท่อดัน (Jacking Pipes)

โดยท่อดันจะถูกทำการหย่อนลงไปในบ่อดันและใช้ชุดแม่แรงไฮดรอลิคที่ถูกติดตั้งไว้ในบ่อดันทำการดันท่อดันที่พึ่งถูกหย่อนลงมาต่อเข้ากับท่อดันที่ถูกดันไปก่อนหน้าตามการเคลื่อนที่ของหัวเจาะที่ถูกดันเข้าไปเป็นอย่างแรกสุด โดยจะทำการดันท่อต่อเนื่องกันไปตลอดความยาวของอุโมงค์จนไปถึงบ่อรับ ดังที่แสดงในรูปที่ 1.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 1.4 การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีการดันท่อ

ที่มา: บริษัท สยามพราวด์ โคออปเปเรชั่น จำกัด (2562)

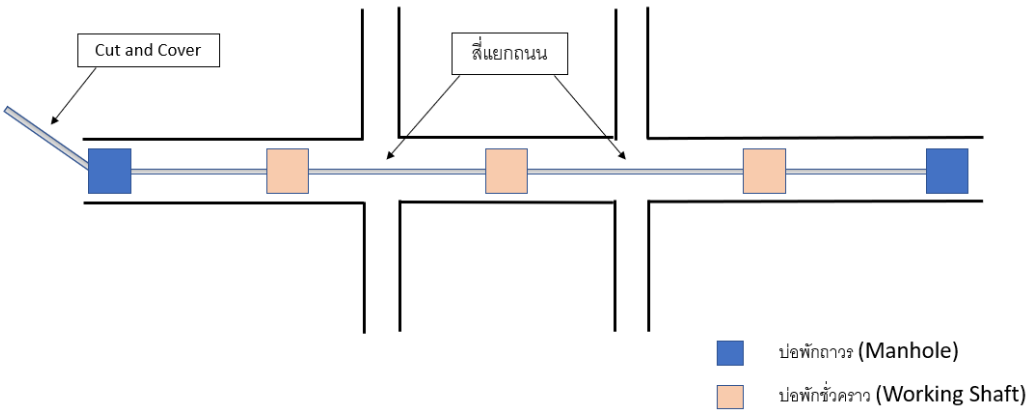
เนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีดันท่อนั้นไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานคน เครื่องจักร รวมทั้งระบบขนาดใหญ่ติดตั้งอยู่ภายในอุโมงค์ อาศัยแค่เพียงระบบลำเลียงดินซึ่งมักจะอยู่ในรูปแบบของการส่งผ่านท่อส่งและสายไฟฟ้าเชื่อมต่อไปยังหัวเจาะที่มีขนาดของระบบเล็กกว่าหัวเจาะแบบ segmental tunneling มาก จึงเหมาะสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2-3 เมตร) ซึ่งเป็นขนาดของอุโมงค์ใต้ดินสำหรับระบบสาธารณูปโภคส่วนใหญ่

1.2 แรงจูงใจในการศึกษา

โดยทั่วไปการวางแผนโครงการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีการดันท่อ สำหรับระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ นั้นจะเริ่มจากการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของบ่อพักที่จะต้องทำการก่อสร้างตลอดเส้นทางอุโมงค์ของระบบสาธารณูปโภคดังที่แสดงในรูป 1.5 โดยบ่อพักเหล่านี้จะสามารถถูกจำแนกตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

1.2.1 บ่อพักชั่วคราว – บ่อพักที่สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับเป็นบ่อดันหรือบ่อรับ ในขั้นตอนการก่อสร้างงานดันท่อ โดยหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการดันท่อจะถูกกลบปิดพร้อมรื้อฟื้นพื้นผิวถนนใหม่หรือจะถูกดัดแปลงไปเป็นบ่อพักถาวร

1.2.2 บ่อพักถาวร – บ่อพักที่ถูกดัดแปลงมาจากบ่อพักชั่วคราว หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการดันท่อ มีลักษณะเป็นโครงสร้างถาวรเพื่อใช้สำหรับการใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น สถานีสูบน้ำ บ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน



รูปที่ 1.5 ผังเส้นทางอุโมงค์ของระบบสาธารณูปโภค

ในขั้นตอนการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของบ่อพักนั้นจะเริ่มจากการพิจารณาตำแหน่งของบ่อพักถาวรบ่อแรกที่ส่วนใหญ่จะเชื่อมมาจากโครงสร้างหลักที่แตกต่างกันตามแต่ละประเภทของระบบ

สาธารณูปโภคด้วยวิธีการก่อสร้างท่อใต้ดินโดยวิธีขุดเปิด จากนั้นจึงทำการกำหนดจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งของบ่อพักถาวรบ่อต่อ ๆ ไปให้เหมาะสมโดยทำการพิจารณาปัจจัยต่างที่เกี่ยวข้องเช่น ข้อกำหนดของระบบสาธารณูปโภคแต่ละประเภทและสภาพโดยรอบของโครงการก่อสร้าง

บ่อพักชั่วคราวซึ่งจะอยู่ระหว่างบ่อพักถาวรนั้นจะถูกสร้างขึ้นเพื่อมีจุดประสงค์ให้การก่อสร้างท่อใต้ดินด้วยวิธีการดันท่อมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด โดยจะเป็นการหาจุดสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการดันท่อกับค่าก่อสร้างและความเสี่ยงที่ต้องเผชิญ ดังนั้นการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของบ่อพักชั่วคราวจึงต้องทำการพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆเช่น ค่าแรงดันรวมที่ต้องใช้ในการดัน ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ความเสี่ยงที่ต้องยอมรับ เป็นต้น

หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการวางแผนจำนวนและตำแหน่งของบ่อพักชั่วคราวคือค่าแรงดันรวมที่จะต้องใช้ในการดันท่อดันหลายๆท่อที่เรียงต่อกันเป็นแถวไปข้างหน้า ซึ่งค่าแรงดันรวมนั้นจะประกอบมาจากองค์ประกอบ 2 องค์ประกอบอันได้แก่แรงหน้าหัวเจาะอุโมงค์ซึ่งเป็นแรงที่ใช้ในการดันหัวเจาะไปข้างหน้า และแรงเสียดทานซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นระหว่างผิวภายนอกของท่อดันตลอดแถวของท่อดันกับผิวดิน

เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการดันท่อนั้นจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวภายนอกของท่อดันและผิวดิน ดังนั้นชนิดของสภาพพื้นดินที่ทำการดันท่อและชนิดของวัสดุของท่อดันจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่แตกต่างกันออกไป อีกทั้งเมื่อผิวสัมผัสมีพื้นที่ที่เพิ่มมากขึ้น ค่าแรงเสียดทานก็ย่อมจะเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นแรงดันที่ใช้ในการดันท่อจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนของท่อดันที่ถูกดันจากบ่อดัน

อย่างไรก็ตามการลดค่าแรงดันที่ต้องใช้ในการดันท่อนั้นสามารถทำได้ด้วยหลากหลายวิธีโดยการปรับเปลี่ยนวิธีการก่อสร้างเช่น การฉีดสารหล่อลื่นเข้าไปในช่องว่างระหว่างผิวภายนอกของท่อดันกับผิวดิน การเพิ่มช่องว่างระหว่างผิวภายนอกของท่อดันและผิวดิน การลดจำนวนวันหยุด การเคลือบผิวภายนอกของท่อดันด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมก็จะสามารถช่วยลดค่าแรงเสียดทานต่อหน่วยพื้นที่ได้

จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันรวมที่ต้องใช้ในการดันท่อเป็นฟังก์ชันของทั้งสภาพพื้นดิน ลักษณะโครงการ รวมถึงวิธีขั้นตอนการก่อสร้าง นักวิจัยจำนวนมากได้พยายามวิเคราะห์หาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าแรงดันรวมและพยายามหาวิธีการในการคาดคะเนแรงดันให้มีค่าแม่นยำมากที่สุด อย่างไรก็ตามเนื่องจากสภาพพื้นดินในแต่ละพื้นที่เป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีนัยยะอย่างมากต่อค่าแรงดันรวมและเป็นที่ทราบกันดีว่าพฤติกรรมของดินและปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน วิธีการก่อสร้างและท่อดันมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนอย่างมากและแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ดังนั้นผลการศึกษาและวิธีการคาดคะเนแรงดันรวมที่นักวิจัยต่าง ๆ ได้วิเคราะห์ออกมานั้นให้ผลลัพธ์การคาดคะเนที่ค่อนข้างกระจายตัวและไม่แม่นยำเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันจริงที่ใช้ในการก่อสร้างการดันท่อ

ปัญหาและความสำคัญในการคาดคะเนแรงดันที่ต้องใช้ในการดันท่อดังที่กล่าวไปข้างต้นนำไปสู่แรงจูงใจในการทำการศึกษาพฤติกรรมของดินรอบท่อดันในขณะทำการดันท่อซึ่งจะถูกนำไปเป็นสมมติฐานตั้งต้นในการออกแบบขั้นตอนและวิธีการฉีดสารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวภายนอกของท่อกับผิวดิน โดยจะทำการศึกษาจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จากการทำการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลจริงของโครงการการดันท่อในสนามจนนำไปสู่การนำเสนอวิธีการฉีดสารหล่อลื่นที่เหมาะสมพร้อมกับสมการในการคาดคะเนแรงดันที่ต้องการในการดันท่อในชั้นดินกรุงเทพฯ

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ของการวิจัยตามหัวข้อต่อไปนี้

1.3.1 เพื่อศึกษาขั้นตอนการทำงานและวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีการดันท่อ

1.3.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินรอบท่อดันในการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีการดันท่อในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล

1.3.3 เพื่อศึกษาระบบการฉีดสารหล่อลื่นที่ใช้ในโครงการและข้อจำกัดต่าง ๆ

1.3.4 เพื่อศึกษาขั้นตอนและวิธีการฉีดสารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวภายนอกของท่อกับผิวดิน

1.3.4 เพื่อศึกษาค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวภายนอกของท่อกับผิวดินที่ลดลงจากการฉีดสารหล่อลื่นด้วยวิธีการและขั้นตอนที่เหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการฉีดสารหล่อลื่นและกรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นเป็นไปอย่างไม่มีแบบแผน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ จะศึกษาถึงค่าแรงดันท่อที่ต้องใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบการดันท่อซึ่งข้อมูลแรงดันท่อได้จากการเก็บข้อมูลในโครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินบริเวณถนนแพรกษา จากถนนสุขุมวิทสถานีย่อยพุทธรักษา, โครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินบริเวณถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า และโครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน รถไฟฟ้าสายสีเหลือง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของดินรอบท่อดันซึ่งนำไปสู่การตั้งสมมติฐานตั้งต้นในการออกแบบขั้นตอนและวิธีการฉีดสารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวภายนอกของท่อกับผิวดิน

1.5.2 ทำให้ทราบถึงขั้นตอนและวิธีการฉีดสารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวภายนอกของท่อกับผิวดิน

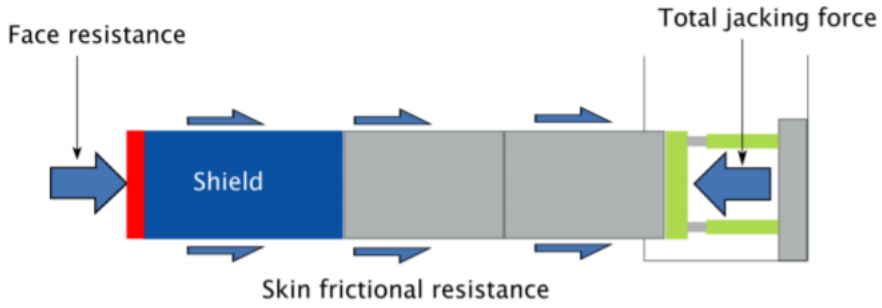
1.5.3 ทำให้ทราบถึงผลการลดลงของแรงเสียดทานระหว่างผิวภายนอกของท่อกับผิวดินจากการฉีดสารหล่อลื่นตามขั้นตอนและวิธีการที่เหมาะสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทบทวนวรรณกรรม

2.1 แรงดัน (Jacking Force)

แรงดันรวมที่ใช้ในการดันท่อนั้นจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น อันได้แก่แรงดันหน้าหัวเจาะอุโมงค์และแรงเสียดทานระหว่างผิวภายนอกของท่อดันและผิวดิน ดังที่แสดงในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของแรงดันรวม

แรงดันหน้าหัวเจาะอุโมงค์เป็นแรงต้านที่เกิดจากแรงดันดินและแรงดันน้ำที่ต้านบริเวณหน้าหัวเจาะ ซึ่งในปัจจุบันหัวเจาะที่นิยมใช้ในการดันท่อนั้นจะเป็นหัวเจาะประเภทระบบแรงดันดินสมดุล โดยที่สารละลายจะถูกฉีดเข้าไปในบริเวณห้องส่วนหน้าของหัวเจาะเพื่อที่จะให้เกิดแรงสมดุลเพื่อต้านทานแรงดันจากน้ำใต้ดิน และอัตราการเคลื่อนตัวของหัวเจาะจะสอดคล้องกับอัตราที่ดินบริเวณหน้าหัวเจาะจะถูกขุดเจาะเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ผิวดินด้านบนเกิดการทรุดตัวหรือการเกิดอูดขึ้นจากการที่ดินถูกขุดเจาะมากและน้อยเกินไปตามลำดับ ซึ่งแรงดันหน้าหัวเจาะอุโมงค์ นั้นจะมีค่าเป็นสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับแรงดันรวมทั้งหมดที่ต้องใช้ในการดันท่อ

การคาดคะเนแรงเสียดทานระหว่างผิวภายนอกของท่อดันและผิวดินที่จะเกิดขึ้นระหว่างการดันท่อนั้นค่อนข้างจะมีความซับซ้อนจากหลากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามนักวิจัยจำนวนมากจะได้เห็นพ้องตรงกันว่าแรงเสียดทานที่เกิดที่ผิวของท่อและผิวดินจะเป็นไปตามสมการพื้นฐานของแรงเสียดทานดังสมการที่ 2.1

$$f_s = \frac{\mu \cdot N}{A} \qquad 2.1$$

เมื่อ: f_s = แรงเสียดทานต่อหน่วยพื้นที่

μ = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

N = แรงตั้งฉาก

A = พื้นที่สัมผัสระหว่างผิวดินกับผิวของท่อ

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นจะมีค่าเฉพาะตัวระหว่างวัสดุของท่อดันและดิน นักวิจัยจำนวนมากนิยมที่จะใช้ ค่าแรงเสียดทานภายในของดินเป็นตัวแทนของดินเพื่อนำมาคูณกับค่าตัวคูณปรับลด ที่มีค่าอยู่ระหว่าง $\frac{1}{4}$ ถึง $\frac{3}{4}$ ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและชนิดของวัสดุท่อดัน

มีวิธีหลากหลายรูปแบบที่ถูกนำเสนอเพื่อใช้ในการหาค่าแรงตั้งฉากที่จะเกิดขึ้นในการดันท่อ นักวิจัยบางกลุ่มได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าแรงตั้งฉากโดยการใช้ค่าแรงดันดินในแนวดิ่งซึ่งคำนวณมาจากค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความลึกของตัวท่อจากผิวดิน อย่างไรก็ตามนักวิจัยจำนวนมากได้อธิบายถึงพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของดินที่อยู่เหนือท่ออุโมงค์ ที่จะส่งผลให้ค่าแรงตั้งฉากที่เกิดขึ้นกับตัวท่อดันนั้นมีขนาดน้อยกว่าค่าแรงดันดินในแนวดิ่ง โดยที่วิธีส่วนมากจะอ้างอิงมาจากการทดลอง Trap Door ที่เสนอโดย Terzaghi นักวิจัยต่าง ๆ ได้พยายามอธิบายพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของดินที่จะส่งผลต่อค่าแรงตั้งฉากด้วยวิธีการคำนวณหลากหลายรูปแบบ ซึ่งผลจากการคำนวณในแต่ละรูปแบบนั้นยังมีความแตกต่างกันค่อนข้างมากและยังเป็นที่ถกเถียงกันถึงพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักที่แท้จริงของดินที่อยู่เหนือท่ออุโมงค์

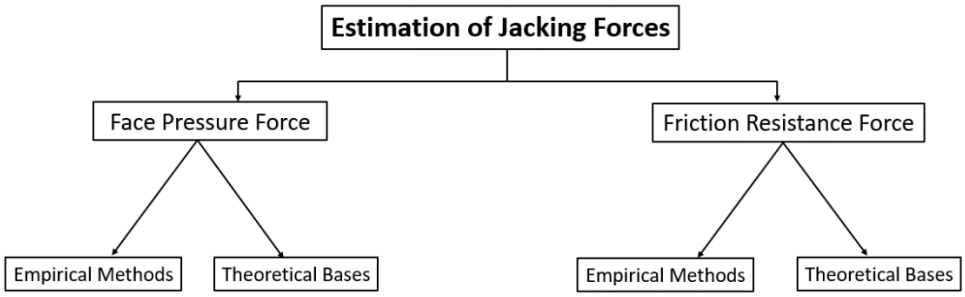
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตราบจบถึงปัจจุบันยังคงเป็นที่ถกเถียงกันอย่างมากถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและวิธีการหาค่าแรงตั้งฉากที่จะเหมาะสมต่อการนำมาคำนวณค่าแรงเสียดทานต่อหน่วย ซึ่งตราบใดที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหรือค่าแรงตั้งฉากตัวใดตัวหนึ่งยังไม่สามารถหาข้อสรุปถึงวิธีการหาค่าที่ชัดเจนมากขึ้นได้ ค่าของอีกตัวแปรหนึ่งย่อมไม่สามารถหาข้อสรุปที่แน่ชัดขึ้นได้เช่นกัน จากปัญหาที่กล่าวมานั้น งานวิจัยบางส่วนจึงเลือกที่จะทำการศึกษาโดยการมองเป็นภาพใหญ่โดยการวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันรวมที่ได้มาจากโครงการก่อสร้างการดันท่อโดยใช้วิธีเชิงประสบการณ์และหาความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยเพื่อนำไปสู่การนำเสนอสมการคาดคะเนแรงดันรวมที่ต้องใช้ในการดันท่อ

Yonan (1993) จึงได้ทำการสรุปถึงวิธีการในการคาดคะเนแรงดันที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการดันท่อดังที่แสดงในรูป 2.2 ซึ่งถูกประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบดังที่กล่าวไปข้างต้น โดยวิธีในการได้มาของแต่ละองค์ประกอบจะมีทั้งสิ้น 2 วิธีดังนี้

1) สมการเชิงประสบการณ์ - ซึ่งได้มาจากการนำข้อมูลที่เก็บได้จากโครงการการดันท่อในสนามมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับค่าแรงดันที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการดันท่อ

2) ทฤษฎีทางวิชาการ – ซึ่งเป็นการนำหลักทฤษฎีทางวิชาการที่เกี่ยวข้องมาใช้เป็นจุดเริ่มต้นและอ้างอิงในการหาความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับค่าแรงดันที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการดันท่อ เช่น ทฤษฎีทางด้านปฐพีกลศาสตร์ ทฤษฎีทางด้านแรงดันดิน เป็นต้น



รูปที่ 2.2 วิธีการในการคาดคะเนแรงดัน

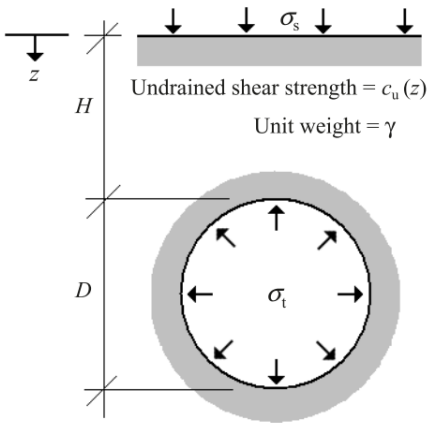
ที่มา: Yonan (1993)

2.2 การคาดคะเนค่าแรงเสียดทาน (Friction Resistance Force)

2.2.1 เสถียรภาพของดินรอบท่อดัน

Sloan, Wilson, Abbo, and Lyamin (2011) ได้นำเสนอวิธีในการคำนวณที่ใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพของสภาพดินโดยรอบของท่อดันสำหรับดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวภายใน โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.3

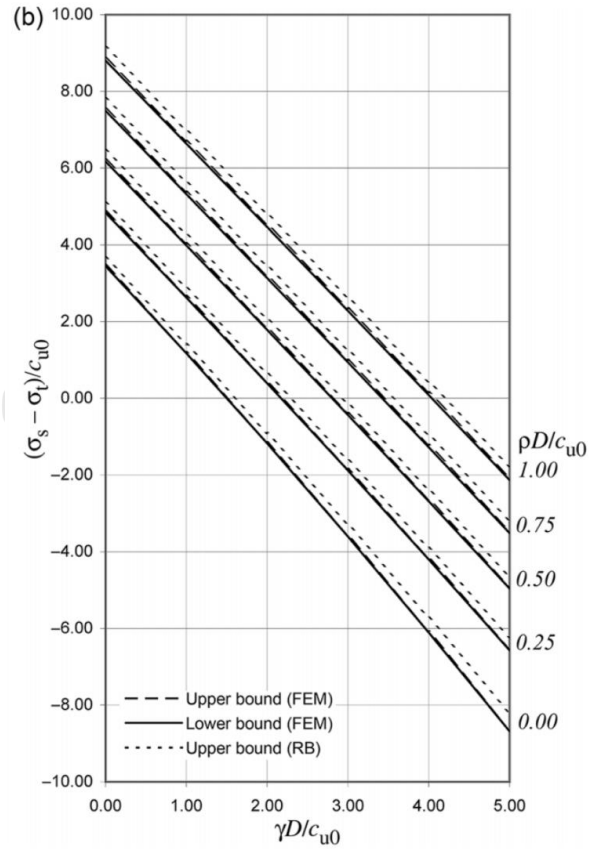
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการ

ค่า σ_T นั้นแสดงถึงค่าแรงดันภายในอุโมงค์ที่ต้องการในการค้ำยันอุโมงค์ให้มีเสถียรภาพเพียงพอ ไม่มีการยุบตัวของดินรอบท่อดัน ดังนั้นหากค่า σ_T ที่คำนวณออกมาได้เป็นค่าบวกนั้นแสดงถึงว่าอุโมงค์จำเป็นต้องมีแรงดันภายใน เช่น จากสารหล่อลื่นไม่น้อยกว่าค่า σ_T เพื่อที่จะค้ำยันดินบริเวณรอบไม่ให้เกิดการยุบตัว ในทำนองเดียวกันหากค่า σ_T คำนวณออกมาได้นั้นมีค่าติดลบ จะแสดงให้เห็นว่าอุโมงค์มีเสถียรภาพที่เพียงพอ ต้องเกิดแรงดึงจากภายในเพิ่มเท่ากับค่า σ_T เพื่อที่จะให้ดินบริเวณรอบเริ่มเกิดการยุบตัว

งานวิจัยของ Sloan et al. นั้นมาจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี finite element ซึ่งเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์หาค่า σ_T นั้น Sloan จึงได้นำเสนอออกมาในรูปแบบของ Stability chart ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในกรณีที่อุโมงค์อยู่ในชั้นดินที่ค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำคงที่ในระดับตั้งแต่ผิวดินจนถึงอุโมงค์ ค่า ρ จะถือว่ามีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งหากทำการคำนวณค่า $\frac{\gamma D}{c}$ แล้วลากขึ้นไปตัดกับกราฟที่ถูกแทนค่า ρ ด้วย 0 นั้นจะทำให้ทราบค่า $\frac{\sigma_s - \sigma_t}{c}$ จึงจะทำให้แก้สมการหาค่า σ_T ได้ โดยกราฟที่แสดงในรูปที่ 2.5 นั้น เป็นกราฟสำหรับอุโมงค์ที่มีค่า $\frac{H}{D}$ ประมาณ 2



รูปที่ 2.4 Stability Chart

ที่มา: Sloan et al. (2011)

Pipe Jacking Association (1995) ได้นำเสนอสมการในรูปแบบที่คล้ายคลึงกันในการตรวจสอบเสถียรภาพของสภาพดินโดยรอบของท่อดัน ดังสมการที่ 2.2 สำหรับดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวภายในอุโมงค์จะมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องอาศัยแรงค้ำยันจากสารหล่อลื่นก็ต่อเมื่อค่า σ_T ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.2 มีค่าน้อยกว่า 0

$$\frac{\sigma_T}{S_u} = \frac{\gamma D}{S_u}\left(\frac{H}{D}+\frac{1}{2}\right) - T_C \qquad 2.2$$

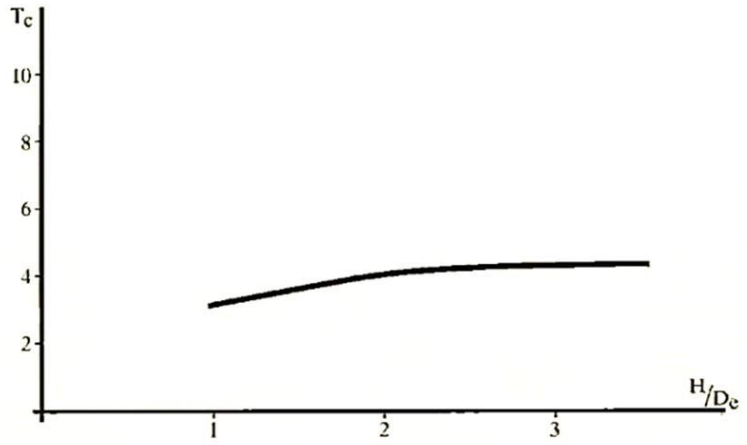
เมื่อ: H = ความลึกจากผิวดินจนถึงยอดอุโมงค์, m.

S_u = Undrained Shear Strength, Ton/ sq. m.

γ = ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน, Ton/cubic m.

T_c = Stability Ratio จากรูปที่ 2.3

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวเจาะ, m.



รูปที่ 2.5 Stability Ratio

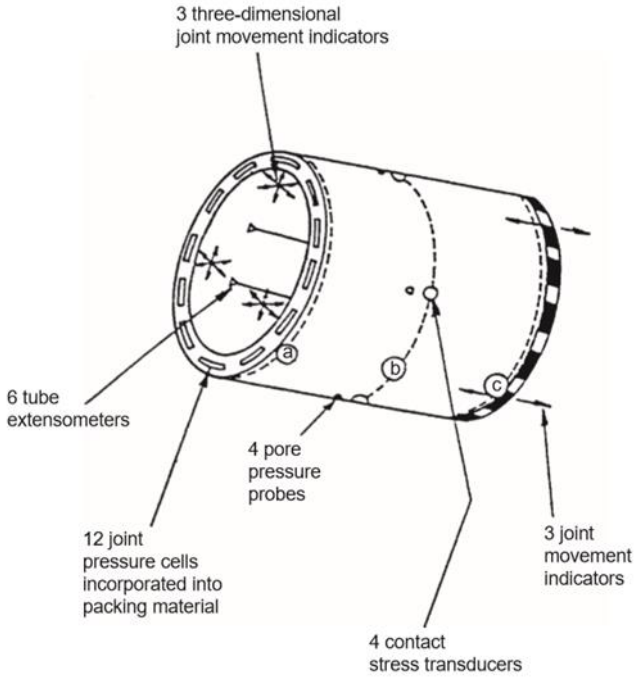
ที่มา: Pipe Jacking Association (1995)

2.2.2 การทดลองเพื่อทราบค่าแรงเสียดทานต่อหน่วย

เนื่องจากค่าแรงเสียดทานต่อหน่วยนั้นเป็นฟังก์ชั่นของค่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าหน่วยแรงตั้งฉากที่กระทำต่อท่อดัน ซึ่งดังที่กล่าวไปข้างต้นหากยังไม่สามารถทราบค่าของตัวใดตัวหนึ่งได้อย่างแน่ชัดก็จะไม่สามารถทราบค่าของอีกหนึ่งตัวได้

Norris (1992) ได้ทำการสำรวจปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างท่อดันและดินรอบท่อดันในระหว่างการดันท่อทั้งหมด 9 โครงการ โดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดต่าง ๆ ไว้กับท่อทดสอบ ดังที่

แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งท่อทดสอบนี้จะเป็นหนึ่งในท่อดันที่ถูกดันเข้าไปในแถวของท่อดันเช่นเดียวกับท่อดันอื่น ๆ

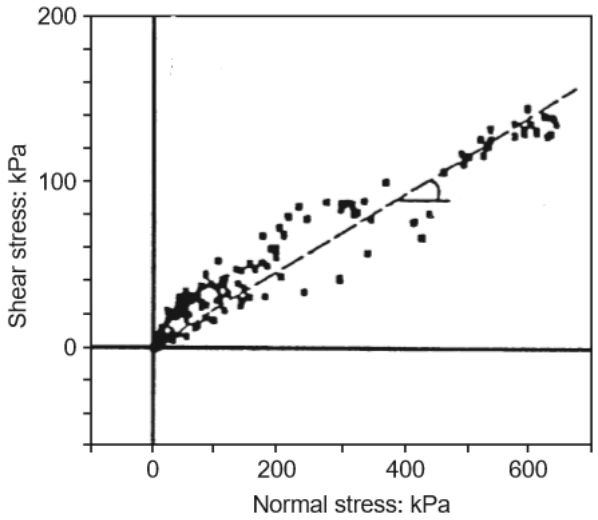


รูปที่ 2.6 เครื่องมือที่ติดตั้งกับท่อดัน

ที่มา: Norris (1992)

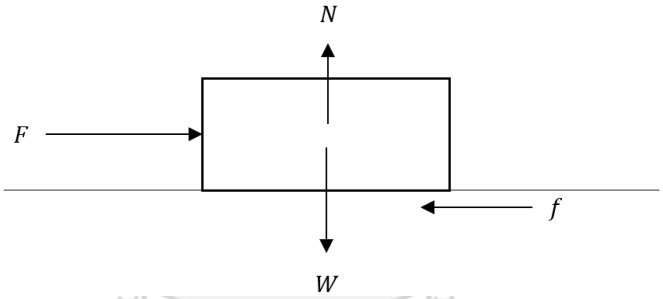
Contact stress transducer คือหนึ่งในเครื่องมือวัดที่ถูกติดตั้งไว้บนท่อทดสอบ ซึ่งถูกติดตั้งไว้เป็นจำนวนอย่างละ 1 ชุดที่บริเวณด้านบนของท่อ ด้านล่างของท่อ และด้านซ้ายและด้านขวาของท่อ โดยที่ contact stress transducer แต่ละชุดจะสามารถวัดค่าแรงตั้งฉาก และค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ณ แต่ละด้านของท่อดันตามที่ได้ถูกติดตั้งเอาไว้

เมื่อนำค่าแรงตั้งฉากต่าง ๆ ที่วัดได้มาพลอตร่วมกับแรงเฉือนเป็นคู่ โดยกำหนดให้แกนนอนเป็นค่าแรงตั้งฉากและแกนตั้งเป็นค่าแรงเฉือน เมื่อทำการหาเส้นตรงที่เป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมดบนกราฟด้วยวิธีการวิเคราะห์ถดถอย ค่าความชันของกราฟเส้นตรงจะแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างดินกับท่อดันนั้น ๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเมื่อทราบทั้งค่าแรงตั้งฉากและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแล้วนั้นก็จะสามารถหาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการดันท่อได้จากสมการพื้นฐานของแรงเสียดทานดังที่แสดงในรูปที่ 2.8 และสมการที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.7 กราฟพลอตระหว่างค่าแรงเค้นตั้งฉากกับแรงเค้นเฉือน

ที่มา: Norris (1992)



รูปที่ 2.8 แบบจำลองแรงเสียดทาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$F_w = \mu N \quad (2.3)$$

$$\mu = (\tan\delta) \quad (2.4)$$

ในการดันท่อโครงการหนึ่งที่ Norris ทำการทดสอบในเมือง Bolton ซึ่งเป็นการดันท่อในชั้นดินเหนียวแข็ง เมื่อนำค่าแรงตั้งฉากและค่าแรงเฉือนมาพล็อตกราฟเพื่อหามุมสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานพบว่า δ ที่หาได้จากการขุดอุโมงค์ในช่วงไม่มีฝน (ระยะ 0 – 35 ม. จากบ่อดัน) และในช่วงฝนตกหนัก (ระยะ 35 ม. เป็นต้นไป) มีค่าเท่ากับ 19° และ 12.2° ตามลำดับ ค่ามุมสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ลดลงนี้สอดคล้องกับการทดลองในห้องปฏิบัติการของ (Potyondy, 1961) ที่สรุปว่าค่ามุมสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างคอนกรีตและดินเหนียวแข็งจะมีค่าลดลงเมื่อค่าความชื้นของดินมีค่าเพิ่มมากขึ้น

Norris ยังได้สังเกตพบว่าค่าแรงเฉือนแปรผันตรงกับแรงตั้งฉากในช่วงแรก อย่างไรก็ตามเมื่อค่าแรงตั้งฉากมีค่าถึงจุด ๆ หนึ่งแล้วจะลู่เข้าใกล้ค่าแรงเฉือนค่า ๆ หนึ่ง โดยจะไม่ได้ขึ้นกับค่าแรงตั้งฉากอีกต่อไป

Haslem (1986) ได้เสนอว่าเมื่อความชื้นในดินเหนียวอ่อนเพิ่มสูงขึ้นตำแหน่งที่เกิดการเฉือนจะเปลี่ยนจากบริเวณผิวสัมผัสของคอนกรีตและดินเหนียวไปเป็นในตัวเนื้อดินเหนียวเอง โดยค่าแรงเสียดทานจะเป็นไปดังสมการที่ 2.5 และรูปที่ 2.9

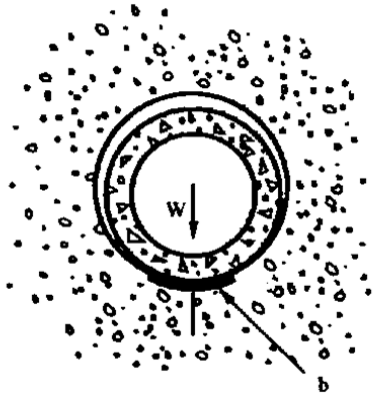
$$F_{SC} = \alpha S_u b \qquad 2.5$$

เมื่อ: F_{sc} = แรงเสียดทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของอุโมงค์, kN/m.

α = Reduction Factor

S_u = ค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน, kPa

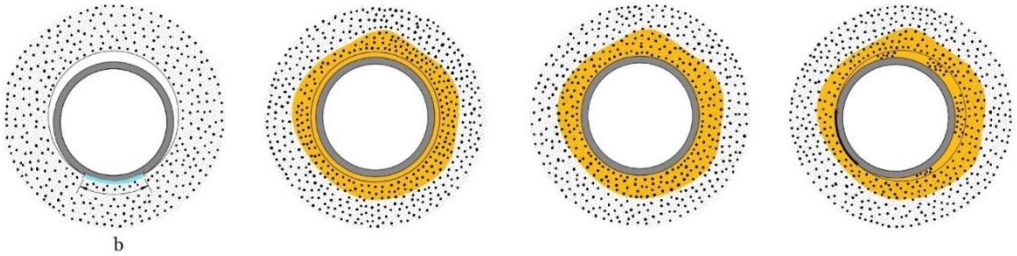
b = ระยะสัมผัสระหว่างผิวของท่อดันและผิวดิน, m.



รูปที่ 2.9 Hertzian Contact Model

2.2.3 สมมติฐานตั้งต้นของพฤติกรรมของอุโมงค์

งานวิจัยต่าง ๆ ได้อ้างอิงทฤษฎีทางวิชาการเพื่อนำเสนอสูตรในการคำนวณหาค่าแรงเสียดทานที่จะเกิดขึ้นระหว่างการดันท่อโดยสูตรในการคำนวณเหล่านี้ล้วนพิสูจน์หรือพัฒนาโดยเริ่มมาจากการตั้งสมมติฐานถึงพฤติกรรมของดินโดยรอบกับท่อดันในระหว่างการดันท่อ งานวิจัยแต่ละชิ้นจึงตั้งอยู่บนสมมติฐานที่แตกต่างกัน ซึ่งจะสามารถแยกสมมติฐานตั้งต้นของงานวิจัยได้ออกมาทั้งหมด 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สมมติฐานตั้งต้นทั้ง 4 รูปแบบ
ที่มา: Ye (2019)

สมมติฐานตั้งต้นที่ 1: ดินที่อยู่รอบช่องว่างอุโมงค์ที่ถูกขุดโดยหัวเจาะมีเสถียรภาพเพียงพอด้วยความแข็งแรงของตัวดินเอง ซึ่งจะส่งผลให้ท่อดันที่ถูกดันตามหัวเจาะสัมผัสกับผิวดินเฉพาะส่วนฐานของท่อดันอันเป็นผลมาจากน้ำหนักของตัวท่อดันเอง โดยไม่มีการฉีดสารหล่อลื่นในระหว่างการดันท่อ

การคำนวณค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในการดันท่อในชั้นดินเหนียวที่มีพฤติกรรมดินรอบท่อเป็นไปดังสมมติฐานตั้งต้นที่ 1 จะใช้สมการ 2.5 ที่ถูกนำเสนอโดย Haslem (1986) อย่างไรก็ตามค่า α ที่ใช้ในสมการนั้นควรจะต้องระลึกไว้ว่าเป็นค่า α สำหรับการดันท่อที่ไม่มีการฉีดสารหล่อลื่น และเป็นค่าเฉพาะสำหรับค่า S_u นั้น ๆ จึงเป็นที่มาของสมการคำนวณค่าแรงเสียดทานที่ 2.6

$$F_{SC} = \alpha S_u b \qquad 2.6$$

สมมติฐานตั้งต้นที่ 2: ช่องว่างระหว่างผิวนอกของท่อกับผิวดิน (Annulus) ถูกเติมเต็มไปด้วยสารหล่อลื่นที่ถูกฉีดเข้าไปในระหว่างการดันท่อ ประกอบกับดินที่อยู่รอบช่องว่างอุโมงค์มีเสถียรภาพจากแรงค้ำยันของสารหล่อลื่นนี้เอง ดังนั้นท่อดันจึงลอยอยู่ในสารหล่อลื่นโดยไม่มีการสัมผัสกับผิวดิน

ค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในการดันท่อที่มีพฤติกรรมของดินรอบท่อเป็นดังสมมติฐานตั้งต้นที่ 2 นั้นจะมีค่าต่ำมาก ซึ่งถือว่าเป็นกรณีที่เป็นอุดมคติ โดยสมการคำนวณค่าแรงเสียดทานจะเป็นไปดังสมการที่ 2.7

$$F_{SC} = C_m(\pi D_p) \qquad 2.7$$

CCGA (1975) ได้กำหนดค่า C_m เท่ากับ 0.01 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งเปรียบเสมือนค่าแรงยึดเหนี่ยวภายในของสารหล่อลื่น

สมมติฐานตั้งต้นที่ 3: ดินที่อยู่รอบช่องว่างอุโมงค์ไม่มีเสถียรภาพเพียงพอจึงเกิดการยุบตัวลงมาสัมผัสกับพื้นที่ผิวโดยรอบทั้งหมดของท่อดัน โดยอาจจะมีหรือไม่มีการฉีดสารหล่อลื่นในระหว่างการดันท่อ

การคำนวณค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในการดันท่อในชั้นดินเหนียวที่มีพฤติกรรมดินรอบท่อเป็นไปดังสมมติฐานตั้งต้นที่ 3 จะใช้สมการ 2.5 ที่ถูกนำเสนอโดย Haslem (1986) นำมาปรับเปลี่ยนระยะผิวสัมผัสระหว่างดินกับท่อดันจาก b เป็นเส้นรอบวงภายนอกของท่อดัน ดังสมการที่ 2.8

$$F_{SC} = \alpha_{full} S_u (\pi D_p) \quad 2.8$$

สมมติฐานตั้งต้นที่ 4: ดินที่อยู่รอบช่องว่างอุโมงค์มีเสถียรภาพจากแรงค้ำยันของสารหล่อลื่นถูกฉีดเข้าไป อย่างไรก็ตามบางส่วนของท่อดันได้มีการสัมผัสกับผิวดิน

การคำนวณค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในการดันท่อในชั้นดินเหนียวที่มีพฤติกรรมดินรอบท่อเป็นไปดังสมมติฐานตั้งต้นที่ 4 จะประกอบด้วย 2 องค์ประกอบคือส่วนของท่อดันที่สัมผัสกับดินและส่วนของท่อดันที่สัมผัสกับสารหล่อลื่น ดังสมการที่ 2.9

$$F_{SC} = \alpha_{full} S_u (X) + (c_m)(\pi D_p - X) \quad 2.9$$

อย่างไรก็ตามพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างท่อดัน ดินและสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นนั้นแปรผันกับปัจจัยที่หลากหลายมาก จึงเป็นการสะดวกกว่าที่จะนำสมการที่ 2.9 มาปรับรูปแบบเพื่อความสะดวกในการคำนวณดังสมการที่ 2.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$F_{SC} = \alpha_{avg} S_u (\pi D_p) \quad 2.10$$

ค่า α ในสมการที่ 2.10 นั้นเป็นค่าเป็นค่าเฉพาะสำหรับค่า S_u นั้น ๆ และมีขอบเขตค่อนข้างกว้าง โดย Praetorius and Britta (2017) ได้ระบุถึงปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า α ดังต่อไปนี้

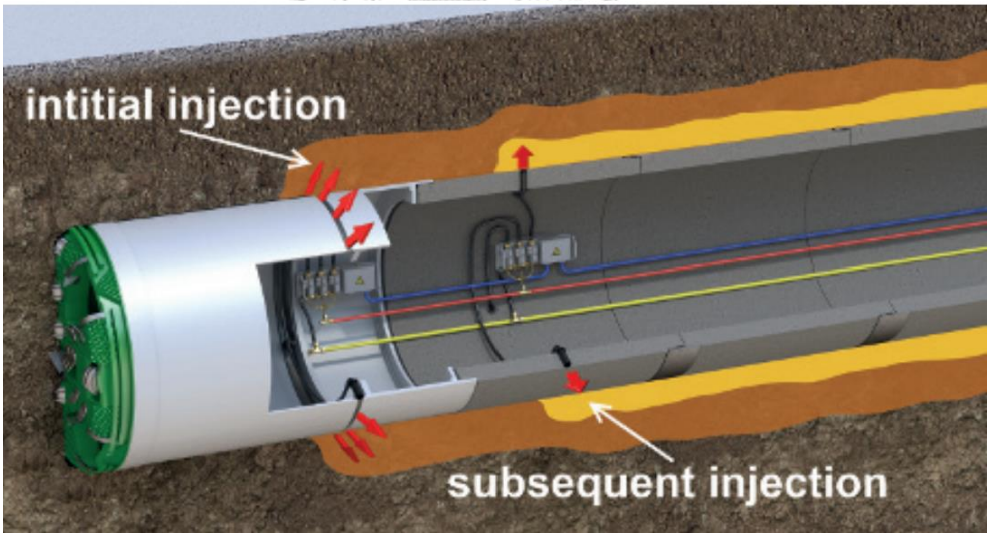
1) เสถียรภาพของอุโมงค์รอบท่อดัน
2) ระบบการฉีดสารหล่อลื่น
3) ช่องว่าง overcut
4) รอบกะการทำงาน
5) วัสดุผิวของท่อดัน

2.2.4 ระบบการฉีดสารหล่อลื่น

การฉีดสารหล่อลื่นที่เหมาะสมในโครงการการดันท่อนั้นจะสามารถทำให้ค่า α ในสมการที่ 2.12 มีค่าอยู่ในช่วงที่ต่ำในขอบเขตที่เป็นไปได้ทั้งหมดของค่า α โดย Praetorius and Britta (2017) ได้เน้นย้ำถึงความสำคัญของ 3 ปัจจัยในการออกแบบระบบการฉีดสารหล่อลื่นอันได้แก่ ชนิดของสารหล่อลื่น ปริมาตรการฉีดสารหล่อลื่น และเวลาลำดับการฉีดสารหล่อลื่น

โดยทั่วไปแล้วนั้นการฉีดสารหล่อลื่นจะถูกแบ่งวัตถุประสงค์การฉีดเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การฉีดเพื่อค้ำจุนเสถียรภาพของอุโมงค์และการฉีดเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างท่อดันและผิวดิน ซึ่งในโครงการการดันท่อในชั้นดินที่ไม่มีเสถียรภาพที่เพียงพอนั้นการฉีดเพื่อค้ำจุนเสถียรภาพของอุโมงค์นั้นจะต้องถูกให้ความสำคัญเป็นอันดับแรก

จากวัตถุประสงค์ของการฉีดสารหล่อลื่นจึงทำให้การฉีดสารหล่อลื่นถูกแบ่งออกเป็น initial injection และ subsequent injection ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยการฉีด initial injection นั้นจะต้องมีการฉีดก่อนที่ดินจะยุบตัวลงมาสัมผัสกับผิวของท่อดัน และการฉีด subsequent injection นั้นจะมีการฉีดเพื่อทดแทนการสูญหายของสารหล่อลื่นที่จะซึมหายไปในชั้นดิน



รูปที่ 2.11 ลำดับการฉีดสารหล่อลื่น
ที่มา: Praetorius and Britta (2017)

ปริมาตรของสารหล่อลื่นที่ต้องการในการบรรลุวัตถุประสงค์การค้ำจุนเสถียรภาพของอุโมงค์ของ initial injection นั้นขึ้นชนิดของดินรอบอุโมงค์และระยะการทรุดตัวที่ผิวดินที่ยอมรับได้ที่บริเวณผิวดิน และปริมาตรของสารหล่อลื่นที่ต้องการในการบรรลุวัตถุประสงค์การเติมเต็มการสูญหายจากการซึมหายของสารหล่อลื่นในขั้นตอน subsequent injection นั้นขึ้นกับค่าอัตราการซึมผ่านของดิน

รอบอุโมงค์ โดย Praetorius and Britta (2017) ได้แนะนำปริมาตรของสารหล่อลื่นดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 ปริมาตรของ initial injection ที่แนะนำ ในหน่วย ลบ.ม/ม ค่อระยะดันท่อ 1 ม.

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

ที่มา: Praetorius and Britta (2017)

ตารางที่ 2.2 ปริมาตรของ subsequent injection ที่แนะนำ ในหน่วย ลบ.ม/ม ค่อระยะดันท่อ 1 ม

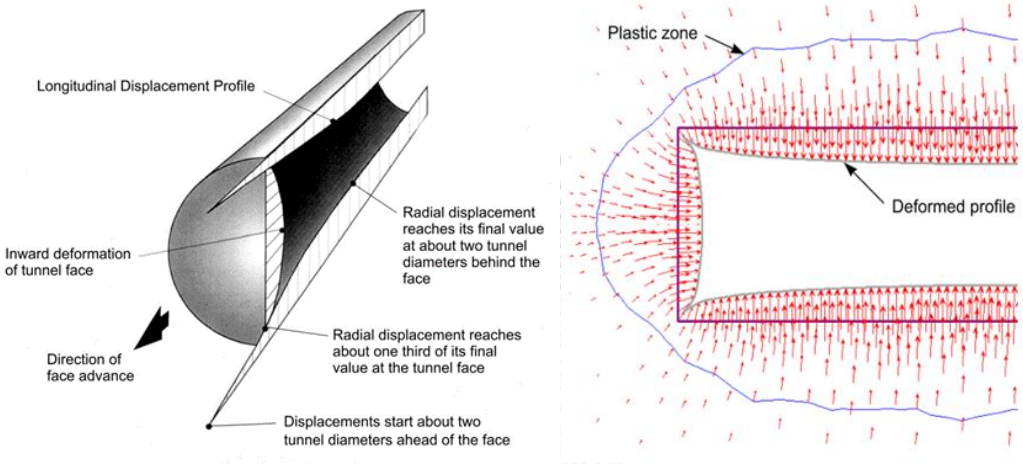
Ground	Subsequent injection volume	Ground	Subsequent injection volume
Soil		Rock	
gravel	0.196 m × excavation surface area	rock with very closely spaced fissures	0.112 m × excavation surface area
gravel/sand	0.132 m × excavation surface area	rock with medium to closely spaced fissures	0.067 m × excavation 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 $C_{\text{excavation}}$ from Formula 7.27 can be used to calculate the suspension quantities at the pipe string independent of the jacked length.

ที่มา: Praetorius and Britta (2017)

2.3 Longitudinal Deformation Profile

การขุดเจาะอุโมงค์ในสภาพดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวภายในนั้น ในช่วงที่ดินที่ถูกขุดเจาะยังไม่เกิดการอัดตัวคายน้ำ ดินรอบอุโมงค์ที่มีเสถียรภาพไม่เพียงพอนั้นจะเกิดการการยุบตัวลงมา อย่างไรก็ตาม ก้อนมวลดินที่อยู่ด้านหน้าหัวเจาะจะช่วยพยุงการยุบตัวของดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะการยุบตัวตามแนวอุโมงค์

ที่มา: Sagaseta (1998)

การยุบตัวจะขึ้นกับปัจจัยหลาย ๆ อย่างโดยเฉพาะรัศมีของพลาสติกโซนของดิน โดยในการดันท่อในดินที่มีขนาดของพลาสติกโซนใหญ่ กราฟจะมีช่วงที่ยาวกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการดันท่อในดินที่มีขนาดของพลาสติกโซนเล็กกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่ง Sagaseta (1998) ได้นำเสนอวิธีที่ใช้ในการคำนวณค่ารัศมีของพลาสติกโซนในดินเหนียวและค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวของดินที่มีค่ารัศมีของพลาสติกโซนนั้น ๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.11 ถึง 2.13

$$N = \frac{p_0 - p_i}{c_u} \qquad 2.11$$

$$\frac{r_{pm}}{r_0} = e^{\frac{N-1}{2}} \qquad 2.12$$

$$\frac{u_i}{u_{im}} = 1-(0.74)\, e^{\frac{-3x}{2r_{pm}}} \qquad 2.13$$

เมื่อ: p_0 = ค่าแรงดันดินในแนวดิ่งที่แนวศูนย์กลางของอุโมงค์

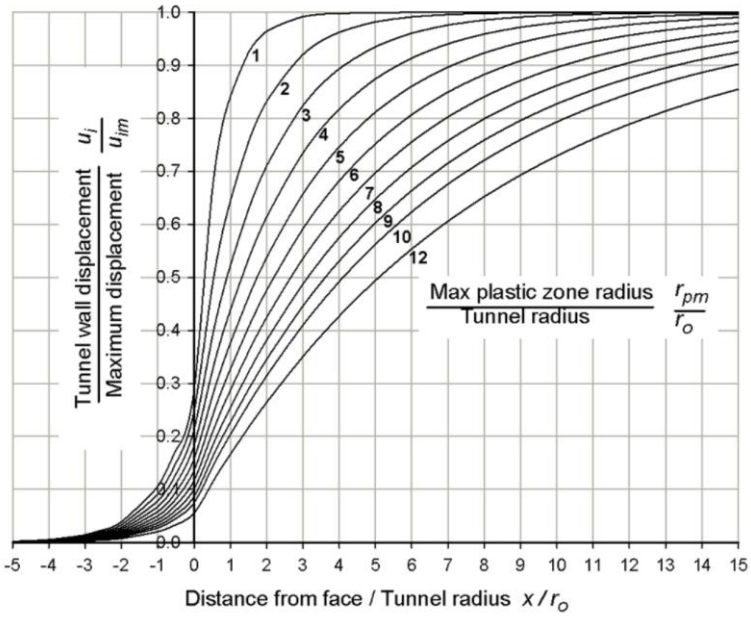
pi = ค่าแรงดันภายในอุโมงค์

Su = ค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน

rpm = ค่ารัศมีของพลาสติกโซน

r_0 = ค่ารัศมีของอุโมงค์

ui = ค่าเปอร์เซนต์การยุบตัวของดิน



รูปที่ 2.13 ลักษณะการยุบตัวตามแนวอุโมงค์ ที่รัศมีของพลาสติกโซนต่าง ๆ

ที่มา: Sagaseta (1998)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3
ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ข้อมูลแรงดันท่อ

ข้อมูลแรงดันท่อได้จากการบันทึกผ่านระบบคอมพิวเตอร์ของหัวเจาะปรับแรงดันดินสมดุลใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ของโครงการการดันท่อลอดในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล ข้อมูลแรงดันที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้มาจาก 2 โครงการ ได้แก่

1) โครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินบริเวณถนนแพรกษา จากถนนสุขุมวิท-สถานีย่อยพุทธรักษา

2) โครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ถนนศรีนครินทร์ - ร่มเกล้า

3) โครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน รถไฟฟ้าสายสีเหลือง

3.1.2 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน

ข้อมูลชั้นดินและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน ได้จากการทำการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม ได้แก่ Field Vane Shear Test, Standard Penetration Test, Cone Penetration Test, Unit Weight, Water Content, Sieve Analysis และ Atterberg Limit

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.3 ข้อมูลจากการทำการทดลอง

ในงานวิจัยฉบับนี้จะมีการทำการทดลอง 2 การทดลอง ได้แก่

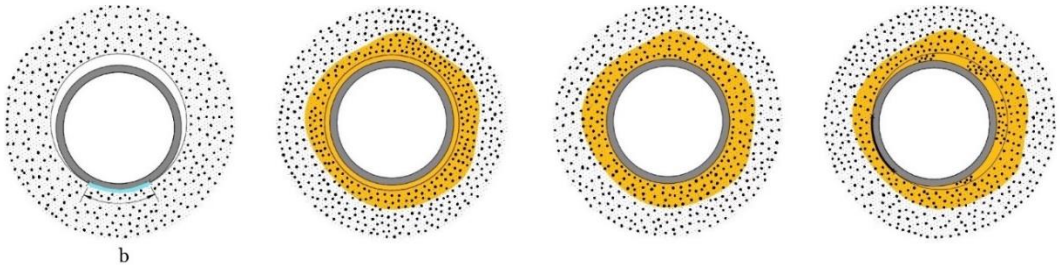
1) การทดลองเพื่อหาปริมาตรการยุบตัวของดินรอบท่อดัน

2) การทดลองเพื่อหาค่าอัตราการไหลของสารหล่อลื่น

3.2 วิธีการวิเคราะห์

3.2.1 การหาพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน

การวิเคราะห์พฤติกรรมของดินรอบท่อดันจะเป็นการคาดคะเนสภาพของดินรอบท่อดันที่ถูกขุดเจาะโดยหัวเจาะ ซึ่งมีผลต่อค่าแรงเสียดทานที่จะเกิดขึ้นอันเป็นส่วนประกอบหลักของแรงดันท่อรวม โดยจะตั้งสมมติฐานตั้งต้นถึงสภาพของดินรอบท่อดันไว้ 4 รูปแบบ ดังรูปที่ 3.1

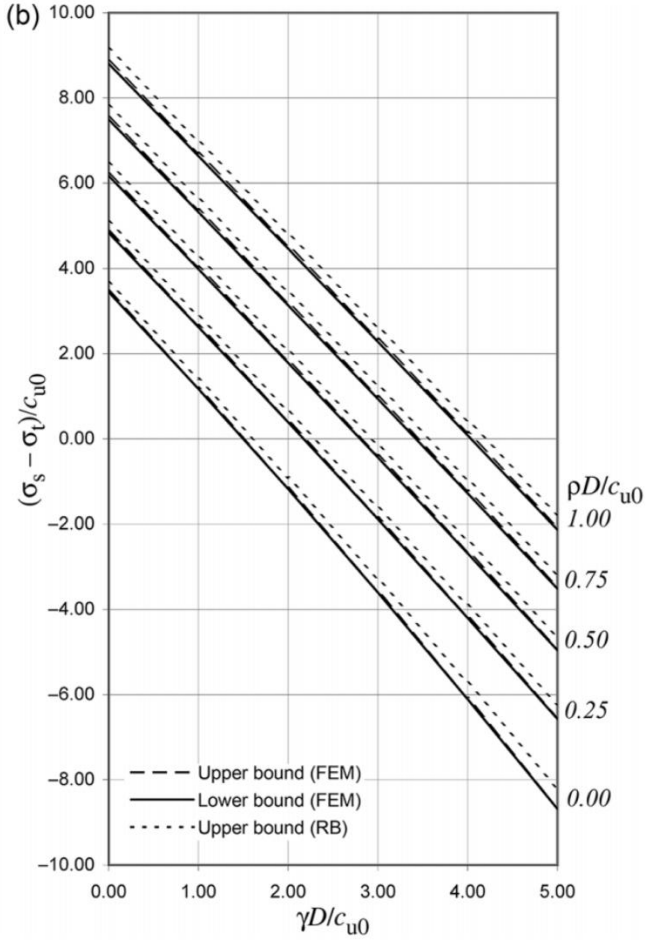


รูปที่ 3.1 สมมติฐานตั้งต้นของสภาพของดินรอบท่อดัน

ในการพิจารณาเลือกสมมติฐานตั้งต้นที่น่าจะมีความสมจริงมากที่สุดในโครงการการดันท่อนั้น จะเริ่มจากการพิจารณาเสถียรภาพของอุโมงค์โดยใช้ข้อมูลชั้นดินและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินจากรายงานการขุดเจาะชั้นดินและใช้สมการที่ถูกนำเสนอโดย Pipe Jacking Association (1995) และ Stability chart ที่ถูกนำเสนอโดย Sloan et al. (2011) ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่า σ_t ดังสมการที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\frac{\sigma_T}{S_u} = \frac{\gamma D}{S_u}\left(\frac{H}{D}+\frac{1}{2}\right) - T_C \qquad 3.1$$



รูปที่ 3.2 Stability Chart สำหรับกรณีที่ H/D ประมาณ 2

เมื่อทราบค่า σ_t แล้วนั้นจึงจะทำให้สามารถระบุได้ว่าอุโมงค์นั้นมีเสถียรภาพในการค้ำยันตัวเองมากน้อยเพียงใด ซึ่งจากการคำนวณเบื้องต้นนั้นค่า σ_t ที่คำนวณออกมาได้นั้นมีค่าประมาณ 0 - 2 ตันต่อตารางเมตร จึงสรุปได้ว่าอุโมงค์ที่ถูกขุดเจาะสำหรับการดันท่อในโครงการทั้ง 2 นั้นมีเสถียรภาพในการค้ำยันตัวเองต่ำมาก ดังนั้นจึงควรที่จะมีการฉีดสารหล่อลื่นระหว่างการดันท่อเพื่อค้ำจุนเสถียรภาพของอุโมงค์และลดแรงเสียดทานระหว่างท่อดันและผิวดิน

3.2.2 การหาขอบเขตของค่า Adhesion Factor

เมื่อทราบพฤติกรรมของดินเบื้องต้นแล้วนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสมการที่ควรใช้ในการคำนวณค่าแรงเสียดทานนั้นควรจะเป็นไปดังสมการที่ 3.2 โดยมีสมมติฐานตั้งต้นเป็นไปดังสมมติฐานตั้งต้นที่ 4

$$F_{SC} = \alpha_{avg} S_u (\pi D_p) \quad 3.2$$

เมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะของโครงการการดันท่อในโครงการการดันท่อที่ถนนแพรกษา โครงการการดันท่อที่ถนนร่มเกล้าและโครงการการดันท่อ รถไฟฟ้าสายสีเหลือง จะพบว่า คุณลักษณะของโครงการการดันท่อนั้นมีความคล้ายกันอย่างมากดังต่อไปนี้

1) ค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในโครงการที่ถนนแพรกษา = 2.031 ตัน/ตร. ม.

ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 2.059 ตัน/ตร. ม.

ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในโครงการที่ถนนแพรกษา = 0.67

ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 0.52

2) ค่าความลึกจากผิวดิน

ค่าเฉลี่ยของความลึกจากผิวดินในโครงการที่ถนนแพรกษา = 5.13 เมตร

ค่าเฉลี่ยของความลึกจากผิวดินในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 5.12 เมตร

3) ชนิดและความเข้มข้นของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้ในโครงการที่ถนนแพรกษา = โพลิเมอร์

สารหล่อลื่นที่ใช้ในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = โพลิเมอร์

ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นที่ใช้ในโครงการที่ถนนแพรกษา = 0.775 กรัม / ลบ. ซม.

ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นที่ใช้ในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 0.775 กรัม / ลบ. ซม.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4) ขนาดของหัวเจาะ

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะในโครงการที่ถนนแพรกษา = 2.17 ม.

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 2.17 ม.

5) ขนาดของท่อดัน

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อดันในโครงการที่ถนนแพรกษา = 2.12 ม.

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อดันในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 2.12 ม.

6) วัสดุของท่อดัน

วัสดุของท่อดันในโครงการที่ถนนแพรกษา = คอนกรีตเสริมเหล็ก

วัสดุของท่อดันในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = คอนกรีตเสริมเหล็ก

7) รอบกะการทำงาน

ช่วงเวลาการทำงานในโครงการที่ถนนแพรกษา = ทำ 8 ชั่วโมงสลับกับหยุดพัก 16 ชั่วโมง

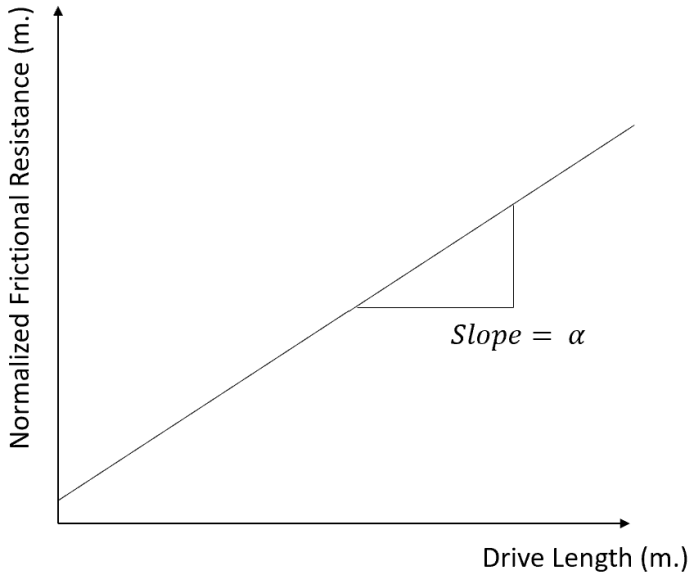
ช่วงเวลาการทำงานในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = ทำ 8 ชั่วโมงสลับกับหยุดพัก 16 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตามหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อค่า α และมีความแตกต่างในการดันท่อของโครงการแพรกษาและร่มเกล้าคือเวลาและลำดับการฉีดสารหล่อลื่น การฉีดสารหล่อลื่นสำหรับการฉีดขั้นต้นนั้นจะเริ่มต้นการฉีดสารหล่อลื่นเมื่อดินถูกทำการขุดเจาะจากหัวเจาะไปแล้วมากกว่า 48 ชั่วโมง และอยู่ในช่วง 15 - 35 ชั่วโมง สำหรับโครงการการดันท่อที่ถนนแพรกษาและถนนร่มเกล้าตามลำดับ

เมื่อนำข้อมูลแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นตามระยะทางการดันจากบ่อดันมา normalize ด้วยการหารด้วย π, S_u และ D_p ดังแสดงในสมการที่ 3.3 และ 3.4 แล้วนำมาพลอตกราฟเปรียบเทียบกับระยะทางจากบ่อดัน จะสามารถหาค่า α จากความชันของกราฟเส้นตรงได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3

$$\text{Frictional Resistance} = (\alpha)(S_u)(\pi)(D_p)(L) \tag{3.3}$$

$$\frac{\text{Frictional Resistance}}{(\pi)(S_U)(D_p)} = (\alpha)(L) \tag{3.4}$$



รูปที่ 3.3 กราฟระหว่างแรงเสียดทานกับระยะการดัน

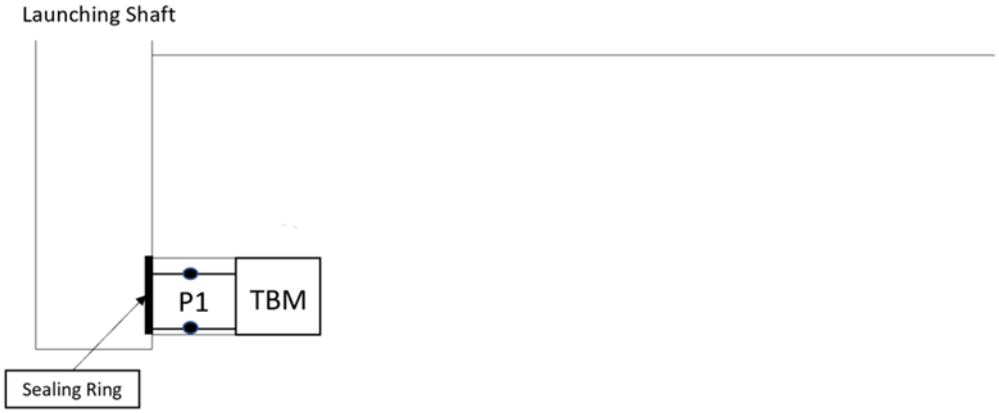
ในโครงการการดันท่อที่ถนนแพรกษามีอยู่ 2 ช่วงดันที่ทำการดันท่อโดยไม่มีการฉีดสารหล่อลื่นตลอดช่วงดัน ซึ่งจาการหาค่า α จากข้อมูลของ 2 ช่วงดันนั้นจะทำให้สามารถนำค่า α ที่ได้มาเปรียบเทียบกับการดันท่อในกรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นสำหรับ initial injection นั้นจะเริ่มต้นการฉีดสารหล่อลื่นเมื่อดินถูกทำการขุดเจาะจากหัวเจาะไปแล้วมากกว่า 48 ชั่วโมง (ค่า α จากโครงการที่ถนนแพรกษา) และในกรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นสำหรับ initial injection นั้นจะเริ่มต้นการฉีดสารหล่อลื่นเมื่อดินถูกทำการขุดเจาะจากหัวเจาะไปแล้วอยู่ในช่วง 15 - 35 ชั่วโมง (ค่า α จากโครงการที่ถนนร่มเกล้า)

3.2.3 การทดลองในสนามเพื่อเข้าใจพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน

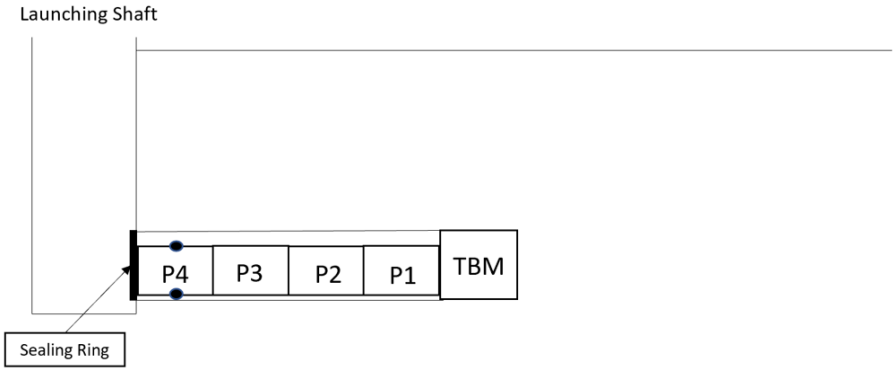
Longitudinal deformation profile (LDP) คือกราฟแสดงถึงการยุบตัวของดินที่จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอโดยแปรผันตามระยะห่างจากหัวเจาะโดยเป็นผลมาก้อนมวลดินหน้าหัวเจาะที่ช่วยพยุงการยุบตัวของดิน ปัจจัยที่ส่งผลต่อ LDP ได้แก่ระยะห่างของบริเวณดินจากหัวเจาะและรัศมีของพลาสติกโซนของดินรอบอุโมงค์ ซึ่ง LDP เป็นพฤติกรรมการยุบตัวของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ

ค่าการยุบตัวของดินนั้นจะถูกเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับการยุบตัวสูงสุดที่จะเกิดขึ้นหรือนั้นก็คือการที่ดินยุบตัวลงมาจนสัมผัสกับผิวของท่อดัน ในการให้ได้มาซึ่งกราฟ LDP นั้นจำเป็นต้องทราบปริมาตรช่องว่างของ overcut ที่ยังเหลืออยู่ของดินในแต่ละระยะจากหัวเจาะซึ่งดินยังอยู่ในสภาพที่ไม่ระบายน้ำ

การให้ได้มาซึ่งช่องว่างของ overcut ที่ยังเหลืออยู่ในแต่ละระยะจากหัวเจาะนั้นจะสามารถทำได้โดยทำการฉีดของเหลวเข้าไปในท่อดันลำดับต่าง ๆ ที่ถูกดันต่อท้ายหัวเจาะ โดยทำการฉีดจนกว่าของเหลวจะเกิดการรั่วไหลมาที่หัวเจาะแล้วจึงนำปริมาตรและอัตราการไหลที่ฉีดเข้าไปมาทำการจดบันทึก ยกตัวอย่างจากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าสารหล่อลื่นหรือของเหลวที่ถูกฉีดเข้าไปในในท่อดันที่ 1 นั้นจะไม่สามารถรั่วไหลออกมาที่บ่อดันได้เนื่องจากถูกปิดป้องกันการรั่วไหลด้วย sealing ring ดังนั้นหากทำการวัดปริมาตรที่ถูกฉีดเข้าไปจนถึงเมื่อเกิดการรั่วไหลออกที่หัวเจาะจะทำให้ทราบปริมาตรของช่องว่างที่เหลืออยู่สำหรับท่อดันที่ 1 หรือระยะ 0 – 3 เมตรนับจากหัวเจาะ ในกรณีที่ท่อดันมีความยาว 3 เมตรต่อท่อ ในทำนองเดียวกันหากทำการทดลองในรูปแบบนี้ซ้ำ ๆ ก็จะสามารถทำให้ทราบปริมาตรของช่องว่างที่เหลืออยู่ตั้งแต่ลำดับท่อดันนั้น ๆ จนถึงหัวเจาะ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.5 จะทำให้สามารถทราบปริมาตรของช่องว่างที่เหลืออยู่ตั้งแต่ท่อดันที่ 4 จนถึงหัวเจาะ หรือระยะ 0 – 12 เมตรนับจากหัวเจาะ ซึ่งถ้าหากทราบปริมาตรของช่องว่างที่เหลืออยู่ตั้งแต่ท่อดันที่ 3 จนถึงหัวเจาะ หรือระยะ 0 – 9 เมตรนับจากหัวเจาะแล้วนั้น เมื่อนำมาหักลบกันก็จะได้มาซึ่งช่องว่างที่เหลืออยู่ของท่อดันที่ 4 หรือระยะ 9 – 12 เมตรจากหัวเจาะนั้นเอง อย่างไรก็ตามการทดลองที่ทำในแต่ละครั้งนั้นนั้นจำเป็นต้องเป็นอิสระต่อซึ่งกันและกัน



รูปที่ 3.4 การทดลองเพื่อหาปริมาตรช่องว่างที่เหลืออยู่สำหรับระยะ 0 – 3 เมตรจากหัวเจาะ

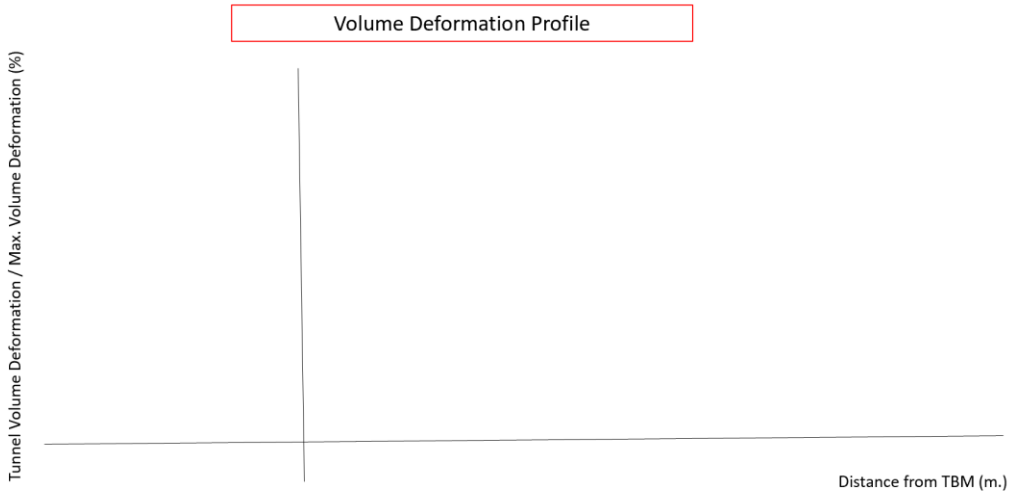


รูปที่ 3.5 การทดลองเพื่อหาปริมาตรช่องว่างที่เหลืออยู่สำหรับระยะ 0 – 12 เมตรจากหัวเจาะ

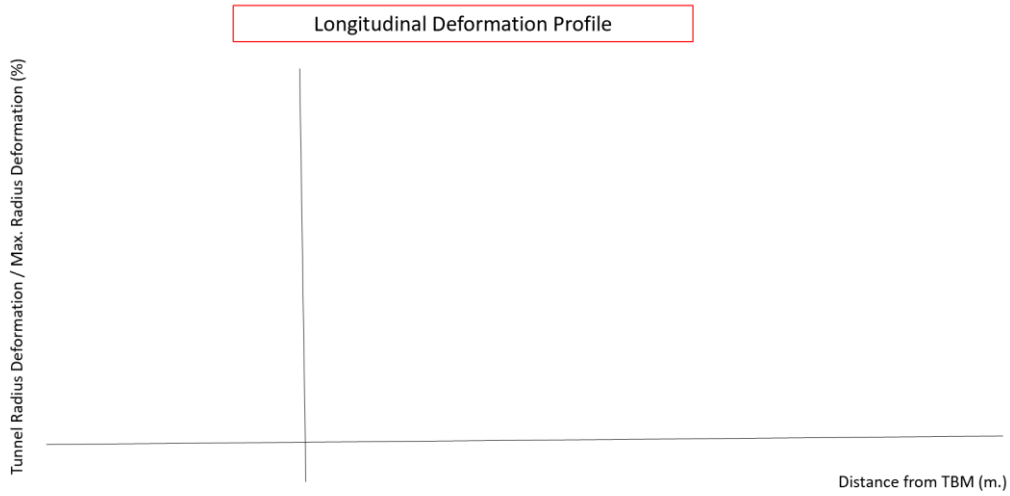
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อทราบค่าช่อง overcut ที่ยังเหลืออยู่ในทุก ๆ 3 เมตร จากหัวเจาะ ก็จะสามารถหาค่าปริมาตรที่ดินเกิดการยุบตัวดังสมการที่ 3.5 และสามารถพลอตกราฟเปรียบเทียบกับระยะจากหัวเจาะได้ดังรูปที่ 3.6 อย่างไรก็ตามกราฟของ LDP นั้นส่วนใหญ่เป็นการพลอตของค่ารัศมีของอุโมงค์ที่ถูกบีบตัวลดน้อยลงมากกว่าที่จะเป็นปริมาตรของดินที่ถูกบีบตัวลง ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการนำไปเปรียบเทียบจึงทำการแปลงจากปริมาตรการยุบตัวให้กลายเป็นรัศมีการยุบตัว ดังรูปที่ 3.7

$$\text{Volume Deformation} = \text{Overcut-Remained Overcut} \qquad 3.5$$



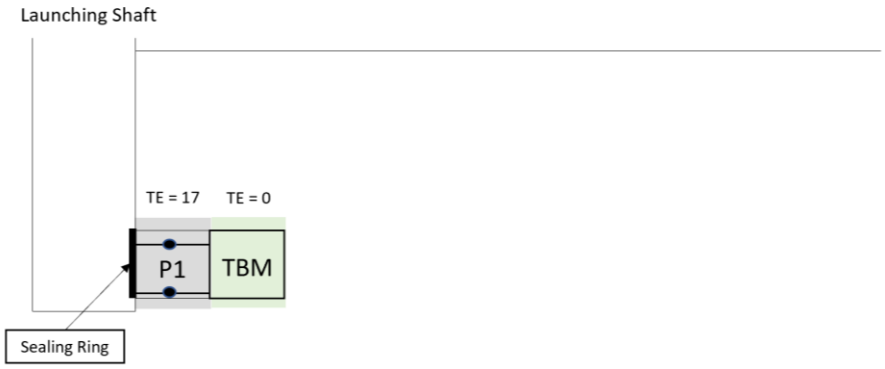
รูปที่ 3.6 Volume Deformation Profile



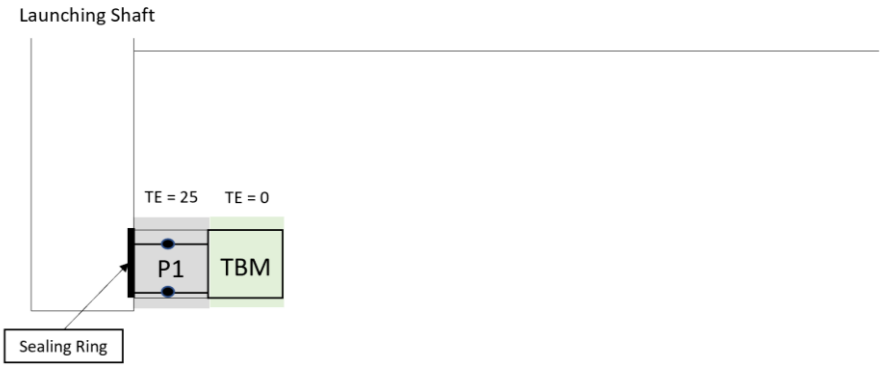
รูปที่ 3.7 Longitudinal Deformation Profile

อย่างไรก็ตามการยุบตัวของดินในแต่ละบริเวณนั้นไม่ได้ขึ้นแค่เพียงกับระยะจากหัวเจาะแต่ยังขึ้นกับระยะเวลาตั้งแต่ตอนหัวเจาะผ่านจนถึงเวลาที่เริ่มทำการทดลองหรือค่า TE ด้วย ดังนั้นในการจดบันทึกจำเป็นต้องทำการบันทึกด้วยว่าบริเวณดินหรือช่วงดินที่ทำการทดลองเพื่อหาปริมาตรนั้นถูกการขุดเจาะไปเป็นเวลาเท่าไหร่แล้ว ในรูปที่ 3.4 และ 3.5 แสดงตัวอย่างลำดับการดันท่อในโครงการที่มีการดันท่อต่อเนื่องตั้งแต่หัวเจาะตามด้วยท่อดันที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการดันท่อ 1 ท่อดันนั้นจะอยู่ที่ประมาณ 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่า TE จึงมีค่าเรียงกัน อย่างไรก็ตามในการดันท่อในโครงการก่อสร้างนั้นไม่ได้ทำการดันท่อต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง โดยปกติแล้วการดันท่อจะทำการก่อสร้างเฉพาะตอนกลางคืนและหยุดการทำงานในตอนกลางวัน (ทำ 8 ชั่วโมง หยุด 16 ชั่วโมง) ดังนั้น

ค่า TE ของดินในบริเวณที่อยู่ติดกันอาจจะมีค่าต่างกันมากกว่า 1 ชั่วโมงได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.7, 3.8 และ 3.9 แสดงตัวอย่างของค่า TE ของดินในบริเวณ 0 – 3 เมตรนับจากบ่อดัน รูปที่ 3.7 เป็นกรณีที่ท่อดันแรกถูกดันตามหลังหัวเจาะทันที อย่างไรก็ตามรูปที่ 3.8 และ 3.9 แสดงกรณีที่ท่อดันแรกถูกดันตามหลังหัวเจาะ เมื่อเวลาผ่านไป 16 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ



รูปที่ 3.8 ดินบริเวณ 0 – 3 เมตรจากบ่อดันมีค่า TE เท่ากับ 17 ชั่วโมง

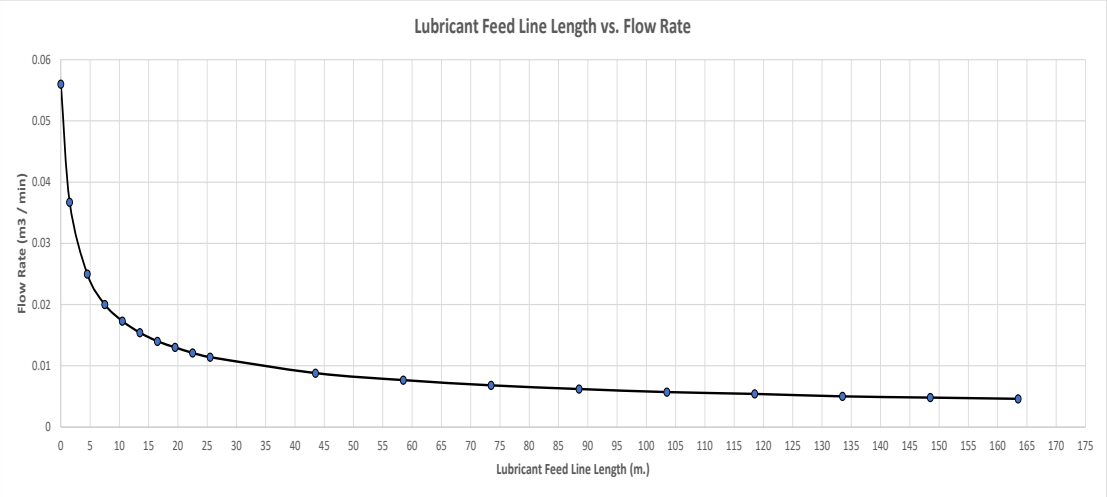


รูปที่ 3.9 ดินบริเวณ 0 – 3 เมตรจากบ่อดันมีค่า TE เท่ากับ 25 ชั่วโมง

เนื่องจากการวัดปริมาตรช่องว่างที่ยังเหลืออยู่จากการยุบตัวของดินที่ถูกทำการขุดเจาะไปแล้วเป็นระยะเวลาใด ๆ และอยู่ที่ระยะห่างใด ๆ จากหัวเจาะนั้นจำเป็นต้องทำการทดลองกับการดันท่อหลายช่วงดันมาก ซึ่งไม่สามารถทำได้ง่ายและสะดวก การฉีดสารหล่อลื่นในการทดลองนั้นส่วนมากจึงสามารถทำได้แค่บันทึกอัตราการไหลเฉลี่ยของสารหล่อลื่นที่สามารถไหลเข้าไปในช่องว่างที่ยังเหลืออยู่จากการยุบตัวของดินได้

อัตราการไหลของของเหลวนั้นจะมีค่าลงลดจากปัจจัยต่าง ๆ โดยเฉพาะเมื่อความยาวของท่อส่งมีความยาวมากขึ้น รูปที่ 3.12 เป็นการคำนวณจากสมการทางชลศาสตร์โดยเป็นฟังก์ชันของแรงดันปั๊ม,

ความยาวท่อส่ง, ชนิดของท่อส่ง และเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่ง โดยในรูปที่ 3.12 นั้นเป็นการคำนวณอัตราการไหลของสารหล่อลื่นในกรณีที่ใช้ปั๊มแรงดันขนาด 5 บาร์, ท่อส่งเป็นวัสดุยางและมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 ซม.



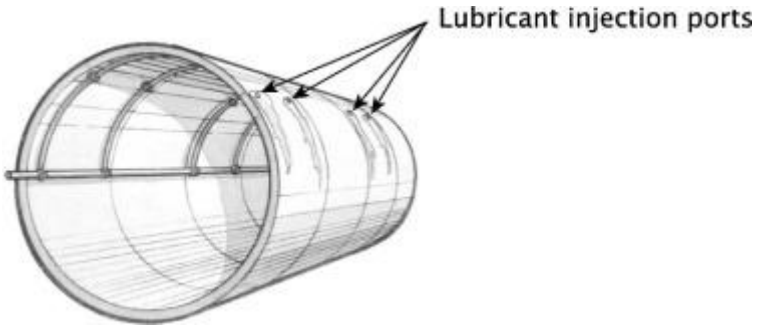
รูปที่ 3.10 ผลกระทบของอัตราการไหลที่เกิดจากความยาวของสาย

อัตราการไหลที่วัดได้จากการทดลองนั้นจึงจำเป็นต้องถูกนำมา normalized ด้วยอัตราการไหลที่คำนวณได้จากสมการทางชลศาสตร์ที่ความยาวท่อต่าง ๆ กัน ดังแสดงในสมการที่ 3.6

$$\text{Normalized Flow Rate (\%)} = \frac{\text{Measured Flow Rate}}{\text{Flow Rate according to that Hose Length}} \quad 3.6$$

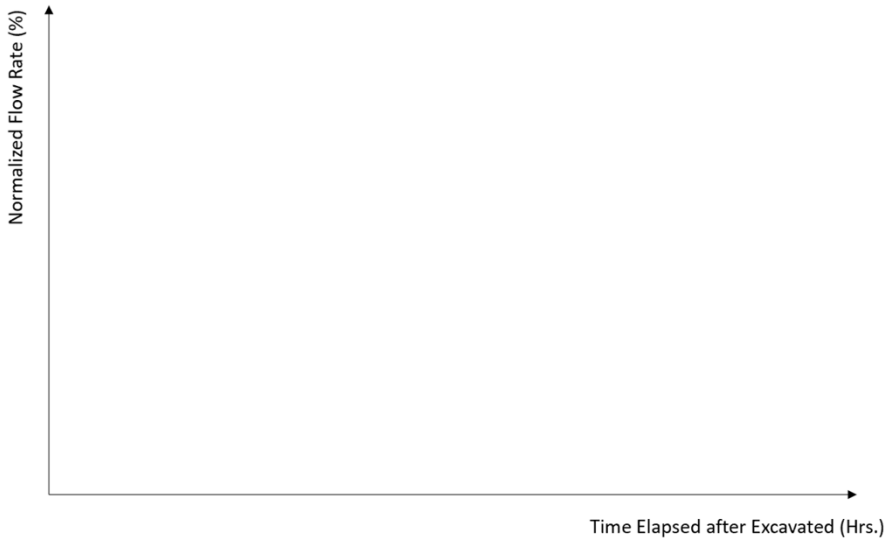
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อค่าอัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 100% จะหมายความว่าที่รูที่ใช้ปล่อยสารหล่อลื่นไม่ถูกขัดขวางการไหลด้วยดินที่ยุบตัวลงมา ซึ่งไม่ได้หมายความว่าดินไม่มีการยุบตัวแต่จะสามารถสรุปได้เพียงว่าดินยังไม่เกิดการยุบตัวลงมาสัมผัสและขัดขวางการไหลของสารหล่อลื่นออกจากรูสำหรับการฉีดสารหล่อลื่นและช่วงว่าง overcut ที่ยังคงเหลืออยู่มีขนาดใหญ่เพียงพอที่ทำให้อัตราการไหลของสารหล่อลื่นยังอยู่ในอัตราที่ปกติ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 หากค่าอัตราการไหลมีค่าน้อยกว่า 100% นั้นหมายความว่ามีการขัดขวางการไหลของสารหล่อลื่นซึ่งอาจจะเกิดจากดินที่ยุบตัวลงมาสัมผัสกับท่อดันเป็นบางส่วนหรืออาจจะเกิดจากช่องว่าง overcut ที่ยังคงเหลืออยู่มีค่าน้อยจนทำให้อัตราการไหลจากการฉีดสารหล่อลื่นลดน้อยลงจากค่าปกติ



รูปที่ 3.11 สายส่งและช่องสำหรับอัดฉีดสารหล่อลื่น

อัตราการไหลเมื่อพลอตกราฟเปรียบเทียบกับเวลาที่ผ่านไปหลังจากการขุดเจาะจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.12 ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์นั้นจำเป็นที่จะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างมิติด้านเวลาที่ผ่านการขุดเจาะไปกับมิติด้านระยะห่างจากหัวเจาะ ซึ่งสามารถทำโดยการใช้ค่าเฉลี่ยจากการดันท่อในภาคสนามซึ่งอัตราการดันท่อจะมีค่าประมาณ 1 เมตรต่อ 1 ชั่วโมง โดยเป็นค่าที่รวมเวลาพักกะการดันท่อ ดังนั้นกราฟในรูปที่ 3.12 จะสามารถแปลงเป็นกราฟระหว่างค่าระยะห่างจากหัวเจาะกับค่าอัตราการไหล ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 กราฟระหว่าง Time Elapsed after Excavated กับ Normalized Flow Rate

รูปที่ 3.13 กราฟระหว่างระยะห่างจากหัวเจาะ กับ Normalized Flow Rate

3.2.4 การคำนวณเพื่อหาค่าปริมาตรการฉีดเสริม (subsequent injection volume)

ปริมาตรของสารหล่อลื่นที่ต้องการในการชดเชยการซึมหายของสารหล่อลื่นในขั้นตอน subsequent injection นั้นขึ้นกับค่าอัตราการซึมผ่านของดินรอบอุโมงค์และสามารถแสดงปริมาตรของสารหล่อลื่นที่ต้องใช้ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาตรของ subsequent injection ที่แนะนำ ในหน่วย ลบ.ม/ม ค่อระยะดันท่อ 1 ม

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.

ที่มา: Praetorius and Britta (2017)

อัตราการซึมหายของสารหล่อลื่นเข้าไปในชั้นดินและการเสียสภาพของชั้นของสารหล่อลื่นนั้นแปรผันตามเวลา อย่างไรก็ตามการคำนวณเพื่อให้ทราบปริมาตรดังกล่าวอย่างแน่ชัดนั้นทำได้ยากและยังไม่มีข้อมูลที่เพียงพอในการนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการในการคำนวณ

3.2.5 การศึกษาระบบการฉีดสารหล่อลื่นและข้อจำกัดต่าง ๆ

ผลจากการทดลองในหัวข้อ 3.2.3 และ 3.2.4 จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของดินรอบท่อดันที่แม่นยำมากขึ้น อย่างไรก็ตามในการที่จะออกแบบและนำเสนอระบบการฉีดสารหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพได้นั้นจำเป็นต้องทราบถึงแผนงานการก่อสร้างและระบบการฉีดสารหล่อลื่นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในโครงการการดันท่อในปัจจุบัน อีกทั้งการเข้าใจถึงข้อจำกัดและอุปสรรคต่าง ๆ จะทำให้ผลของการออกแบบวิธีการฉีดสารหล่อลื่นนั้นสามารถนำไปปฏิบัติได้จริงในภาคสนามได้อย่างสะดวกขึ้นและไม่ขัดแย้งกับลักษณะการทำงานที่นิยมใช้กันในวงการก่อสร้าง

3.2.6 การออกแบบระบบการฉีดสารหล่อลื่นและการทดสอบในภาคสนาม

การเข้าใจพฤติกรรมของดินรอบท่อดันรวมทั้งปัญหาและข้อจำกัดที่มักพบเจอหรืออาจจะขัดขวางการดันท่อในภาคสนามนั้นนำไปสู่การนำเสนอรูปแบบวิธีการฉีดสารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานที่จะเกิดขึ้นระหว่างการดันท่อ โดยรูปแบบวิธีการฉีดสารหล่อลื่นที่ถูกนำเสนอนั้นจะถูกนำไปทำการทดสอบในภาคสนาม โดยจะทำการทดสอบเป็นจำนวน 2 ช่วงดัน ในโครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินรถไฟฟ้าสายสีเหลือง ซึ่งมีคุณลักษณะของโครงการการดันท่อที่มีความคล้ายคลึงกันอย่างมากกับโครงการการดันท่อที่ถนนแพรกษาและโครงการการดันท่อที่ถนนร่มเกล้าดังต่อไปนี้

1) ค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในโครงการที่ถนนแพรกษา = 2.031 ตัน/ตร. ม.

ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 2.059 ตัน/ตร. ม.

ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในโครงการสายสีเหลือง = 2.047 ตัน/ตร. ม.

ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในโครงการที่ถนนแพรกษา = 0.67

ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 0.52

ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในโครงการสายสีเหลือง = 0.58

2) ค่าความลึกจากผิวดิน

ค่าเฉลี่ยของความลึกจากผิวดินในโครงการที่ถนนแพรกษา = 5.13 เมตร

ค่าเฉลี่ยของความลึกจากผิวดินในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 5.12 เมตร

ค่าเฉลี่ยของความลึกจากผิวดินในโครงการสายสีเหลือง = 5.12 เมตร

3) ชนิดและความเข้มข้นของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้ในโครงการที่ถนนแพรกษา = โพลิเมอร์

สารหล่อลื่นที่ใช้ในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = โพลิเมอร์

สารหล่อลื่นที่ใช้ในโครงการสายสีเหลือง = โพลิเมอร์

ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นที่ใช้ในโครงการที่ถนนแพรกษา = 0.775 กรัม / ลบ. ซม.

ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นที่ใช้ในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 0.775 กรัม / ลบ. ซม.

ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นที่ใช้ในโครงการสายสีเหลือง = 0.775 กรัม / ลบ. ซม.

4) ขนาดของหัวเจาะ

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะในโครงการที่ถนนแพรกษา = 2.17 ม.

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 2.17 ม.

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะในโครงการสายสีเหลือง = 2.17 ม.

5) ขนาดของท่อดัน

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อดันในโครงการที่ถนนแพรกษา = 2.12 ม.

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อดันในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = 2.12 ม.

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อดันในโครงการสายสีเหลือง = 2.12 ม.

6) วัสดุของท่อดัน

วัสดุของท่อดันในโครงการที่ถนนแพรกษา = คอนกรีตเสริมเหล็ก

วัสดุของท่อดันในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = คอนกรีตเสริมเหล็ก

วัสดุของท่อดันในโครงการสายสีเหลือง = คอนกรีตเสริมเหล็ก

7) ช่วงกะการทำงาน

ช่วงเวลาการทำงานในโครงการที่ถนนแพรกษา = ทำ 8 ชั่วโมงสลับกับหยุดพัก 16 ชั่วโมง

ช่วงเวลาการทำงานในโครงการที่ถนนร่มเกล้า = ทำ 8 ชั่วโมงสลับกับหยุดพัก 16 ชั่วโมง

ช่วงเวลาการทำงานในโครงกาสายสีเหลือง = ทำ 8 ชั่วโมงสลับกับหยุดพัก 16 ชั่วโมง

เมื่อนำข้อมูลแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นตามระยะทางการดันจากบ่อดันมา normalize ด้วยการหารด้วย π, S_u และ D_p แล้วนำมาพลอตกราฟเปรียบเทียบกับระยะทางจากบ่อดัน จะสามารถหาค่า α จากความชันของกราฟเส้นตรงได้และสามารถนำค่า α มาเปรียบเทียบกับในกรณีที่ไม่มีการฉีดสาร

หล่อลื่น, ในกรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นขั้นต้นนั้นจะเริ่มต้นการฉีดสารหล่อลื่นที่ระยะจากหัวเจาะมากกว่า 48 ชั่วโมง (ค่า α จากโครงการที่ถนนแพรกษา) และในกรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นขั้นต้นนั้นจะเริ่มต้นการฉีดสารหล่อลื่นเมื่อดินมีระยะห่างจากหัวเจาะอยู่ในช่วง 15 - 35 ชั่วโมง (ค่า α จากโครงการที่ถนนร่มเกล้า)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
การวิเคราะห์และอภิปรายผล

4.1 การหาพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน

เมื่อนำชั้นดินและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินของโครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินบริเวณถนนแพรกษาและโครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินบริเวณถนนร่มเกล้ามาทำการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาเสถียรภาพของอุโมงค์ โดยใช้สมการที่ถูกนำเสนอโดย Pipe Jacking Association (1995) และ Stability chart ที่ถูกนำเสนอโดย Sloan et al. (2011) ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่า σ_t ดังสมการที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ตามลำดับ ผลของการคำนวณด้วยวิธีที่ถูกนำเสนอโดย (1995) นั้นให้ค่า σ_t เฉลี่ยเท่ากับ 2.1 และ 2.2 ตันต่อตารางเมตร สำหรับโครงการดันท่อที่ถนนแพรกษาและถนนร่มเกล้าตามลำดับ และผลของการคำนวณด้วยวิธีที่ถูกนำเสนอโดย Sloan et al. (2011) นั้นให้ค่า σ_t เฉลี่ยเท่ากับ 1.8 และ 1.6 ตันต่อตารางเมตร สำหรับโครงการดันท่อที่ถนนแพรกษาและถนนร่มเกล้าตามลำดับ

จากค่า σ_t ที่แสดงถึงค่าแรงดันภายในอุโมงค์ที่ต้องการในการค้ำยันอุโมงค์ให้มีเสถียรภาพเพียงพอไม่มีการยุบตัวของดินรอบท่อดัน หากค่า σ_t ที่คำนวณออกมาได้เป็นค่าบวกนั้นแสดงถึงว่าอุโมงค์จำเป็นต้องมีแรงดันภายใน เช่นจากสารหล่อลื่น อย่างน้อยไม่น้อยกว่าค่า σ_t นั้นเพื่อที่จะค้ำยันดินบริเวณรอบท่อไม่ให้เกิดการยุบตัว ในทำนองเดียวกันหากค่า σ_t คำนวณออกมาได้นั้นมีค่าติดลบ จะแสดงให้เห็นว่าอุโมงค์มีเสถียรภาพที่เพียงพอ ต้องเกิดแรงดันจากภายนอกเพิ่มเท่ากับค่า σ_t นั้น ๆเพื่อที่จะให้ดินบริเวณรอบเริ่มเกิดการยุบตัว ซึ่งจากการคำนวณค่า σ_t ที่คำนวณออกมาได้นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 1.6 – 2.2 ตันต่อตารางเมตร

Chang et al. (2012) ได้อธิบายถึงเสถียรภาพของอุโมงค์ตามค่า σ_t ที่คำนวณออกมาได้ โดยค่า σ_t ที่อยู่ระหว่าง 0 – 2 ตันต่อตารางเมตร นั้นแสดงถึงอุโมงค์ที่มีเสถียรภาพเพียงเล็กน้อยในการค้ำยันตัวเอง จึงทำให้การยุบตัวของดินจะเกิดขึ้นอย่างไม่ทันทีทันใด อย่างไรก็ตามเนื่องจากอุโมงค์มีเสถียรภาพต่ำ จึงควรฉีดสารหล่อลื่นเพื่อค้ำจุนเสถียรภาพของอุโมงค์ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของการฉีดสารหล่อลื่นในขั้นตอน initial injection

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 การหาขอบเขตของค่า Adhesion Factor (α)

เมื่อทราบถึงค่าเสถียรภาพของอุโมงค์แล้วนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสมการที่ควรใช้ในการคำนวณค่าแรงเสียดทานนั้นควรจะเป็นไปดังสมการที่ 4.1 โดยมีสมมติฐานตั้งต้นเป็นดังสมมติฐานตั้งต้นที่ 4

$$F_{SC} = \alpha S_u(\pi D_p) \quad 4.1$$

ค่า α นั้นเป็นค่าเป็นค่าเฉพาะสำหรับค่า S_u นั้น ๆ และมีขอบเขตค่อนข้างกว้างโดยจะมีปัจจัยมากมายที่อาจจะส่งผลต่อค่า α อันได้แก่ การฉีดสารหล่อลื่น, ค่าความลึกจากผิวดิน, ช่วงเวลาการทำงาน, เส้นทางการดัน, Overcut ratio และวัสดุของท่อดัน เป็นต้น

การดันท่อสำหรับการติดตั้งระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ใต้ดินในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑลนั้นมักจะเป็นการดันท่อในโครงการที่มีปัจจัยหลาย ๆ ข้อดังที่กล่าวไปข้างต้นเหมือนกันดังต่อไปนี้

1. ค่าความลึกจากผิวดินของตัวอุโมงค์จะอยู่ที่ประมาณ 4 – 6 เมตรจากระดับผิวดิน
2. การทำงานนั้นจะทำได้เฉพาะแค่ตอนกลางคืน เริ่มงาน 22.00 น. และเลิกงานก่อน 6.00 น.
3. เส้นทางการดันจะเป็นเส้นตรงโดยมีค่าความชันวัดจากบ่อดันไปถึงบ่อรับไม่เกิน 0.5%
4. Overcut ratio มีค่าต่ำมากอยู่ที่ประมาณ 0.02 จึงทำให้ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินแทบจะไม่มีนัยยะ

ปัจจัยหลักอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า α นั้นคือการฉีดสารหล่อลื่นซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่ได้ถูกกำหนดมาจากแบบก่อสร้าง ผู้ทำการก่อสร้างนั้นสามารถมีอิทธิพลถึงหรือปรับเปลี่ยนได้เพื่อให้ค่า α มีค่าน้อยซึ่งหมายความว่าค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในการดันท่อจะมีค่าต่ำ การฉีดสารหล่อลื่นในการดันท่อให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพนั้นมี 3 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงได้แก่ชนิดและความเข้มข้นของสารหล่อลื่น, ปริมาตรของสารหล่อลื่นที่ใช้และลำดับเวลาในการฉีดสารหล่อลื่น

ค่าขอบเขตล่าง (lower bound) สำหรับการดันท่อที่มีพฤติกรรมของดินรอบอุโมงค์เป็นดังสมมติฐานตั้งต้นที่ 2 ซึ่งถือว่าเป็นกรณีที่เป็นอุดมคติ ดังสมการที่ 4.2 เมื่อค่า c_m เท่ากับ 0.01 ตันต่อตารางเมตรตามที่ถูกนำเสนอโดย CCGA (1975)

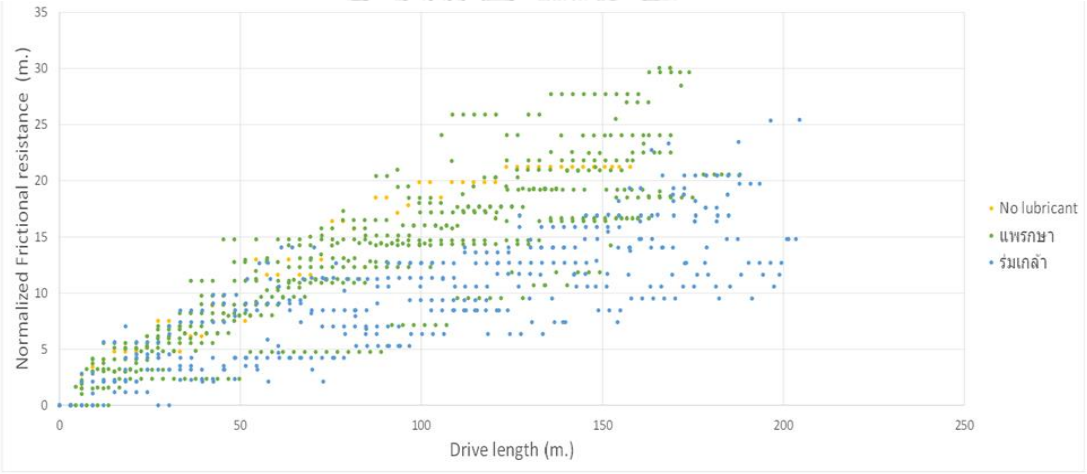
$$F_{SC} = C_m(\pi D_p) \quad 4.2$$

ในงานวิจัยฉบับนี้ที่การดันท่อทั้ง 2 โครงการอยู่ในชั้นดินเหนียวที่มีค่า S_u เฉลี่ยใกล้เคียงกันอย่างมากซึ่งมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.48 ตันต่อตารางเมตร ดังนั้นค่าขอบเขตล่าง (lower bound) ของค่า α จะอยู่ที่ 0.006 หรือ 0.6 เปอร์เซ็นต์ ค่าขอบเขตบน (upper bound) ของค่า α นั้นจะเกิดขึ้น

ในช่วงการดันท่อที่ไม่มีการใช้สารหล่อลื่นตลอดช่วงการดันและค่า α ของช่วงการดันท่อที่มีการใช้สารหล่อลื่นนั้นจะอยู่ระหว่างค่าขอบเขตล่างและค่าขอบเขตบน

ชนิดของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการดันท่อทั้ง 2 โครงการเป็นชนิดเดียวกันคือผงโพลิเมอร์ผสมน้ำ โดยทั้ง 2 โครงการนั้นผสมสารหล่อลื่นที่ความเข้มข้นเดียวกันซึ่งเท่ากับ 0.775 กรัมต่อลบ.ซม. อย่างไรก็ตามการฉีดสารหล่อลื่นในขั้นต้นที่มีวัตถุประสงค์เพื่อค้ำจุนเสถียรภาพของอุโมงค์ ของทั้ง 2 โครงการนั้นมีความแตกต่างกันโดยจะเริ่มต้นการฉีดสารหล่อลื่นในบริเวณดินที่มีระยะห่างจากหัวเจาะมากกว่า 48 เมตร และอยู่ในช่วง 15 – 35 เมตร สำหรับโครงการการดันท่อที่ถนนแพรกษาและถนนร่มเกล้าตามลำดับ โดยไม่มีข้อมูลถึงปริมาณของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการดันท่อทั้ง 2 โครงการ

เมื่อนำข้อมูลแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นตามระยะทางการดันจากบ่อดันมาทำการ normalize ด้วยการหารด้วย π, S_u และ D_p แล้วนำมาพลอตกราฟเปรียบเทียบกับระยะทางจากบ่อดัน จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 จะสามารถหาค่า α จากความชันของกราฟเส้นตรงได้



รูปที่ 4.1 กราฟระหว่างระยะจากบ่อดันและค่าแรงเสียดทาน

เมื่อทำการแบ่งข้อมูลเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ไม่มีการฉีดสารหล่อลื่น, กรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นในขั้นต้นนั้นจะเริ่มต้นการฉีดสารหล่อลื่นในบริเวณดินที่มีระยะห่างจากหัวเจาะมากกว่า 48 เมตร (โครงการที่ถนนแพรกษา) และในกรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นในขั้นต้นนั้นจะเริ่มต้นการฉีดสารหล่อลื่นในบริเวณดินที่มีระยะห่างจากหัวเจาะอยู่ในช่วง 15 - 35 เมตร (โครงการที่ถนนร่มเกล้า) เมื่อนำสมการเส้นตรงมาใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลทั้ง 3 กรณีจะมีผลลัพธ์ ดังนี้

1. ไม่มีการฉีดสารหล่อลื่น:

   $y = 0.1408(x) + 2.5988$, $R^2 = 0.9271$

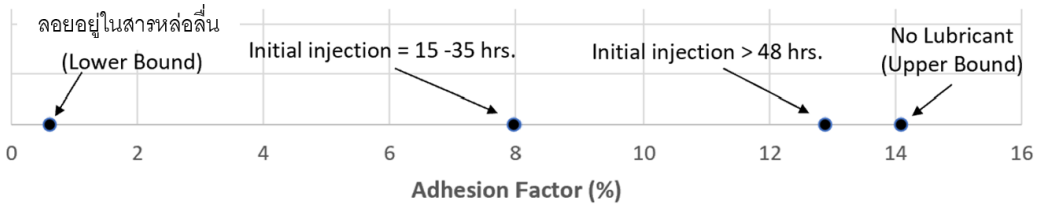
2. การฉีดสารหล่อลื่นขั้นต้นที่ระยะมากกว่า 48 เมตร:

   $y = 0.1288(x) + 1.8672$, $R^2 = 0.7839$

3. การฉีดสารหล่อลื่นขั้นต้นที่ระยะอยู่ในช่วง 15 - 35 เมตร:

   $y = 0.0797(x) + 1.6571$, $R^2 = 0.7066$

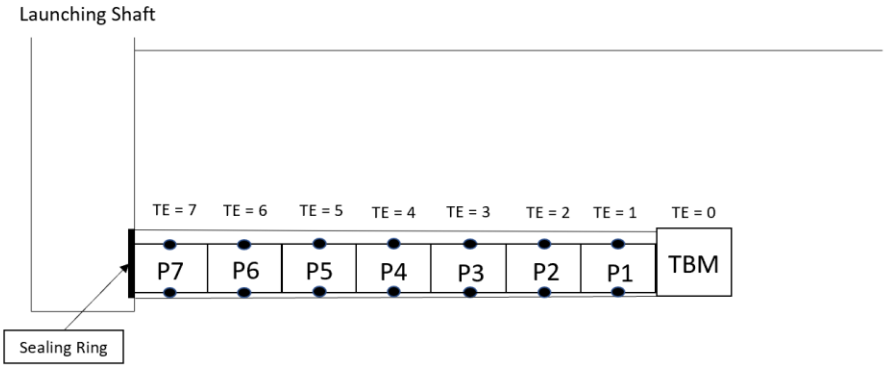
ค่าความชันของสมการเส้นตรงนั้นคือ ค่า α ของการดันท่อในแต่ละกรณี เมื่อนำค่า α ของแต่ละกรณีมาพลอตเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตล่าง (lower bound) จะเป็นไปดังรูปที่ 4.2



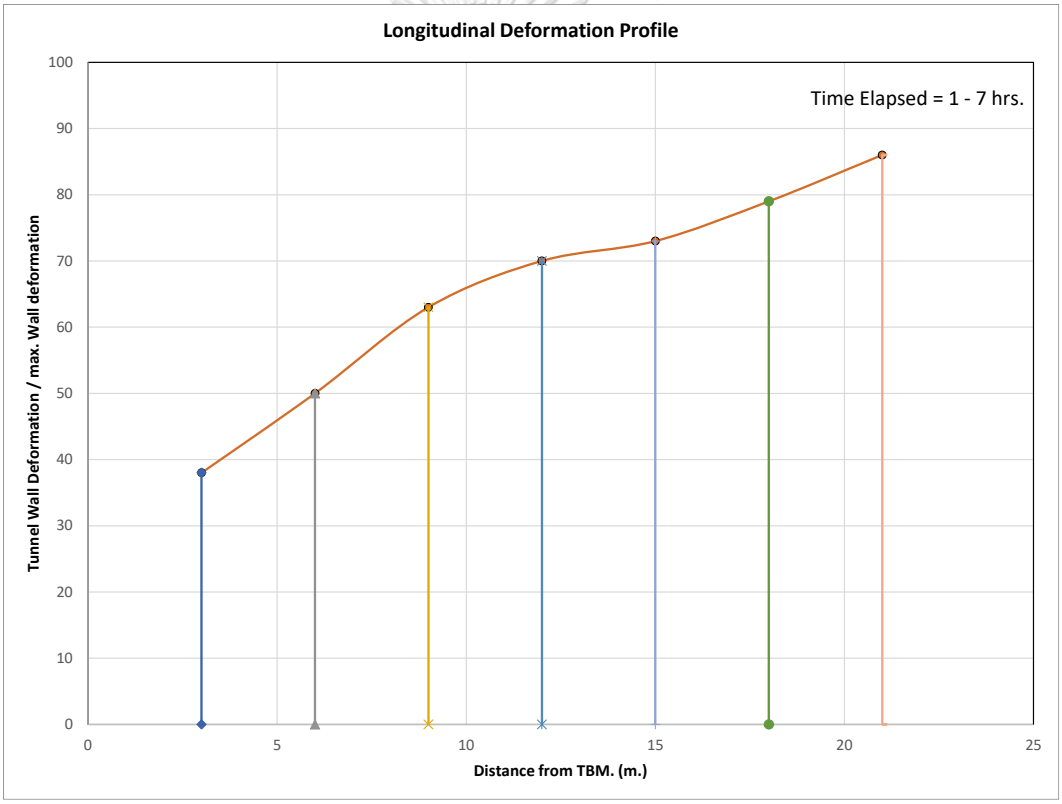
รูปที่ 4.2 Adhesion factor ในกรณีต่าง ๆ

4.3 การทดลองในสนามเพื่อเข้าใจพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน

เนื่องจากการหาปริมาตรของช่องว่างที่ยังเหลืออยู่จากการยุบตัวของดินที่ถูกทำการขุดเจาะไปแล้วเป็นระยะเวลาใด ๆ และอยู่ในระยะห่างใด ๆ จากหัวเจาะนั้นจำเป็นต้องทำการทดลองกับการดันท่อหลายช่วงดันมาก การทดลองในงานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกทำการทดลองแค่สำหรับในกรณีของการดันท่อที่ต่อเนื่องตั้งแต่หัวเจาะจนถึงท่อดันที่ 7 (ระยะ 0 – 21 เมตรจากหัวเจาะ) โดยที่ทำการดันตั้งแต่หัวเจาะจนถึงท่อดันที่ 7 ใช้ระยะเวลารวมไม่เกิน 7 ชั่วโมง ดังนั้นการทดลองเพื่อหาค่าปริมาตรของช่องว่างที่ยังเหลืออยู่จากการยุบตัวของดินนั้นจะอยู่ในบริเวณดินที่ถูกทำการขุดเจาะไปไม่เกิน 7 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยปริมาตรที่วัดได้จะถูกนำมาลบจากปริมาตร overcut ทั้งหมด และนำมาแปลงให้เป็นกราฟระหว่างรัศมีการยุบตัวของดินที่ระยะห่างต่าง ๆ นับจากหัวเจาะเมื่อเปรียบเทียบกับรัศมีการยุบตัวสูงสุดของดิน จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.4

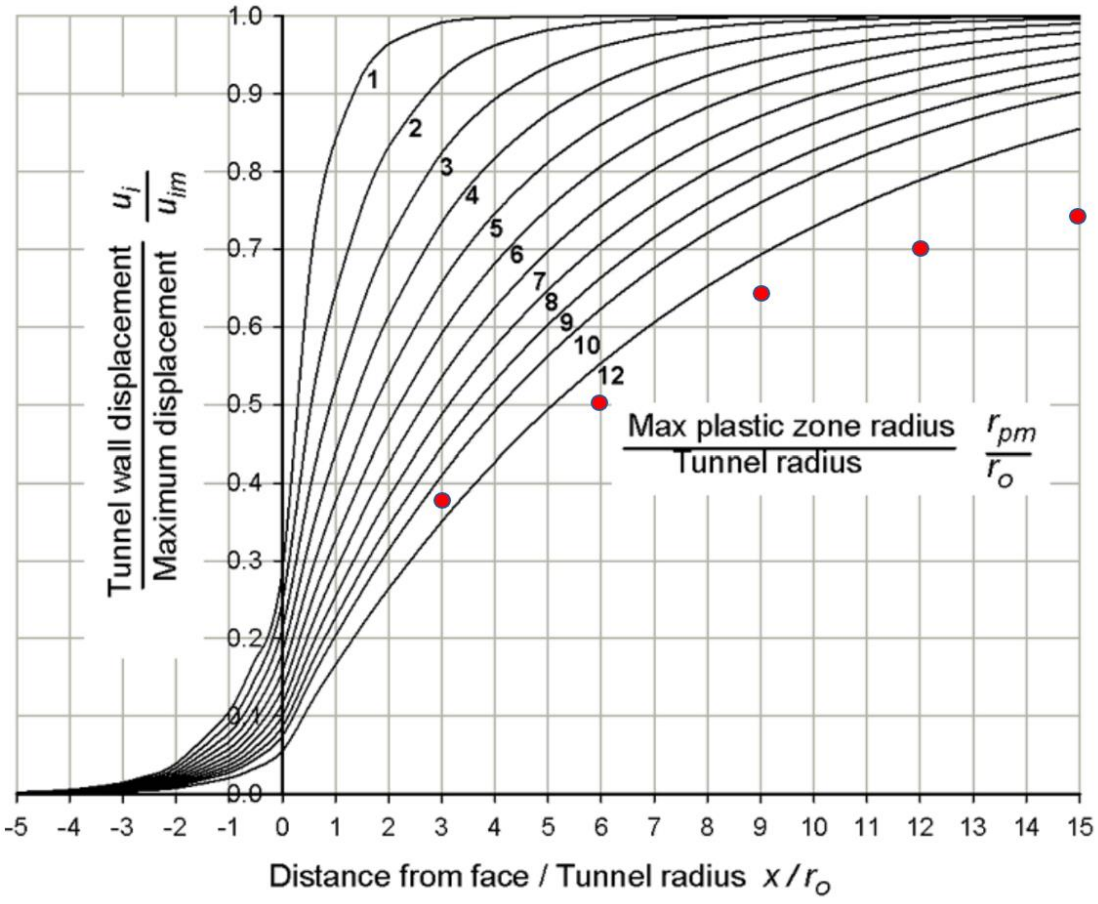


รูปที่ 4.3 การทดลองเพื่อหาปริมาตรที่เหลือจากการยุบตัวของดิน



รูปที่ 4.4 รัศมีการยุบตัวของดินเมื่อเปรียบเทียบกับ annular width กับระยะจากหัวเจาะ

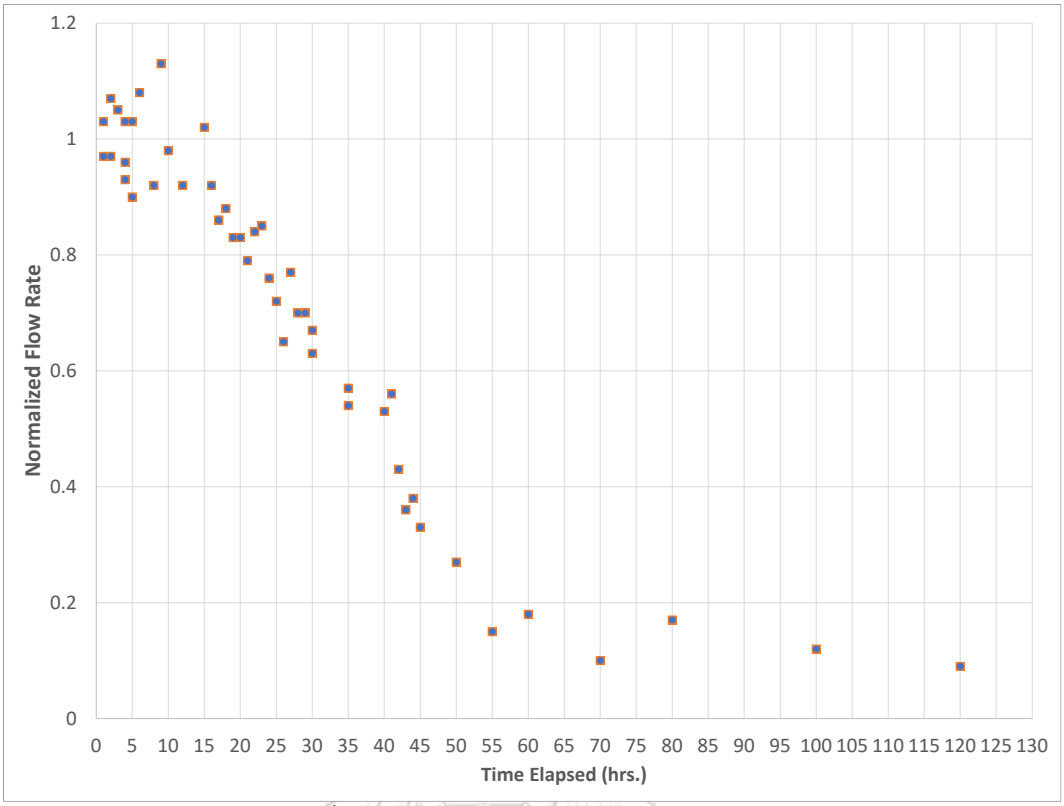
จากรูป 4.4 จะเห็นได้ว่าดินจะยุบตัวไปประมาณ 38% ของปริมาตรช่องว่างทั้งหมดทันทีที่หัวเจาะผ่าน สมการที่คำนวณการยุบตัวของดินที่ระยะต่าง ๆ จากหัวเจาะนั้นจะขึ้นอยู่กับค่า $\frac{r_{pm}}{r_0}$ หรือเศษส่วนระหว่างรัศมีของดินที่อยู่ในสภาพพลาสติกกับค่ารัศมีของอุโมงค์ เมื่อนำจุดข้อมูลที่ได้จากการทำการทดลองมาพลอตเปรียบเทียบกับกราฟของดินที่มีค่ารัศมีพลาสติกโซนต่าง ๆ จะเป็นไปดังรูปที่ 4.5



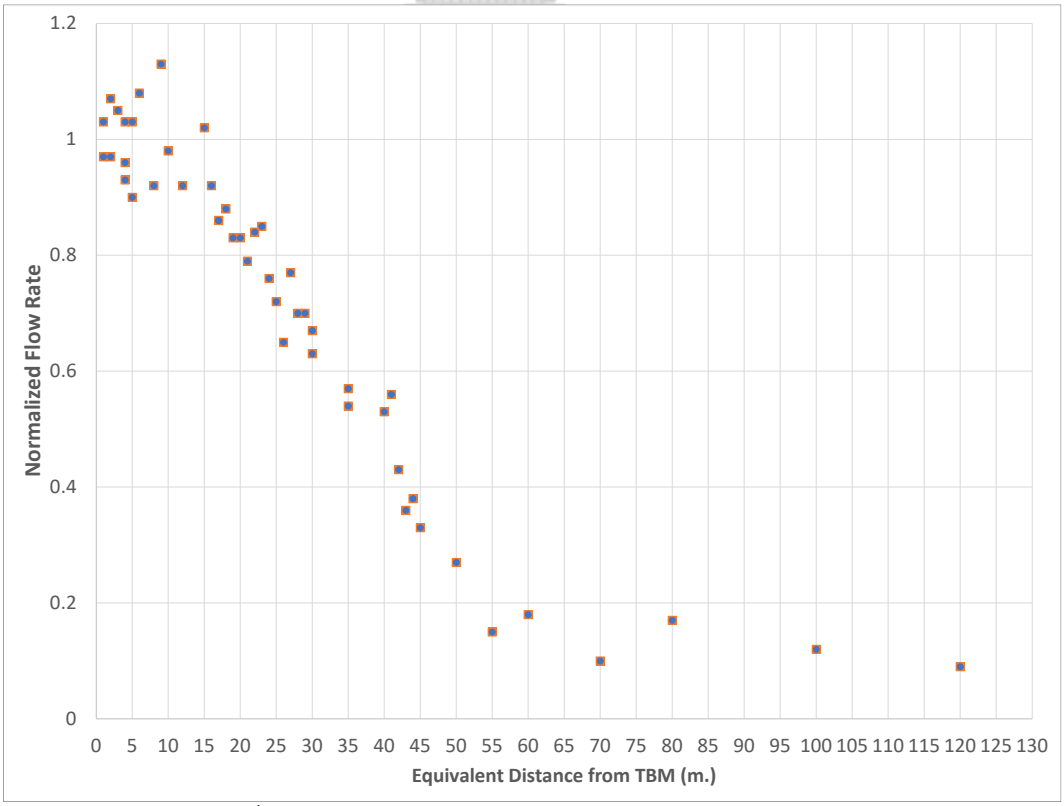
รูปที่ 4.5 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับการยุบตัวของดินที่มีค่ารัศมีพลาสติกโซนต่าง ๆ

จากรูปจะเห็นได้ว่าข้อมูลการยุบตัวของดินที่ได้มาจากการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีของการยุบตัวของดินที่มีค่ารัศมีพลาสติกโซนเท่ากับ 15 อย่างไรก็ตามเมื่อนำข้อมูลดินและลักษณะของโครงการมาคำนวณหาค่ารัศมีพลาสติกโซนตามสูตรที่ Sagaseta (1998) ได้นำเสนอพบว่าในกรณีที่ให้ค่าแรงดันภายในอุโมงค์เท่ากับ 0 นั้น ค่ารัศมีของพลาสติกโซนจะมีค่าเท่ากับ 8.4 เมตร

ในการทดลองที่ไม่สามารถหาปริมาตรของช่องว่างที่เหลืออยู่จากการยุบตัวของดินได้นั้นได้มีการบันทึกอัตราการไหลเฉลี่ยของของเหลว โดยผลของการทดลองนั้นเมื่อนำมาทำการ normalize กับอัตราการไหลที่ควรจะเป็นที่ความยาวท่อนั้น ๆ และนำมาพลอตกราฟกับระยะเวลา TE จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสามารถเปรียบเสมือนให้เท่ากับกราฟระหว่างค่าอัตราการไหลกับระยะห่างจากหัวเจาะได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 กราฟระหว่างอัตราการไหลกับ TE



รูปที่ 4.7 กราฟระหว่างอัตราการไหลกับระยะจากหัวเจาะ

เมื่อสังเกตรูปที่ 4.5 และ 4.7 จะเห็นว่าในบริเวณดินที่ระยะน้อยกว่า 15 เมตรจากหัวเจาะค่าอัตราการไหลของของเหลวที่ถูกฉีดนั้นยังอยู่ในเกณฑ์ปกติ ทั้งที่การยุบตัวของดินได้มีค่าถึง 75% ของค่าการยุบตัวสูงสุด และค่าอัตราการไหลจะเริ่มลดลงจนมีค่าคงที่ที่น้อยมาก ๆ ในบริเวณดินที่มีระยะ 55 เมตรจากหัวเจาะเป็นต้นไป จึงสามารถสรุปได้ว่าดินจะเริ่มมีการยุบตัวจนมาขัดขวางการไหลของสารหล่อลื่นหรือสามารถกล่าวได้ว่าดินเริ่มจะมีการยุบตัวลงมาสัมผัสกับผิวของท่อดันเมื่อดินบริเวณนั้นมีระยะห่างจากหัวเจาะ 15 เมตรและดินในบริเวณที่ห่างจากหัวเจาะมากกว่า 55 เมตรนั้นจะยุบตัวลงมาสัมผัสกับผิวของท่อดันทั้งหมดและทำให้การฉีดสารหล่อลื่นทำได้ยาก

4.5 การคำนวณเพื่อหาค่า subsequent injection volume

ปริมาตรของสารหล่อลื่นที่ต้องการในการบรรลุวัตถุประสงค์การเติมเต็มการสูญหายจากการซึมหายของสารหล่อลื่นในขั้นตอน subsequent injection นั้นขึ้นกับค่าอัตราการซึมผ่านของดินรอบอุโมงค์เป็นหลัก Praetorius and Britta (2017) ได้แสดงปริมาตรของสารหล่อลื่นที่ต้องใช้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 Subsequent injection volume

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.

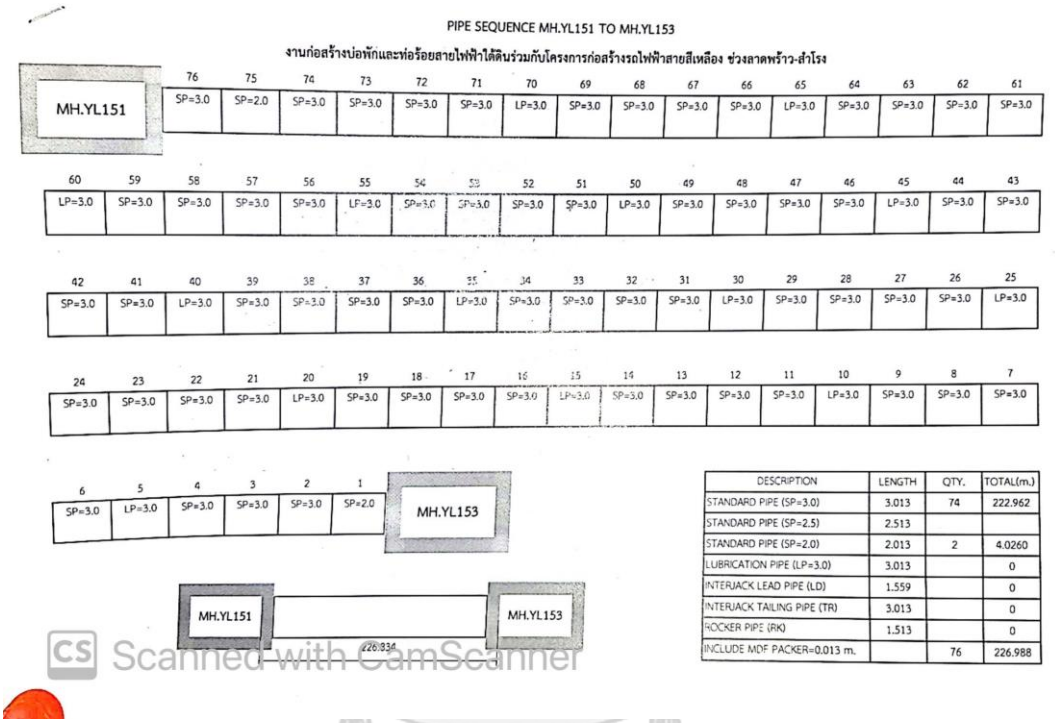
การดันท่อในชั้นดินกรุงเทพฯและปริมณฑลนั้นส่วนมากเป็นการดันท่อในชั้นดินเหนียวซึ่งมีค่าอัตราการไหลของเหลวต่ำทำให้การซึมหายของสารหล่อลื่นเข้าไปสู่ชั้นดินมีค่าน้อยมาก จากการคำนวณตามคำแนะนำที่ถูกนำเสนอในตารางที่ 4.1 ปริมาตรของสารหล่อลื่นสำหรับขั้นตอน subsequent injection ที่ต้องการมีค่าเท่ากับ 0.0009 ลูกบาศก์เมตรต่อความยาวหนึ่งท่อดัน ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ ประกอบกับความสำคัญที่มีน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ initial injection ทำให้การฉีดสารหล่อลื่นในการดันท่อในชั้นดินกรุงเทพฯและปริมณฑลควรจะมีขั้นตอนแค่เฉพาะ initial injection

4.6 การศึกษาระบบการฉีดสารหล่อลื่นและข้อจำกัดต่างๆ

โครงการการดันท่อในปัจจุบันนั้นมักจะใช้หัวเจาะประเภท Earth Pressure Balance (EPB) ที่ไม่มี wire brushes อยู่ที่บริเวณปลายของหัวเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 การฉีดสารหล่อลื่นในท่อดันที่ใกล้หัวเจาะนั้นจะมีโอกาสที่สารหล่อลื่นจะไหลกลับไปยังหัวเจาะและอาจก่อให้เกิดความเสียหายของเครื่องยนต์ได้ จึงอาจกล่าวได้ว่าหัวเจาะสำหรับการดันท่อที่ใช้ในปัจจุบันที่ไม่เหมาะกับการทำ Initial injection ซึ่งจำเป็นต้องทำก่อนที่ดินจะเกิดการยุบตัวลงมาสัมผัสกับท่อ

รูปที่ 4.8 หัวเจาะ

ระบบการฉีดสารหล่อลื่นในโครงการการดันท่อนั้นมักจะทำการฉีดผ่านท่อที่ออกแบบมาไว้สำหรับการฉีดสารหล่อลื่นในทุก ๆ 5 ท่อดัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าท่อที่ออกแบบมาไว้สำหรับการฉีดสารหล่อลื่นซึ่งถูกใช้สัญลักษณ์ LP ได้ถูกออกแบบมาให้ใช้ที่ท่อดันหมายเลข 5, 10, 15, 20 ต่อไปเรื่อย ๆ



DESCRIPTION	LENGTH	QTY.	TOTAL(m.)
STANDARD PIPE (SP=3.0)	3.013	74	222.962
STANDARD PIPE (SP=2.5)	2.513		
STANDARD PIPE (SP=2.0)	2.013	2	4.0260
LUBRICATION PIPE (LP=3.0)	3.013		0
INTERJACK LEAD PIPE (LD)	1.559		0
INTERJACK TAILING PIPE (TR)	3.013		0
ROCKER PIPE (RK)	1.513		0
INCLUDE MDF PACKER=0.013 m.		76	226.988

รูปที่ 4.9 แผนแสดงลำดับการดันท่อและตำแหน่งของท่อดันที่มีการฉีดสารหล่อลื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

LP นั้นจะถูกเจาะรูไว้ที่กึ่งกลางของความยาวของท่อเพื่อฉีดสารหล่อลื่นโดยจะเจาะทั้งหมด 3 รู ที่ตำแหน่ง 12, 4 และ 8 นาฬิกาดังแสดงในรูปที่ 4.10 สารหล่อลื่นจะถูกผสมที่ถังผสมและอัดฉีดโดยใช้ปั๊มส่งผ่านท่อส่งไปที่ LP ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยที่ท่อส่งจะถูกเพิ่มความยาวไปเรื่อย ๆ เมื่อความยาวของอุโมงค์มีค่ามากขึ้น ในแต่ละ LP นั้นจะมีวาล์วสำหรับควบคุมการเปิดปิดการไหลของสารหล่อลื่นใน LP นั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งไม่มีมาตรวัดความดันติดตั้งที่ตำแหน่งของปั๊มและในแต่ละ LP

รูปที่ 4.10 รูสำหรับฉีดสารหล่อลื่นใน lubrication pipe

รูปที่ 4.11 ถังผสมและปั๊มสำหรับการฉีดสารหล่อลื่น

รูปที่ 4.12 วาล์วความคุมการไหลของสารหล่อลื่นในแต่ละ lubrication pipe

ในส่วนของการใช้สารหล่อลื่นเพื่อที่จะทดแทน volume loss ที่เกิดจาก overcut volume เพื่อป้องกันให้การทรุดตัวที่ผิวดินให้ไม่มากจนอาจจะก่อให้เกิดการเสียหายของโครงสร้างผิวดินและโครงสร้างรอบข้างได้นั้น โครงการการดันท่อโดยทั่วไปแล้วนั้นค่า overcut volume มีค่าน้อยมาก ประกอบกับโครงสร้างบนแนวการดันท่อมักจะเป็นถนนหรือทางเดินเท้าซึ่งการยุบตัวเพียงเล็กน้อยจาก volume loss จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างบนดิน

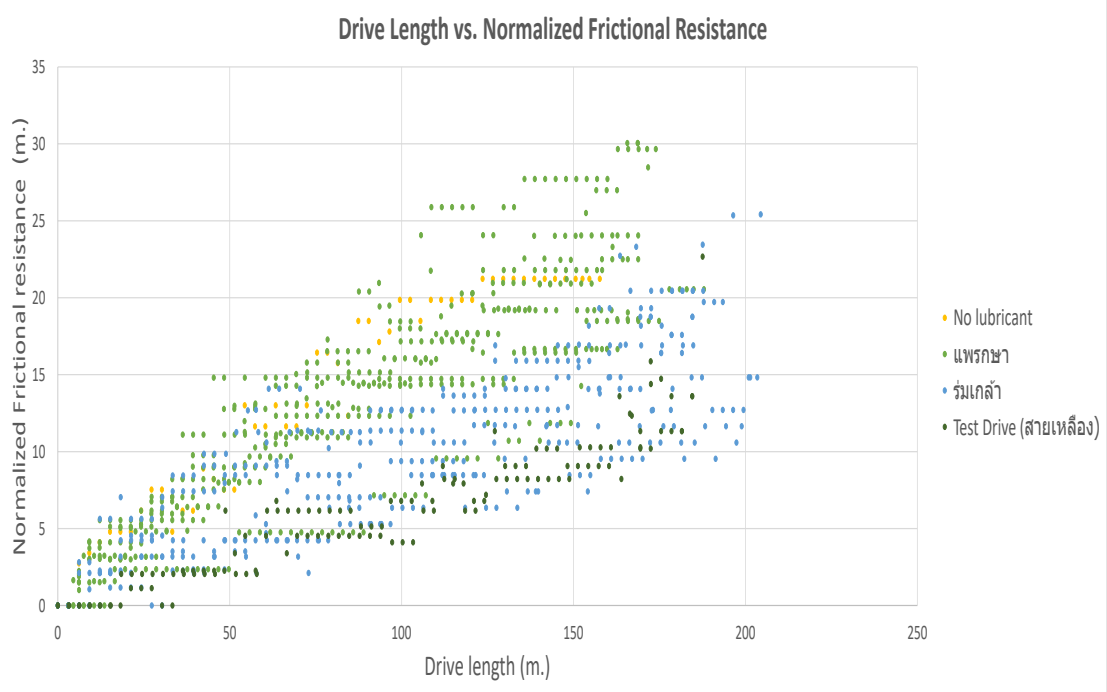
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.7 การออกแบบระบบการฉีดสารหล่อลื่นและการทดสอบในภาคสนาม

การฉีดสารหล่อลื่นในขั้นตอน initial injection นั้นจำเป็นต้องทำการฉีดก่อนเวลาที่ดินรอบอุโมงค์จะยุบตัวลงมันสัมผัสกับผิวของท่อดันโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อค้ำยันเสถียรภาพของอุโมงค์ที่จะยุบตัวลงมาสัมผัสกับผิวของท่อดัน โดยวัตถุประสงค์ด้านการทดแทน volume loss ที่อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างบนดินจากการทรุดตัวที่ผิวดินถือว่ามีความสำคัญน้อย อย่างไรก็ตามการที่หัวเจาะที่ใช้ในโครงการดันท่อนั้นส่วนมากไม่ได้ออกแบบมาให้มีการฉีดสารหล่อลื่นในบริเวณหัวเจาะทันทีที่ดินถูกขุดเจาะ ประกอบกับการที่ไม่มี wire brushes ที่บริเวณส่วนปลายของหัวเจาะ เพื่อสำหรับ

ป้องกันการไหลรั่วของสารหล่อลื่นย้อนกลับไปยังหัวเจาะ การฉีดสารหล่อลื่นในขั้นตอน initial injection นั้นจึงควรทำการฉีดที่ท่อ LP ที่ไกลจากหัวเจาะมากที่สุดตราบที่ดินยังไม่เกิดการยุบตัวลงมาจนเริ่มสัมผัสกับผิวของท่อดัน เนื่องจากการฉีดสารหล่อลื่นไม่ได้มีวัตถุประสงค์เกี่ยวกับการเติมเต็ม volume loss ที่จะทำให้เกิดการทรุดตัวที่ผิวดิน ดังนั้นปริมาณของสารหล่อลื่นที่ต้องการจึงควรจะมีค่าเท่ากับค่า overcut volume ที่ยังคงเหลืออยู่เมื่อหักลบกับปริมาตรของดินที่เกิดการยุบตัวลงมาแล้ว ดังนั้นระบบการฉีดสารหล่อลื่นที่เหมาะสมในโครงการการดันท่อที่มีลักษณะชั้นดินและลักษณะของโครงการใกล้เคียงกับโครงการในงานวิจัยนี้จึงควรทำการฉีดสารหล่อลื่นในช่วงดินที่มีระยะห่างจากหัวเจาะไม่เกิน 15 เมตร

รูปแบบการฉีดสารหล่อลื่นที่ได้ถูกนำเสนอไปนั้นถูกนำไปทดสอบในการดันท่อทั้งสิ้น 2 ช่วงดัน โดยเมื่อนำข้อมูลแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นตามระยะทางการดันจากบ่อดันมาทำการ normalize ด้วยการหารด้วย π, S_u และ D_p แล้วนำมาพลอตกราฟเปรียบเทียบกับระยะทางจากบ่อดัน จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 จะสามารถหาค่า α จากความชันของกราฟเส้นตรงได้



รูปที่ 4.13 กราฟระหว่างระยะจากบ่อดันและค่าแรงเสียดทาน

เมื่อทำการแบ่งข้อมูลเป็น 4 กรณี ได้แก่กรณีที่ไม่มีการฉีดสารหล่อลื่น, กรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นในขั้นต้นนั้นจะเริ่มต้นการฉีดสารหล่อลื่นที่ระยะจากหัวเจาะมากกว่า 48 เมตร (โครงการที่ถนนแพรกษา), กรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นสำหรับการฉีดขั้นต้นนั้นจะเริ่มต้นการฉีดสารหล่อลื่นในบริเวณดินที่ที่ระยะ

จากหัวเจาะอยู่ในช่วง 15 - 35 เมตร (โครงการที่ถนนร่มเกล้า) และในกรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นสำหรับการฉีดขั้นต้นนั้นจะเริ่มต้นการฉีดสารหล่อลื่นในบริเวณดินที่ระยะจากหัวเจาะน้อยกว่า 15 ชั่วโมง เมื่อนำสมการเส้นตรงมาใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลทั้ง 4 กรณีจะมีผลลัพธ์ดังนี้

1. ไม่มีการฉีดสารหล่อลื่น:

   $y = 0.1408(x) + 2.5988$, $R^2 = 0.9271$

2. การฉีดสารหล่อลื่นขั้นต้นที่ระยะมากกว่า 48 เมตร:

   $y = 0.1288(x) + 1.8672$, $R^2 = 0.7839$

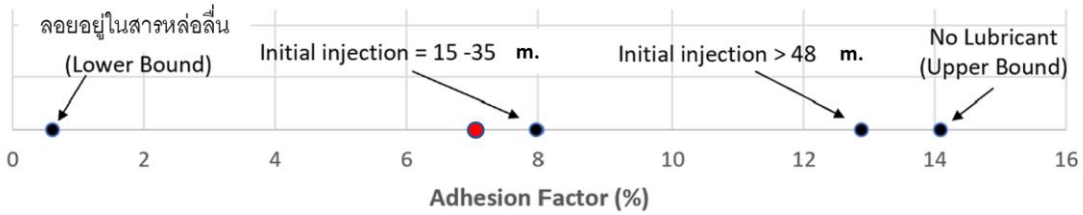
3. การฉีดสารหล่อลื่นขั้นต้นที่ระยะอยู่ในช่วง 15 - 35 เมตร:

   $y = 0.0797(x) + 1.6571$, $R^2 = 0.7066$

4. การฉีดสารหล่อลื่นขั้นต้นที่ระยะน้อยกว่า 15 เมตร:

   $y = 0.0719(x) - 0.6256$, $R^2 = 0.8677$

ค่าความชันของสมการเส้นตรงนั้น คือ ค่า α ของการดันท่อในแต่ละกรณี เมื่อนำค่า α ของแต่ละกรณีมาพลอตจะเป็นไปดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 Adhesion factor ในกรณีต่าง ๆ

Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมของดินรอบท่อดันและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินและผิวของท่อดันในงานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลแรงดันท่อทั้งหมด 2 โครงการ ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ประกอบด้วยข้อมูลของโครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินบริเวณถนนแพรกษา จากถนนสุขุมวิท-สถานีย่อยพุทธรักษา และโครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินบริเวณถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า การวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันนำไปสู่การนำเสนอวิธีการลดแรงเสียดทานด้วยการฉีดสารหล่อลื่นที่มีลำดับขั้นตอนและวิธีการที่เหมาะสม วิธีการการฉีดสารหล่อลื่นที่ได้นำเสนอนี้ถูกนำไปใช้ในการทดสอบการดันท่อในภาคสนามในโครงการก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน รถไฟฟ้าสายสีเหลือง โดยทั้ง 3 โครงการเป็นการดันท่อในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และปริมณฑล ที่มีลักษณะโครงการเป็นดังต่อไปนี้

1. ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำอยู่ในช่วง 2.03 ถึง 2.06 ตันต่อตารางเมตร
2. ค่าความลึกจากผิวดินอยู่ในช่วง 4.5 – 5.5 เมตร
3. ใช้สารหล่อลื่นเป็นสารโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.775 กรัม/ลบ.ซม.
4. เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะเท่ากับ 2.17 เมตร
5. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อดันเท่ากับ 2.12 เมตร
6. ท่อดันมีวัสดุเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กโดยไม่มีการเคลือบ
7. ช่วงกะการทำงานคือทำ 8 ชั่วโมงสลับกับหยุดพัก 16 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของดินรอบท่อดัน

จากผลการวิจัยจะพบว่าดินรอบตัวท่อดันนั้นจะต้องการค่าแรงดันเพื่อค้ำยันเสถียรภาพของอุโมงค์อยู่ในช่วง 1.6 – 2.2 ตันต่อตารางเมตร ทำให้การยุบตัวของดินจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ อย่างไรก็ตามควรจะมีการฉีดสารหล่อลื่นเพื่อวัตถุประสงค์ในการค้ำจุนเสถียรภาพของอุโมงค์ ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของการฉีดสารหล่อลื่นในขั้นต้น ดังนั้น สมการที่ควรใช้ในการคำนวณค่าแรงเสียดทานนั้นควรจะเป็นไปดังสมการที่ 5.1 โดยมีสมมติฐานตั้งต้นว่าผิวของท่อดันมีการสัมผัสกับสารหล่อลื่นเป็นบางส่วนและสัมผัสกับดินเป็นบางส่วน

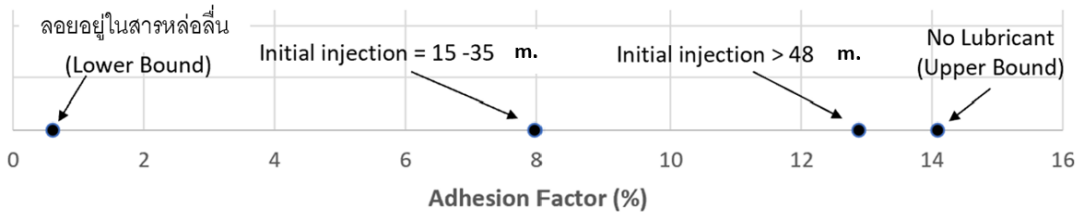
$$F_{SC} = \alpha S_u(\pi D_p) \quad 5.1$$

5.1.2 สรุปผลการหาขอบเขตของค่า α

ค่า α นั้นเป็นค่าเป็นค่าเฉพาะสำหรับค่า S_u นั้น ๆ และมีขอบเขตค่อนข้างกว้างโดยจะมีปัจจัยมากมายที่อาจจะส่งผลต่อค่า α อันได้แก่ การฉีดสารหล่อลื่น, ค่าความลึกจากผิวดิน, ช่วงเวลาการทำงาน, เส้นทางการดัน, Overcut ratio และวัสดุของท่อดันเป็นต้น โดยจากปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมานั้น การฉีดสารหล่อลื่นเป็นปัจจัยที่เป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ การฉีดสารหล่อลื่นในการดันท่อให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพนั้นขึ้นกับ 3 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงได้แก่ชนิดและความเข้มข้นของสารหล่อลื่น, ปริมาตรของสารหล่อลื่นที่ใช้และลำดับเวลาในการฉีดสารหล่อลื่น

สำหรับการดันท่อในโครงการที่มีข้อมูลดินและลักษณะของโครงการคล้ายคลึงกับโครงการการดันท่อในงานวิจัยนี้นั้น ค่าขอบเขตล่างของค่า α จะเกิดในกรณีที่ช่องว่างระหว่างผิวนอกของท่อกับผิวดินถูกเติมเต็มไปด้วยสารหล่อลื่นที่ถูกฉีดเข้าไปในระหว่างการดันท่อ ดินที่อยู่รอบช่องว่างอุโมงค์จะมีเสถียรภาพเพียงพอจากแรงค้ำยันจากสารหล่อลื่น ดังนั้นท่อดันจึงลอยอยู่ในสารหล่อลื่นโดยไม่มีการสัมผัสกับผิวดิน ซึ่งถือว่าเป็นกรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นเป็นไปอย่างสมบูรณ์แบบถือว่าเป็นกรณีในอุดมคติ โดย CCGA (1975) ได้นำเสนอค่า α ในกรณีให้เป็นค่าแรงยึดเหนี่ยวภายในของสารหล่อลื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.01 ตันต่อตารางเมตร ส่วนค่าขอบเขตบนนั้นจะเกิดขึ้นในช่วงการดันท่อที่ไม่มีการใช้สารหล่อลื่นตลอดช่วงการดันและค่า α ของช่วงการดันท่อที่มีการใช้สารหล่อลื่นนั้นจะอยู่ระหว่างค่าขอบเขตล่างและค่าขอบเขตบน

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาปัจจัยด้านลำดับเวลาในการฉีดสารหล่อลื่นที่มีผลต่อค่า α โดยทำการวิเคราะห์ผลแรงเสียดทานที่ใช้ในการดันท่อทั้งสิ้น 20 ช่วงดัน โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกมีทั้งสิ้น 2 ช่วงดัน โดยเป็นการดันท่อที่ไม่มีการฉีดสารหล่อลื่น กลุ่มที่ 2 มีทั้งสิ้น 8 ช่วงดันที่เป็นการฉีดสารหล่อลื่นในดินที่มีระยะห่างจากหัวเจาะมากกว่า 48 เมตร และ กลุ่มที่ 3 มีทั้งสิ้น 10 ช่วงดันที่ฉีดสารหล่อลื่นในดินที่มีระยะห่างจากหัวเจาะอยู่ในช่วง 15 - 35 เมตร จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ค่า α ของแต่ละกลุ่มมีค่าเท่ากับ 0.14, 0.13 และ 0.08 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 5.1



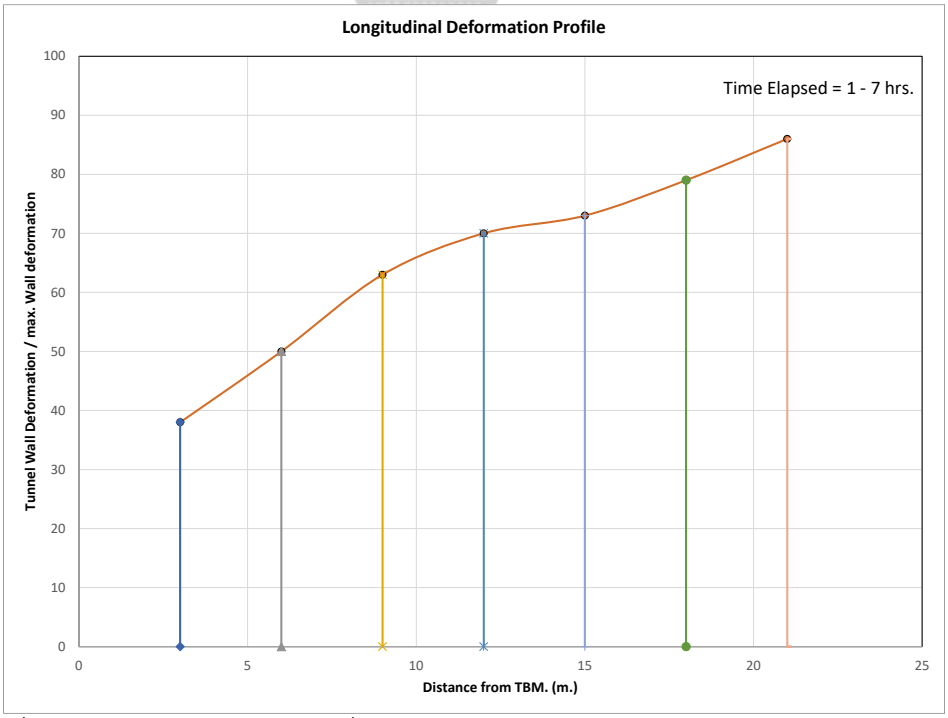
รูปที่ 5.1 Adhesion factor ในกรณีต่าง ๆ

5.1.3 สรุปผลการทดลองในสนามเพื่อเข้าใจพฤติกรรมของดินรอบท่อดัน

การทดลองแรกในงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพฤติกรรมการยุบตัวของดินที่ระยะต่าง ๆ จากหัวเจาะ โดยทำการฉีดของเหลวเข้าไปในช่องว่างระหว่างผิวของท่อดันและดิน และทำการวัดปริมาตรของเหลวที่เข้าไปได้ในแต่ละช่วงของท่อดัน โดยค่าปริมาตรของของเหลวที่ถูกฉีดเข้าไปได้ในแต่ละท่อดันนั้นเป็นดังตารางที่ 5.1 อย่างไรก็ตามกราฟของแสดงการยุบตัวของดินนั้นส่วนใหญ่จะเป็นการพลอตของค่ารัศมีของอุโมงค์ที่ถูกบีบตัวลงมากกว่าที่จะเป็นปริมาตรของดินที่ถูกบีบตัวลง ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการนำไปเปรียบเทียบจึงทำการแปลงจากปริมาตรการยุบตัวให้กลายเป็นเปอร์เซ็นต์ของรัศมีการยุบตัวต่อค่าการยุบตัวสูงสุด และสามารถพลอตเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ปริมาตรของของเหลวที่สามารถฉีดเข้าไปในแต่ละช่วงท่อดัน

No. of Pipe	Measured Volume (m3.)	Overcut Volume (m3.)	% Volume Displacement
1	0.19	0.505	37.01
2	0.25	0.505	49.01
3	0.31	0.505	62.02
4	0.35	0.505	69.02
5	0.36	0.505	72.02
6	0.39	0.505	78.02
7	0.43	0.505	86.03



รูปที่ 5.2 รัศมีการยุบตัวของดินเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการยุบตัวสูงสุดกับระยะจากหัวเจาะ

การขุดเจาะอุโมงค์ในสภาพดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวภายในนั้น ในช่วงที่ดินที่ถูกขุดเจาะยังไม่เกิดการอัดตัวคายน้ำหรืออาจจะกล่าวว่ายังอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ ดินรอบอุโมงค์ที่มีเสถียรภาพไม่เพียงพอนั้นจะไม่เกิดการการยุบตัวลงมาทันที หนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อการยุบตัวของดินนั้น คือ ระยะห่างจากหัวเจาะโดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อดินอยู่ในบริเวณที่ห่างออกจากหัวเจาะมากขึ้น และมีค่าเท่ากับค่าการยุบตัวสูงสุดที่จะเกิดขึ้นที่ระยะระยะหนึ่งจากหัวเจาะ ซึ่งลักษณะของกราฟที่แสดงการยุบตัวของดินนั้นจะขึ้นกับค่ารัศมีของพลาสติกโซนของดิน Sagaseta (1998) ได้นำเสนอสมการในการคำนวณค่ารัศมีพลาสติกโซนและค่าการยุบตัวที่ระยะต่าง ๆ จากหัวเจาะดังแสดงในสมการที่ 5.2 ถึง 5.4

$$N = \frac{p_0 - p_i}{c_u} \qquad 5.2$$

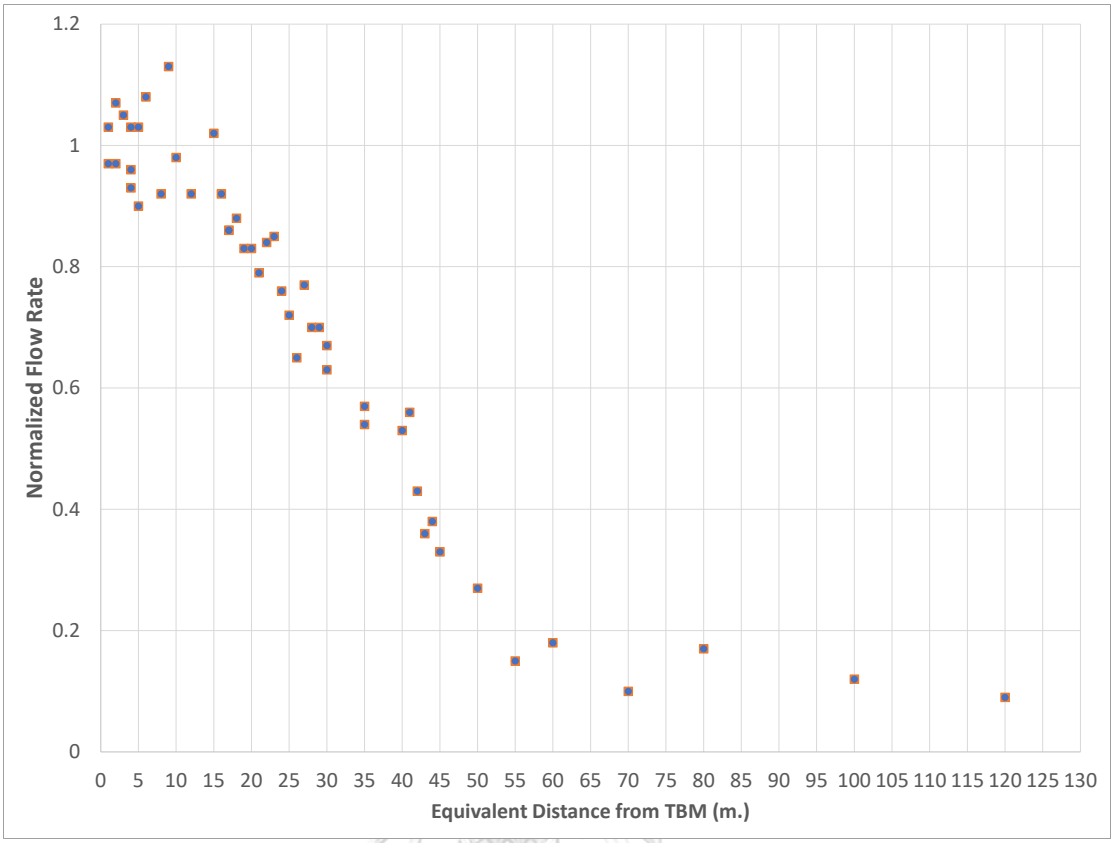
$$\frac{r_{pm}}{r_0} = e^{\frac{N-1}{2}} \qquad 5.3$$

$$\frac{u_i}{u_{im}} = 1-(0.74)\, e^{\frac{-3x}{2r_{pm}}} \qquad 5.4$$

เมื่อนำข้อมูลดินและลักษณะของโครงการในงานวิจัยฉบับนี้มาคำนวณตามสมการของ Sagaseta (1998) จะได้ค่ารัศมีของพลาสติกโซนเท่ากับ 8.4 เมตร อย่างไรก็ตามเมื่อนำข้อมูลการยุบตัวของดินที่ได้จากการทำการดทดลองในสนามมาเปรียบเทียบกับค่าการยุบตัวในกรณีที่ดินมีรัศมีของพลาสติกโซนต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าผลของการทดลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ดินมีรัศมีความกว้างของบริเวณที่เป็นพลาสติกเท่ากับ 15 เมตร

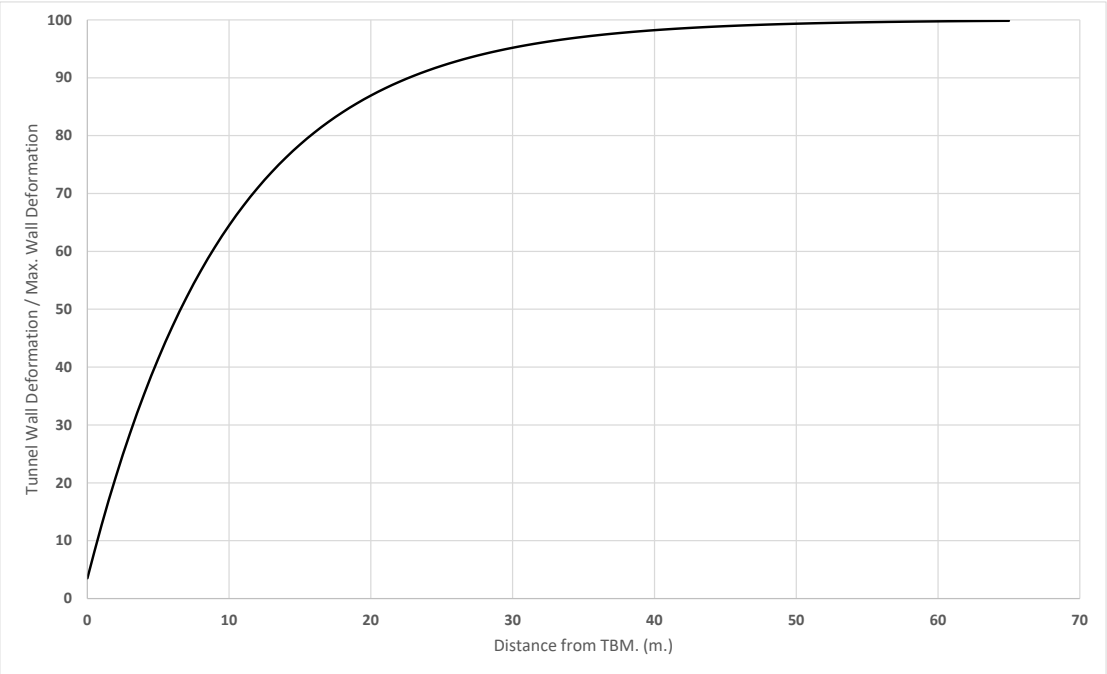
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในการทดลองที่ไม่สามารถหาปริมาตรของช่องว่างที่เหลืออยู่จากการยุบตัวของดินได้นั้นได้มีการบันทึกอัตราการไหลเฉลี่ยของของเหลว โดยผลของการทดลองนั้นเมื่อนำมาทำการ normalize กับอัตราการไหลที่ควรจะเป็นที่ความยาวท่อนั้น ๆ และนำมาพลอตกราฟกับระยะเวลานับตั้งแต่ถูกขุดเจาะ เนื่องจากการดันท่อในภาคสนามมีอัตราการดันโดยเฉลี่ยประมาณ 1 เมตรต่อ 1 ชั่วโมง ซึ่งรวมเวลาการพักระหว่างกะการทำงาน ดังนั้นจึงสามารถเปรียบเสมือนกราฟให้อยู่ในรูปของกราฟระหว่างค่าอัตราการไหลกับระยะห่างจากหัวเจาะได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 กราฟระหว่างอัตราการไหลกับระยะจากหัวเจาะ

เมื่อสังเกตรูปที่ 5.2 และ 5.3 จะเห็นว่าในบริเวณดินที่ระยะน้อยกว่า 15 เมตรจากหัวเจาะ ค่าอัตราการไหลของของเหลวที่ถูกฉีดนั้นยังอยู่ในเกณฑ์ปกติ ทั้งที่การยุบตัวของดินได้มีค่าถึง 75% ของค่าการยุบตัวสูงสุด และค่าอัตราการไหลจะเริ่มลดลงจนมีค่าคงที่ที่น้อยมาก ๆ ในบริเวณดินที่มีระยะ 55 เมตรจากหัวเจาะเป็นต้นไป จึงสามารถสรุปได้ว่า ดินจะเริ่มมีการยุบตัวจนมาขัดขวางการไหลของสารหล่อลื่นหรือสามารถกล่าวได้ว่าดินเริ่มจะมีการยุบตัวลงมาสัมผัสกับผิวของท่อดันเมื่อดินบริเวณนั้นมีระยะห่างจากหัวเจาะ 15 เมตรและดินในบริเวณที่ห่างจากหัวเจาะมากกว่า 55 เมตรนั้นจะยุบตัวลงมาสัมผัสกับผิวของท่อดันทั้งหมดและทำให้การฉีดสารหล่อลื่นทำได้ยาก ซึ่งข้อมูลจากการทดลองนั้นตรงกับค่าทางทฤษฎีที่ว่าที่ระยะ 55 เมตรจากหัวเจาะการยุบตัวของดินจะเกิดขึ้นเท่ากับค่าการยุบตัวสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และ 5.5



รูปที่ 5.4 การยุบตัวของดินที่มีค่ารัศมีพลาสติกโซนเท่ากับ 15

รูปที่ 5.5 ปอร์เซ็นต์การยุบตัวของดินที่ระยะต่าง ๆ จากหัวเจาะ

5.1.4 การออกแบบระบบการฉีดสารหล่อลื่นและการทดสอบในภาคสนาม

การฉีดสารหล่อลื่นเพื่อให้มีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องทำการฉีดก่อนเวลาที่ดินรอบอุโมงค์จะยุบตัวลงมันสัมผัสกับผิวของท่อดัน โดยวัตถุประสงค์การฉีดสารหล่อลื่นเพื่อทดแทน volume loss ที่อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างบนดินจากการทรุดตัวที่ผิวดินนั้นถือว่ามีความสำคัญน้อย เนื่องจากปริมาตร overcut ของอุโมงค์จากการดันท่อนั้นมักมีค่าต่ำมาก

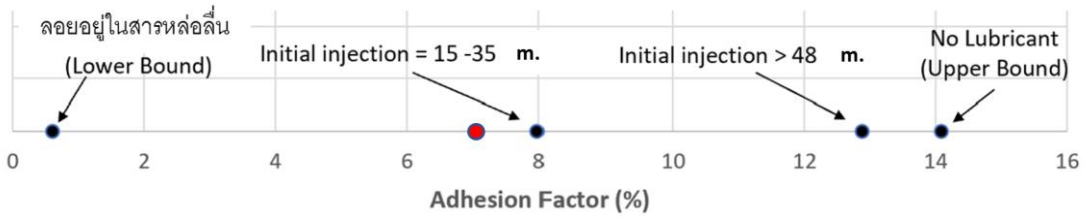
อย่างไรก็ตามการที่หัวเจาะที่ใช้ในโครงการดันท่อนั้นส่วนมากไม่ได้ออกแบบมาให้มีการฉีดสารหล่อลื่นในบริเวณหัวเจาะทันทีที่ดินถูกขุดเจาะ ประกอบกับการที่ไม่มี wire brushes ที่บริเวณปลายของหัวเจาะ เพื่อสำหรับป้องกันการไหลรั่วของสารหล่อลื่นย้อนกลับไปยังหัวเจาะ การฉีดสารหล่อลื่นนั้นจึงควรทำการฉีดที่ท่อดันที่ไกลจากหัวเจาะมากที่สุดตราบที่ดินยังไม่เกิดการยุบตัวลงมาจนเริ่มสัมผัสกับผิวของท่อดันซึ่งก็คือที่ระยะน้อยกว่า 15 เมตร จากหัวเจาะ และเนื่องจากการฉีดสารหล่อลื่นไม่ได้มีวัตถุประสงค์เกี่ยวกับการเติมเต็ม volume loss ที่จะลดการทรุดตัวที่ผิวดิน ดังนั้นปริมาณของสารหล่อลื่นที่ต้องการจึงควรจะมีค่าเท่ากับค่าปริมาตร overcut ที่ยังคงเหลืออยู่เมื่อหักลบกับปริมาตรของดินที่เกิดการยุบตัวลงมาแล้วที่ระยะห่างต่าง ๆ จากหัวเจาะ ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ปริมาตรสารหล่อลื่นที่แนะนำในการฉีดสารหล่อลื่นขั้นต้นตามแต่ละท่อดัน

No. of Pipe	Distance from TBM (m.)	Remained Overcut Volume (m3.)
1	0 - 3	0.19
2	3 - 6	0.25
3	6 - 9	0.31
4	9 - 12	0.35
5	12 - 15	0.36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปแบบการฉีดสารหล่อลื่นที่ได้ถูกนำเสนอไปนั้นถูกนำไปทดสอบในการดันท่อทั้งสิ้น 2 ช่วงดัน โดยสามารถหาค่า α ได้เท่ากับ 0.072 ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการดันท่อในกรณีอื่น ๆ จะเป็นไปดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 Adhesion factor ในกรณีต่าง ๆ

ค่า α สำหรับงานดันท่อทำการวิเคราะห์ย้อนกลับกลับมาได้นั้นถือว่ามีค่าต่ำมากหากเปรียบเทียบกับค่า α ของงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกที่มีการใช้สารละลายโพลิเมอร์ โดยค่า α ของงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในดินเหนียวมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำอยู่ในช่วง 2.03 ถึง 2.06 ตันต่อตารางเมตรจะอยู่ที่ประมาณ 90% ซึ่งเป็นเพราะในกรณีของการดันท่อในชั้นดินกรุงเทพฯ ค่าแรงดันภายในอุโมงค์ที่ต้องการในการค้ำยันอุโมงค์ให้มีเสถียรภาพเพียงพอหรือ σ_t นั้นถือว่ามีค่าต่ำ ซึ่งทำให้ดินที่ยุบตัวลงมาสัมผัสกับท่อดันนั้นเป็นไปอย่างหลวมๆ และแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเป็นแรงเสียดทานในช่วงก่อสร้างซึ่งดินยังไม่เกิดการทรุดตัวเต็มที่ ตรงกันข้ามกับในงานเสาเข็มเจาะเปียกที่ดินที่สัมผัสรอบตัวเสาเข็มนั้นมีแรงดันดินด้านข้างค่อนข้างสูงและเป็นแรงเสียดทานในระยะยาวที่ดินโดยรอบเสาเข็มมีการเคลื่อนตัวเข้ามาโอบรัดเสาเข็มเต็มที่แล้ว

โดยจะสามารถสรุปได้ว่าการฉีดสารหล่อลื่นตามรูปแบบที่งานวิจัยนี้ได้นำเสนอนั้นสามารถลดค่าแรงเสียดทานได้ถึง 48.9 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการฉีดสารหล่อลื่นและ 9.7 – 44.1 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่การฉีดสารหล่อลื่นเป็นไปอย่างไม่มีแบบแผน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลของการวิจัยที่ได้จากการทำงานวิจัยฉบับนี้นำไปสู่การนำเสนอข้อศึกษาที่ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัยต่อ ๆ ไปมีดังนี้

1. การยุบตัวของดินที่เกิดจากการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว
2. ชนิดและความเข้มข้นของสารหล่อลื่นที่ส่งผลต่อค่าแรงเสียดทานที่จะเกิดขึ้นในการดันท่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

บริษัท สยามพราวด์ โคออปเปเรชั่น จำกัด. (2562). *การดันท่อ (Pipejacking) เป็นเทคนิควางท่อลอดใต้ดิน ที่ใช้แม่แรงไฮดรอลิคขนาดใหญ่ดันท่อทะลุใต้ดิน และประกอบนำหน้าเป็นหัวเจาะที่ช่วยเจาะด้วย*. เข้าถึงได้จาก https://siamproud-cooperation.com/projects_single.php?work=1

Haslem, R. F. (1986). Pipe-jacking forces: from practice to theory. In *Proceedings of the ICE North Western Association Centenary Conference in Infrastructure Renovation and Waste Control* (pp. 173-180). Manchester, UK: Thomas Telford.Norris, P. (1992). *The behaviour of jacked concrete pipes during site installation.* (Doctor of philosophy). University of Oxford, Oxford.

Pipe Jacking Association. (1995). *Guide to best practice for the installation of pipe jacks and microtunnels*. London: Pipe Jacking Association.

Potyondy, J. G. (1961). Skin Friction Between Various Soils And Construction Materials. *Géotechnique, 11*(4), 339-353.

Praetorius, S., & Britta, S. (2017). *Bentonite handbook : lubrication for pipe jacking*. Berlin, Germany: John Wiley & Sons.

Sagaseta, C. (1998). On the Role of Analytical Solutions for the Evaluation of Soil Deformation Around Tunnels. In A. Cividini (Ed.), *Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems. International Centre for Mechanical Sciences*. Vienna: Springer.

Sloan, S. W., Wilson, W. D., Abbo, A., & Lyamin, V. A. (2011). Undrained stability of a circular tunnel where the shear strength increases linearly with depth. *Canadian Geotechnical Journal, 48*(9), 1328-1342.

Yonan, S. J. (1993). *Pipe Jacking Forces in Sand.* (Doctoral dissertation). Loughborough University, UK.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Pun Ngamsangrat
วัน เดือน ปี เกิด	29 December 1995
สถานที่เกิด	Bangkok
ที่อยู่ปัจจุบัน	185/211 Rachadamri Lumphini Pathumwan BKK 10330

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University