

ปัจจัยกระทบในการขุดเจาะคูเมืองด้วยระบบแรงดันดินสมดุล



นาย ธนารัตน์ ธนกิจเลิศสกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-1924-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INFLUENCED FUNCTION IN TUNNELLING BY EARTH PRESSURE BALANCE SHIELD

Mr. Thanaratn Thanakijlurssakul



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2005


ISBN 974-53-1924-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยกระทบในการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยระบบแรงดันดินสมดุล
โดย	นาย ธนารัตน์ ธนกิจเลิศสกุล
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์

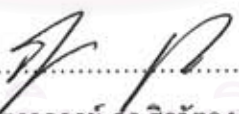
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัด บุญญะฐิติ)

สถาบันวิจัยปฏิบัติการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์

ธนารัตน์ ธนกิจเลิศสกุล : ปัจจัยกระทบในการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยระบบแรงดันดินสมดุล. (INFLUENCED FUNCTION IN TUNNELLING BY EARTH PRESSURE BALANCE SHIELD) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์ , 112 หน้า. ISBN 974-53-1924-4.

การวิจัยนี้ศึกษา ปัจจัยกระทบที่มีผลต่อการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยระบบแรงดันดินสมดุล และการทรุดตัวที่ผิวดิน โดยอิงข้อมูลจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปาแรงดันสูง ของสถานีส่งน้ำบางเขน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ภายนอก 4.07 ม. ลึกจากผิวดินประมาณ 20 ม. การวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การทดลองในห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบคุณสมบัติดินทรายเมื่อผสมกับ โฟม และ ผสมกับ เบนโทไนท์ 2) เปรียบเทียบข้อมูลการขุดเจาะอุโมงค์ช่วงที่มีการใช้ โฟม และ เบนโทไนท์เป็นสารผสมเพิ่ม และช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง และ อยู่ในทางโค้ง 3) การวิเคราะห์กลับด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ เพื่อหาค่าอัตราส่วนการสูญเสียมวลดิน (Ground loss) เปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัด

ผลการวิจัยพบว่า การใช้โฟมเป็นสารผสมเพิ่ม ช่วยให้การขุดเจาะอุโมงค์ด้วยระบบแรงดันดินสมดุล มีประสิทธิภาพสูงขึ้นมากกว่าการใช้เบนโทไนท์ อัตราการขุดเจาะอุโมงค์สูงกว่า, การควบคุมแรงดันหน้าหัวเจาะดีกว่า, การดึงดินออกจากหัวเจาะด้วยระบบสายพานเร็วกว่า, Cutter Torque ต่ำกว่า ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า โฟมมีส่วนช่วยเพิ่มค่า การอัดตัว(Compressibility) ของดิน และช่วยลดค่าการใช้พลังงาน(Power consumption) ของการขุดเจาะอุโมงค์ทำให้การขุดเจาะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ผลการวิเคราะห์กลับด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์พบว่า ในช่วงการขุดเจาะอุโมงค์ที่ใช้โฟมเป็นสารผสมก่อให้เกิด Ground loss ประมาณ 1- 3 % ในขณะที่การขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้สารละลายเบนโทไนท์ก่อให้เกิด Ground loss มากถึง 4 – 11 %

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต..... Thanaratu T.
 สาขาวิชา...วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... อ.วันชัย
 ปีการศึกษา 2548

AN ABSTRACT

4570347921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: EPB SHIELD / FOAM / BENTONITE / GROUND LOSS / GROUND SURFACE SETTLEMENT

THANARATN THANAKIJLURSSAKUL : INFLUENCED FUNCTION IN TUNNELLING BY
EARTH PRESSURE BALANCE SHIELD.THESIS ADVISOR : ASST.PROF.WANCHAI
TEPARAKSA, 112 pp. ISBN 974-53-1924-4.

This research focuses on influenced function of conditioning agent to the efficiency in tunnelling by earth pressure balance shield (EPB Shield) and ground surface displacement. The research data was based on the high pressure water supplied tunnel from Bangkhen Distribution Station having outside diameter of 4.07 m. with centerline at about 20 m. below ground surface. The research divided into 3 parts as 1) By means of laboratory test for mixing conditioning agents of foam and bentonite with sand sample. 2) Compare the influence factors in terms of TBM tunneling record using foam and bentonite conditioning as well as effect of straight and curve tunnel alignment. 3) Back analyze by Finite Element Method (FEM) to determine the percentage of ground loss compared with field performance.

The results showed that the foam conditioning agent showed the significant on efficiency improvement of tunnelling than bentonite agent by increase rate of penetration, better control the face pressure, better rate of screwconveyor speed, lower cutter torque and induce low ground surface settlement. The laboratory results showed the foam agent increased the compressibility of soil , reduced the power consumption and led to increase the efficiency of tunnelling work. The back analysis by FEM found that the ground loss induced due to tunnelling with foam conditioning agent and bentonite conditioning agent were in the order of 1-3 % and 4-11 % respectively.

Department.....Civil Engineering..... Student's signature.....*Thanaratu T.*.....

Field of study.....Civil Engineering..... Advisor's signature.....*Wanchai Tepra*.....

Academic year 2005

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา และ คำแนะนำต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด และ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัด บุญญะฐี ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ การประสานครหลวง โครงการก่อสร้างชุดเจาะอุโมงค์ส่งน้ำประปา โรงกรองน้ำบางเขน ในการอนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูล และ คุณชินวุฒิ ชาญฉายา วิศวกร บริษัท Asia Tech.Co.Ltd ในการให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล และ ให้คำปรึกษา ขอขอบคุณ คุณ ชลธิชา บุญส่ง บริษัท สแตรดิเจีย เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่ให้คำปรึกษา ในทุกๆด้าน ขอขอบพระคุณ บริษัท สกุลไทย ที่ให้โอกาสด้านการศึกษา และ ขอขอบคุณ คุณ สุกานดา สิทธิ ที่อยู่เคียงข้างตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดาที่ รัก ห่วงใย และ ให้กำลังใจ ตลอดมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

๒

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ

บทที่

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4

บทที่ 2 ทฤษฎีและทบทวนงานในอดีต

2.1 การขุดเจาะอุโมงค์โดยวิธี Shield Tunneling ในดินอ่อน	5
2.2 หลักการพื้นฐานของหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุล	5
2.3 ผนังอุโมงค์ (Lining).....	11
2.4 การอุดช่องว่างรอบผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting).....	13
2.5 การเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์.....	13
2.6 การจำแนกการทรุดตัวที่ผิวดิน.....	17
2.7 การควบคุมการเคลื่อนตัวของดินในการขุดเจาะอุโมงค์.....	20

บทที่	หน้า
2.8 เสถียรภาพทางด้านหน้าอุโมงค์ (Stability of tunnel face)	21
2.9 การปรับปรุงคุณสมบัติดินในงานอุโมงค์.....	24
บทที่ 3 การรวบรวมข้อมูล และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 ลักษณะทั่วไปของโครงการ.....	32
3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	36
3.2.1 ข้อมูลทั่วไปของโครงการ และวิธีการขุดเจาะอุโมงค์.....	36
3.2.2 ข้อมูล Ground Surface Settlement	40
3.2.3 ข้อมูล บันทึกรหัสเจาะ.....	41
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	42
3.3.1 การวิจัยโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	42
3.3.2 การวิเคราะห์ ข้อมูลที่ได้จากสนาม.....	53
3.3.3 การวิเคราะห์ การทรุดตัวของผิวดินโดยใช้ โปรแกรม PLAXIS.....	54
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลงานวิจัย.....	56
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ.....	56
4.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ Direct Simple Shear.....	57
4.1.2 การทดสอบเพื่อหาค่า Compressibility ของดิน.....	62
4.1.3 การทดสอบ Power Consumption.....	70
4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากสนาม (Tunnel Boring Machine Record).....	78
4.2.1 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ Face Pressure.....	81
4.2.2 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ Cutter Head Torque.....	82
4.2.3 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ Screw Conveyor Speed.....	83
4.2.4 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ Penetration Rate.....	84
4.2.5 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ Push Pressure.....	85
4.2.6 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ ค่า Articulate Pressure.....	86
4.2.7 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อค่า Ground Surface Settlement.....	87
4.2.8 การศึกษาปัจจัยกระทบต่อหัวเจาะช่วงที่อุโมงค์อยู่ในทางตรงและช่วงอุโมงค์ เข้าโค้ง.....	89

บทที่	หน้า
4.3 การวิเคราะห์ Ground Surface Settlement โดยใช้ โปรแกรม Plaxis.....	94
4.3.1 การเลือกใช้แบบจำลองดิน.....	94
4.3.2 ระดับน้ำใต้ดิน.....	95
4.3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	95
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ Ground Surface Settlement ด้วย โปรแกรม Plaxis..	101
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์ และ ข้อเสนอแนะ.....	107
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์.....	107
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	108
รายการอ้างอิง.....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	112

สารบัญตาราง

ญ

ตาราง	หน้า
1.1 แสดงลักษณะทั่วไปของโครงการ.....	4
3.1 แสดง ลักษณะทั่วไปของโครงการ.....	35
3.2 แสดง Station และ Condition ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ TBM Record และ FEM.....	41
4.1 แสดงส่วนผสม และค่า Friction Angle ของตัวอย่างทดสอบ Direct Simple Shear.....	58
4.2 แสดง ส่วนผสม และ Void Ratio ของดิน ผสม โฟม ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	63
4.3 แสดง ส่วนผสม และ Void Ratio ของดิน ผสม เบนโทไนท์ ที่อัตราส่วนต่างๆ	67
4.4 แสดงอัตราส่วนผสม และ Power consumption ของ ทราบ ผสม โฟม ที่ส่วนผสมต่างๆ.....	71
4.5 แสดงอัตราส่วนผสม และ Power consumption ของ ทราบ ผสม เบนโทไนท์ ที่ส่วนผสมต่างๆ.....	74
4.6 แสดงข้อมูลทางกายภาพของอุโมงค์.....	101
4.7 แสดงลักษณะเส้นทางอุโมงค์ การใช้สารผสมเพิ่ม และ Station ที่เลือกนำมาวิเคราะห์ FEM.....	102



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 แสดงแนวเส้นทางอุโมงค์ส่งน้ำประปาจากโรงกรองน้ำบางเขนถึงถนนงามวงศ์วาน.....	2
2.1 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ใน Chamber และ Screw Conveyor.....	9
2.2 แสดง Ground Loss ที่เกิดขึ้น ที่หัวเจาะชนิด EPBs (Lee,K.M.et al,1992).....	14
2.3 แสดง Ground Loss เหนือหัวเจาะอุโมงค์เนื่องจาก Overcutting (Lee,K.M.et al,1992).....	16
2.4 แสดง Ground Loss ที่เกิดเนื่องจาก Tail Voids (Lee,K.M.et al,1992).....	17
2.5 แสดงการทรุดตัวตามแนวยาว (A.Sramoon and Sugimoto,1999).....	18
2.6 แสดงการทรุดตัวตามแนวขวาง.....	20
3.1 แสดงแนวเส้นทางอุโมงค์ส่งน้ำประปาโครงการ G-MC-7A	32
3.2 แสดงลักษณะเส้นทางอุโมงค์ และ ตำแหน่งหลุมเจาะ.....	34
3.3 แสดงลักษณะของ Foaming Agent ก่อนที่จะนำไปผสมกับน้ำ.....	43
3.4 แสดงวิธีการปั่น โฟม และตัวอย่างโฟม หลังจากปั่นเสร็จ แล้ว.....	44
3.5 แสดงเครื่องทดสอบ Direct Shear.....	46
3.6 แสดงการผสม ททราย กับ โฟม เข้าด้วยกัน ด้วยเครื่อง ผสมดิน.....	47
3.7 แสดงการเตรียมตัวอย่าง ททราย กับ โฟม ลงใน Shear Box.....	48
3.8 แสดงเครื่อง Oedometer ใช้ทดสอบหา Compressibility ของตัวอย่าง.....	49
3.9 แสดงลักษณะการเตรียมตัวอย่าง ททราย ผสม โฟม เพื่อทำการทดสอบ Compressibility.....	50
3.10 เครื่อง TOU Meter ใช้ในการวัดพลังงานที่ใช้ ปั่นดิน.....	51
3.11 แสดง การวัดพลังงานที่ใช้ในการปั่นตัวอย่าง โดยเครื่อง TOU Meter.....	51
4.1 แสดงค่า Friction Angle ของ ททราย และ ททราย ผสม โฟม ที่ส่วนผสมต่างๆ	59
4.2 แสดงค่า Friction Angle ของ ททราย และ ททราย ผสม เบนโทไนท์ ที่ส่วนผสมต่างๆ	60
4.3a แสดง Friction Angle ของ ททราย + โฟม	61
4.3b แสดง Friction Angle ของ ททราย + เบนโทไนท์.....	61
4.4 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Void Ratio กับ Vertical Stress ของ ดิน ผสมโฟม ที่อัตราส่วนต่างๆ	64
4.5 แสดงค่า Initial Void Ratio ของ Sand+ โฟม ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	65
4.6 แสดงค่า Final Void Ratio ของ Sand + โฟม ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	65
4.7 แสดงค่า Different Void Ratio ของ Sand + โฟม ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	66
4.8 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Void Ratio กับ Vertical Stress ของ ดิน ผสม เบนโทไนท์ ที่อัตราส่วนต่างๆ	67

ภาพประกอบ	หน้า
4.9 แสดงค่า Initial Void Ratio ของ Sand+ Bentonite ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	68
4.10 แสดงค่า Final Void Ratio ของ Sand+ Bentonite ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	68
4.11 แสดงค่า Difference Void Ratio ของ Sand+ Bentonite ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	69
4.12 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Power Consumption ของตัวอย่าง ทราบ ผสม โฟม ที่ เปอร์เซ็นต์ FIR ต่างๆ	72
4.13 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Power Consumption กับ ปริมาณ เบนโทไนท์ ที่ผสมกับทราบ ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	75
4.14 แสดง การเปรียบเทียบ Power Consumption ของ ทราบ ผสม โฟม กับ ทราบ ผสม เบนโทไนท์ ที่ Water content ต่างๆ.....	76
4.15 (a) ค่า Ground Surface Settlement (mm) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205.....	78
4.15 (b) ค่า Face Pressure (Bar) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205.....	79
4.15 (c) ค่า Cutter Head Torque (Bar) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205.....	79
4.15 (d) ค่า Penetration Rate (minute) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205.....	79
4.15 (e) ค่า Screwconveyor Speed (Rev / minute) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205.....	80
4.15 (f) ค่า Push Pressure (Bar) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205.....	80
4.15 (g) ค่า Articulate Pressure (Bar) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205.....	80
4.16 เปรียบเทียบ ค่า Face Pressure (bar) ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม.....	81
4.17 เปรียบเทียบ ค่า Cutter Head Torque(bar) ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม.....	82
4.18 เปรียบเทียบ ค่า Screw Conveyor Speed (Round/Minute , rpm) ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม.....	83
4.19 เปรียบเทียบ ค่า Penetration Rate (mm/Minute)ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม.....	84
4.20 เปรียบเทียบ ค่า Push Pressure ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม.....	85
4.21 เปรียบเทียบ ค่า Articulate pressure ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม.....	86

ภาพประกอบ	หน้า
4.22 เปรียบเทียบ ค่า Ground Surface Settlement ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับ ช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม.....	87
4.23 เปรียบเทียบ ค่า Face Pressure ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง(Stg)และ ช่วงที่ อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv).....	89
4.24 เปรียบเทียบ ค่า Cutter Head Torque ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง(Stg) และ ช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv).....	90
4.25 เปรียบเทียบ ค่า Screwconveyor Speed ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง (Stg) และ ช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv).....	90
4.26 เปรียบเทียบ ค่า Penetration Rate ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง(Stg) และ ช่วงที่ อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv).....	91
4.27 เปรียบเทียบ ค่า Push Pressure ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง(Stg) และ ช่วงที่ อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv).....	91
4.28 เปรียบเทียบ ค่า Articulate Pressure ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง (Stg) และ ช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv).....	92
4.29 เปรียบเทียบ ค่า Ground Surface Settlement ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง (Stg) และ ช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv).....	92
4.30 แสดงลักษณะแรงดันน้ำในดินกรุงเทพฯ.....	95
4.31 แสดงค่า Stiffness ของดินกับระดับการเสียรูป.....	98
4.32 (a) แสดงผลการทดสอบ Pressuremeter test ของดินBangkok Soft Clay.....	99
4.32 (b) แสดงผลการทดสอบ Pressuremeter testของดินBangkok Stiff Clay.....	99
4.33 แสดงค่า Ground Surface Settlement และ ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground loss ที่วิเคราะห์หักกลับจาก โปรแกรม Plaxis โดย ชุดอุโมงค์ ใน ทางตรง และใช้ เบนโทไนท์ เป็น สารผสมเพิ่ม.....	102
4.34 แสดงค่า Ground Surface Settlement และ ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground loss ที่วิเคราะห์หักกลับจาก โปรแกรม Plaxis โดย ชุดอุโมงค์ ใน ทางโค้ง และใช้ เบนโทไนท์ เป็น สารผสมเพิ่ม.....	103
4.35 แสดงค่า Ground Surface Settlement และ ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground loss ที่วิเคราะห์หักกลับจาก โปรแกรม Plaxis โดย ชุดอุโมงค์ ใน ทางตรง และใช้ โฟม เป็น สารผสมเพิ่ม.....	104
4.36 แสดงค่า Ground Surface Settlement และ ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground loss ที่วิเคราะห์หักกลับจาก โปรแกรม Plaxis โดย ชุดอุโมงค์ ใน ทางโค้ง และใช้ โฟม เป็น สารผสมเพิ่ม.....	105

บทที่ 1

บทนำ

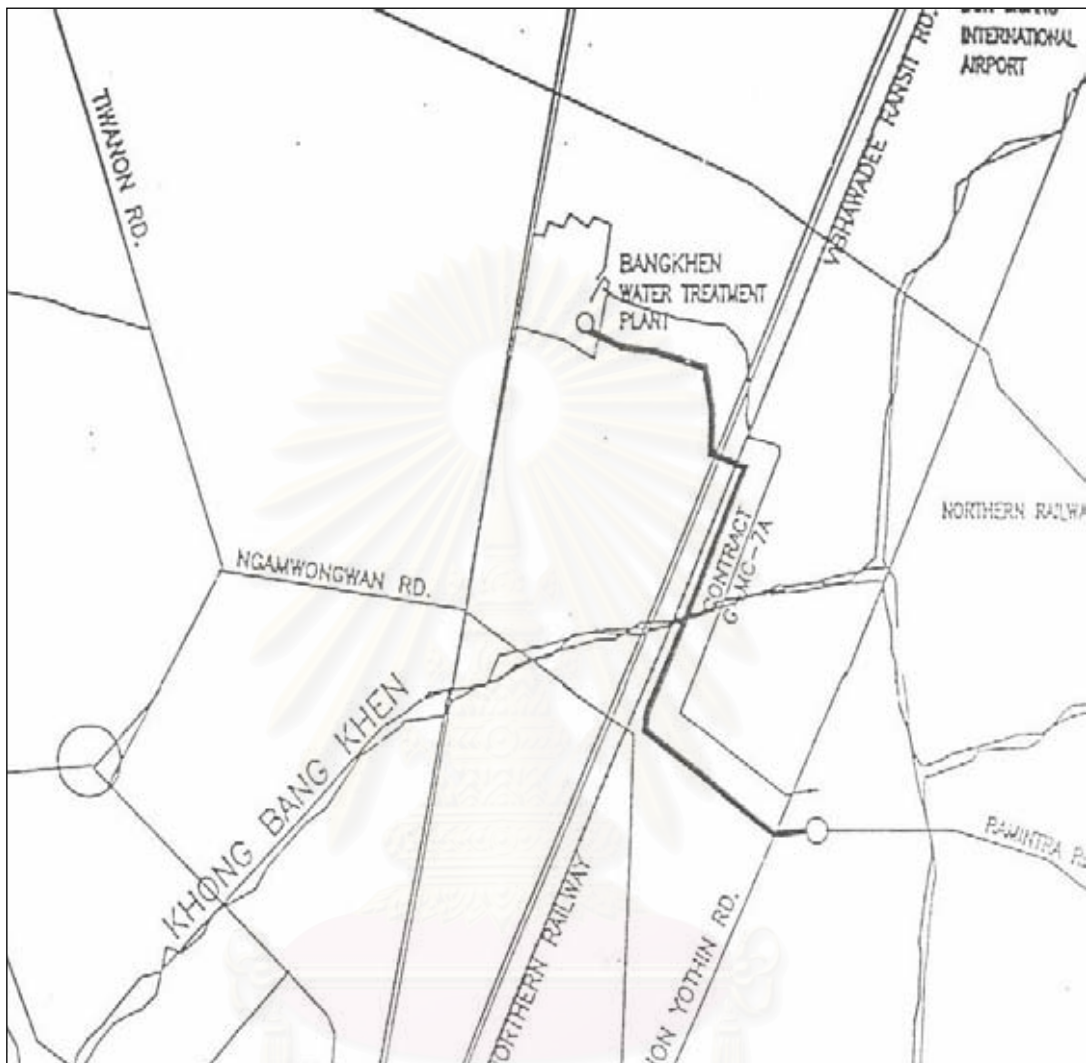
1.1) ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน กรุงเทพมหานคร มีการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ธุรกิจ การค้า และการพาณิชย์อย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการย้ายถิ่นฐานเข้ามาอยู่อาศัยเพิ่มขึ้น ความต้องการด้านสาธารณูปโภคต่างๆจึงเพิ่มขึ้น ทั้งระบบขนส่งมวลชน ระบบบำบัดน้ำเสีย และสาธารณูปโภคต่างๆ ที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต เช่น น้ำประปา ไฟฟ้า และระบบโทรศัพท์ ทางรัฐบาลจึงต้องมียุทธศาสตร์เร่งก่อสร้างโครงการต่างๆ เพื่อรองรับความต้องการของประชาชน

การก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคต่างๆที่ปัจจุบัน รัฐบาลดำเนินการอยู่มีหลายโครงการด้วยกัน เช่น โครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน สายเฉลิมรัชมงคล ของการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย หรือ รฟม.(Mass Rapid Transit Authority of Thailand,MRTA) โครงการก่อสร้างระบบป้องกันน้ำท่วมอุโมงค์ผันน้ำคลองเปรมประชากร โครงการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย โครงการขนส่งสายไฟฟ้าใต้ดิน และอุโมงค์ส่งน้ำของ การประปานครหลวง (Metropolitan Water Works Authority, MWA)

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า ปัจจุบัน กรุงเทพมหานคร มีพื้นที่จำกัดและคับแคบมาก ทำให้การก่อสร้างด้านสาธารณูปโภคส่วนใหญ่ จะทำการก่อสร้างกันใต้ดิน โดยวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดใหญ่ในชั้นดินกรุงเทพฯซึ่งมีสภาพชั้นดินหลายประเภท วิธีที่เหมาะสมและใช้กันส่วนใหญ่คือ ระบบแรงดันดินสมดุล, EPB(Earth Pressure Balance Shield) ซึ่งเป็นหัวเจาะแบบหน้าปิด มีแรงดันดินเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมหัวเจาะ โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆมากมายที่ทำให้ หัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุลมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น การใช้สารปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil Conditioning Agents) โดยฉีดไปบริเวณหน้าหัวเจาะ และในห้องควบคุมแรงดันดิน (Pressure Chamber) ซึ่งผลลัพธ์ ที่ออกมาเป็นที่ยอมรับและน่าพอใจในหลายๆด้าน

การประปานครหลวง ได้ริเริ่มโครงการเพิ่มกำลังการผลิตน้ำประปา เพื่อแจกจ่ายให้กับประชาชนในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑล จึงมีโครงการก่อสร้างชุดเจาะอุโมงค์ส่งน้ำประปา จากโรงกรองน้ำบางเขนไปสู่สถานีสูบน้ำจ่ายน้ำประปามินบุรี โดยโครงการก่อสร้างสัญญา G-MC-7A นี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของโครงการดังกล่าวโดยเริ่มทำการชุดเจาะตั้งแต่โรงกรองน้ำบางเขนถึงถนนงามวงศ์วาน รวมเป็นระยะทางทั้งหมดประมาณ 7 กิโลเมตร ดังรูป 1.1



รูปที่ 1.1 แนวเส้นทางอุโมงค์ส่งน้ำประปาโครงการ G-MC-7A จาก โรงกรองน้ำบางเขนถึง ถนนงามวงศ์วาน

ตารางที่ 1.1 ลักษณะทั่วไปของโครงการ

เจ้าของโครงการ	การประปานครหลวง
ชื่อโครงการ	Transmission Tunnel Project from Bangkhen Water Treatment Plant to Ngamwongwan Road
ผู้รับเหมาโครงการ	TN Joint Venture
ราคาค่าก่อสร้าง	1,067,844,712.00 บาท
ระยะเวลาก่อสร้าง	เริ่มก่อสร้าง 23 เมษายน 2544 , ระยะเวลา 840 วัน
ความลึกของอุโมงค์	ผิวดินถึงกึ่งกลางอุโมงค์ ประมาณ 20.5 เมตร
ชนิดดิน	เป็นชั้นดินเหนียวแข็งปนทราย
Tunneling Method	Shield Tunneling Type
Excavation Method	Earth Pressure Balance Type
ความยาวอุโมงค์	ประมาณ 7,000 เมตร
Primary Lining	Precast Concrete Segment OD = 4,076 mm ,หนา 15 cm
Secondary Lining	Steel Tube Element ID = 3,400 mm ,หนา 18 mm

1.2) วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของดิน เมื่อผสมกับ โฟมและ เบนโทไนท์
- 2) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุลเมื่อใช้ โฟมและ เบนโทไนท์เป็นสารผสมเพิ่ม
- 3) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการทรุดตัวของชั้นดิน เมื่อใช้ โฟมและ เบนโทไนท์เป็นสารผสมเพิ่ม โดยใช้โปรแกรม PLAXIS วิเคราะห์

1.3) ขอบเขตของการวิจัยและแนวทางการศึกษา

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการอาศัยข้อมูลจริงในสนาม โดยได้ทำการรวบรวมไว้แล้วนำมาพิจารณาตามจุดประสงค์ที่วางไว้ โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาดังแต่ CH 0+000.00 ถึง CH 3+313.632 ข้อมูลหลักที่นำมาศึกษาประกอบด้วย

- 1) ข้อมูลลักษณะชั้นดิน และพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ จาก BORING LOG โดยช่วงที่ศึกษามีทั้งหมด 5 หลุมเจาะ ตั้งแต่ BH 0+000.00 ถึง BH 3+280.00
- 2) ข้อมูลค่าทรุดตัวของผิวดิน (Ground Surface Settlement) เป็นข้อมูลการตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดินในสนามโดยอาศัย Settlement Point และ Settlement Marker
- 3) ข้อมูลค่าควบคุมหัวเจาะในการขุดเจาะดิน เป็นข้อมูลที่แสดงถึงปัจจัยต่างๆ ในการควบคุมการทำงานของหัวเจาะ (TBM Operation) ซึ่งรวมถึงการทำ Back Fill Grouting ด้วย
- 4) ข้อมูลคุณสมบัติ วิธีการใช้งาน ของโฟมและเบนโทไนท์ ,พฤติกรรมของหัวเจาะระบบ EPBs เมื่อมีการใช้สารผสมเพิ่ม และ กรณีศึกษาต่างๆที่เกี่ยวข้อง

จากข้อมูลต่างๆที่มีนำมาพิจารณาเพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินบริเวณหน้าหัวเจาะที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้สารผสมเพิ่ม และศึกษาความสัมพันธ์ของพฤติกรรมดินกับการเคลื่อนตัวของชั้นดิน

นำข้อมูลค่าทรุดตัวของผิวดินในสนามมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Finite Elements โดยใช้โปรแกรม Plaxis

1.4) ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้เข้าใจพฤติกรรมของดินเมื่อผสมกับ โฟม และ เบนโทไนท์ ได้ดีขึ้น
- 2) ทำให้เข้าใจพฤติกรรมของดินใน EPB Shields ได้ดีขึ้น และสามารถให้ Conditioning agents เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ EPB Shield ให้สูงขึ้นได้
- 3) ทำให้ทราบถึงผลของการใช้สารผสมเพิ่ม ที่มีต่อประสิทธิภาพของหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุล และ ต่อการเคลื่อนตัวของชั้นดิน
- 4) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ ลักษณะการเคลื่อนตัวของชั้นดินกับค่าควบคุมของ EPB Shield (TBM Records) ได้
- 5) ทำให้สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Plaxis ในการวิเคราะห์ และคาดคะเนการทรุดตัวของชั้นดินที่เกิดการขุดเจาะอุโมงค์ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การขุดเจาะอุโมงค์ในปัจจุบัน ถือว่าเป็นระบบสำคัญที่ใช้ในการพัฒนาประเทศ ซึ่งปัจจุบันยังมีปัญหาหลายอย่างที่ต้องศึกษาเพิ่มเติม และ แก้ไข โดยสิ่งที่เราต้อง คำนึงถึงมากที่สุด คือ ค่าทรุดตัวที่ผิวดิน ที่เกิดจากงานขุดเจาะอุโมงค์ ดังนั้น เพื่อให้งานขุดเจาะมีประสิทธิภาพสูง จึงจำเป็นต้องทราบถึงขั้นตอน พื้นฐานที่ใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ และวิธี ปรับปรุงคุณภาพการขุดเจาะที่มีการคิดค้นเพิ่มขึ้นมา

2.1) การขุดเจาะอุโมงค์โดยวิธี Shield Tunneling ในดินอ่อน (Shield Tunneling Method in Soft Ground)

2.1.1 ทั่วไป (General)

การขุดเจาะอุโมงค์โดยวิธี Shield Tunneling เริ่มต้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อนเพื่อลอดใต้แม่น้ำ โดยในปี ค.ศ. 1827 เริ่มมีการใช้เพื่อขุดเจาะอุโมงค์ลอดแม่น้ำ Thames ในลอนดอน โดยใช้เครื่องขุดเจาะที่พัฒนาโดย Mard I. Brunel และ J.H. Greathead ต่อมาได้มีการพัฒนาเทคนิคการขุดเจาะและค้ำยันด้านหน้าอุโมงค์ (Face Support) เป็นไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดเครื่องขุดเจาะชนิดต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการประสิทธิภาพการทำงานและสภาพลักษณะชั้นดิน

การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินอ่อน (Soft Ground Tunneling) สำหรับชุมชนเมืองได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบจากวิธี Cut-and-Cover ไปเป็นการขุดเจาะโดยวิธี Shield Tunneling เนื่องจากได้มีการคำนึงถึงผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมใกล้เคียงพื้นที่ก่อสร้าง Shield Tunneling เป็นการขุดเจาะโดยใช้ปลอกเหล็ก (Shield) ทรงกลมดันเข้าไปในดินในแนวแกนของอุโมงค์ในเวลาเดียวกันกับที่มีการขุดเจาะอุโมงค์ โดยที่ Shield จะทำหน้าที่เป็นค้ำยันชั่วคราวป้องกันการพังทลายของดินจากการขุดเจาะและกันน้ำไหลเข้าสู่อุโมงค์ จนกว่าจะมีการก่อสร้างค้ำยันถาวร (Permanent Support)

2.2) หลักการพื้นฐานของหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุล (Principle and Fundamental Characters of Earth Pressure Balanced Type Shield Method)

เครื่องขุดเจาะระบบแรงดันดินสมดุล (EPB Shield) ถูกคิดค้นขึ้นในประเทศญี่ปุ่นโดย Sato Kogyo Company เป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อให้การขุดเจาะอุโมงค์ประหยัดและมีประสิทธิภาพ สามารถทำงานได้ในดินอ่อนจนถึงทราย และกรวดที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน โดยหลีกเลี่ยงการใช้ Slurry

2.2.1 หลักการพื้นฐาน (The Principle of Earth Pressure Balance Type Shield)

หลักการพื้นฐานของเครื่องขุดเจาะประเภทแรงดันดินสมดุลคือ เป็นการเติมดินขุดผ่านเข้าสู่ Chamber และสร้างแรงดันด้วยการขับเคลื่อนเครื่องขุดเจาะ แรงดันที่เกิดขึ้นจะต้องเพียงพอเพื่อทำการค้ำยันดินด้านหน้าอุโมงค์ได้อย่างปลอดภัย ระหว่างที่หัวเจาะเคลื่อนที่ดินใน Chamber จะถูกอัดและเป็นตัวส่งผ่านแรงต้านทานไปสู่ดินด้านหน้าอุโมงค์ ซึ่งเป็นแรงลัพธ์มาจากแรงผลักของ Shield Jack กระจายผ่าน Bulk Head เข้าสู่มวลดินใน Chamber โดยทั่วไปแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับดินใน Chamber จะเรียกว่า “ Face Pressure ”

ในการรักษาเสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์โดยอาศัยแรงต้านจาก Face Pressure ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจะต้องทำการรักษาแรงดันนี้ตลอดเวลาขณะที่หัวเจาะเคลื่อนที่มีขุดเจาะดินด้วยการปรับอัตราเร็วตัวของ Hydraulic Jacks (Shield /Jacks Speed) และอัตราการลำเลียงดินออกจาก Chamber (Discharging Rate of Screw Conveyor) การเคลื่อนตัวของดินบริเวณหน้าอุโมงค์ผ่าน Chamber และลำเลียงออกโดยอาศัย Screw Conveyor จะต้องมีความราบรื่นเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

2.2.2 ลักษณะทั่วไปของหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุล (Fundamental Characters of Earth Pressure Balance Shield Type)

1) ดินขุดต้องมีสภาพเป็น Plastic Fluidity (Excavated Soil Has Plastic Fluidity)

ภายใต้วิธีการขุดนี้ ดินขุด (Excavated Soil) จะเคลื่อนตัวและถูกลำเลียงออกอย่างราบรื่นและต่อเนื่องผ่าน Screw Conveyor ในขณะที่ยังคงทำการรักษา Face Pressure ให้เพียงพอเพื่อทำการค้ำยันหน้าตัดดินขุดของอุโมงค์ ซึ่งการรักษาสมดุลระหว่างดินที่ถูกลำเลียงออก กับดินที่ไหลเข้าสู่ Chamber จะมีความสำคัญกับระบบเป็นอย่างมาก โดย Screw Conveyor จะทำหน้าที่ลำเลียงและปล่อยดินขุดออก (Discharged Soil) สู่อันหลังหัวเจาะเพื่อทำการขนส่งนำขึ้นสู่ผิวดินต่อไป และเนื่องมาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของ Screw Conveyor ที่น้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของดินขุดมาก ดังนั้นดินขุดจะต้องมีความเป็น Plastic Fluidity เพื่อให้สามารถผ่านเข้าสู่ทางเข้าเล็กๆ ของ Screw Conveyor ได้อย่างราบรื่น ในทางตรงกันข้าม เมื่อดินขุดใน Chamber ไม่อยู่ในสภาพ Plastic Fluidity การเคลื่อนตัวของดินจะไม่ราบรื่น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้น้ำใต้ดินไหลเข้าสู่ภายในอุโมงค์ ได้ ทำให้เกิด ความเสี่ยงต่อการพังทลายของดินด้านหน้าอุโมงค์

2) ดินขุดต้องมีความทึบน้ำ (Excavated Soil Having Impermeability property)

การควบคุมน้ำใต้ดินมีความสำคัญมากในระหว่างการดำเนินการขุดเจาะ ดินขุดทั้งที่อยู่ใน Chamber และใน Screw Conveyor จะต้องมีความทึบน้ำสามารถต้านทานแรงดันของน้ำใต้ดิน เพราะถ้าขาดคุณสมบัตินี้แล้วอาจจะทำให้เกิดการทะลักของน้ำใต้ดินผ่าน Chamber และ Screw Conveyor เข้าสู่ตัวอุโมงค์ เกิดความเสี่ยงต่อการพังทลายด้านหน้าอุโมงค์ และต่อให้เกิดปัญหาต่อการทำงาน

2.2.3 ประสิทธิภาพการขุดเจาะ

1) ประสิทธิภาพการขุดเจาะซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การควบคุมปริมาณดินขุดเจาะ (Effectiveness of tunnel boring controlled by Soil Excavation Volume)

ระหว่างเครื่องทำการขุดเจาะ ดินจะผ่านเข้าสู่ Chamber โดยจะถูกกดอัด เพื่อสร้างแรงดันในการรักษาเสถียรภาพหน้าตัดดินขุด และมีการเคลื่อนผ่าน Screw Conveyor เพื่อปล่อยดินออกด้านหลังเครื่อง กระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การควบคุมการขุดเจาะที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสามารถทำได้ด้วยการควบคุมปริมาณดินที่ขุดเจาะ (Excavated Soil) เท่ากับปริมาณดินที่ปล่อยออก ซึ่งถือได้ว่าเป็นหลักการพื้นฐานในการควบคุมประสิทธิภาพการขุดเจาะของเครื่องขุดเจาะแบบนี้

การตรวจวัดปริมาณดินด้วยวิธีที่ทันสมัยได้แก่ Belt Weighting Method (Endress & Hauser), Ultrasonic Method (Misubishi) และ Laser Method (Misubishi) ซึ่งวิธีการเหล่านี้มีความละเอียดถูกต้องมากทำให้การตรวจสอบปริมาณดินในขณะที่ทำการขุดเจาะที่เวลาใดๆ (Real Time) การควบคุมปริมาณดินขุดจึงอาศัยการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของเครื่องขุดเจาะ เพื่อให้ปริมาณดินขุดที่เข้ามาทางด้านหน้าสอดคล้องกับปริมาณดินที่ขนถ่ายออกจาก Screw Conveyor การตรวจสอบจะประเมินจากอัตราส่วนดินขุด ดังสมการที่ 2.1

$$R_E = \frac{V_E}{A_{CF} V_S} \times 100 \quad (2.1)$$

โดยที่	R_E	=	อัตราส่วนดินขุด (Soil Excavated Ratio)
	V_E	=	ปริมาตรดินขุดที่ขับออกจาก Screw Conveyor (m^3) ในหนึ่งหน่วยเวลา
	A_{CF}	=	พื้นที่หน้าตัดการขุดเจาะ (Cutter Face Area , m^2)
	V_S	=	ความเร็วของเครื่องขุดเจาะ (Shield Jack Speed , m/sec)

- เมื่อ $R_E = 100%$: การขุดเจาะอยู่ในการควบคุมที่ดี ดินด้านหน้าหัวเจาะจะไม่เกิดการเคลื่อนตัว
- $R_E > 100%$: การขุดเจาะมีปริมาณดินขุดมากเกินไป ดินด้านหน้าอุโมงค์ มีแนวโน้มพังทลายจำเป็นต้องลดปริมาณดินที่ขนถ่ายออก
- $R_E < 100%$: การขุดเจาะมีปริมาณดินขุดน้อยเกินไป ดินด้านหน้าอุโมงค์มีแนวโน้มเกิด Heave จำเป็นต้องขนถ่ายดินออกจาก Screw Conveyor ให้มากขึ้น

2) ประสิทธิภาพการขุดเจาะจะอาศัยการควบคุมแรงดันดินด้านหน้าหัวเจาะ (To Have Effective of Excavation by Face Pressure Control)

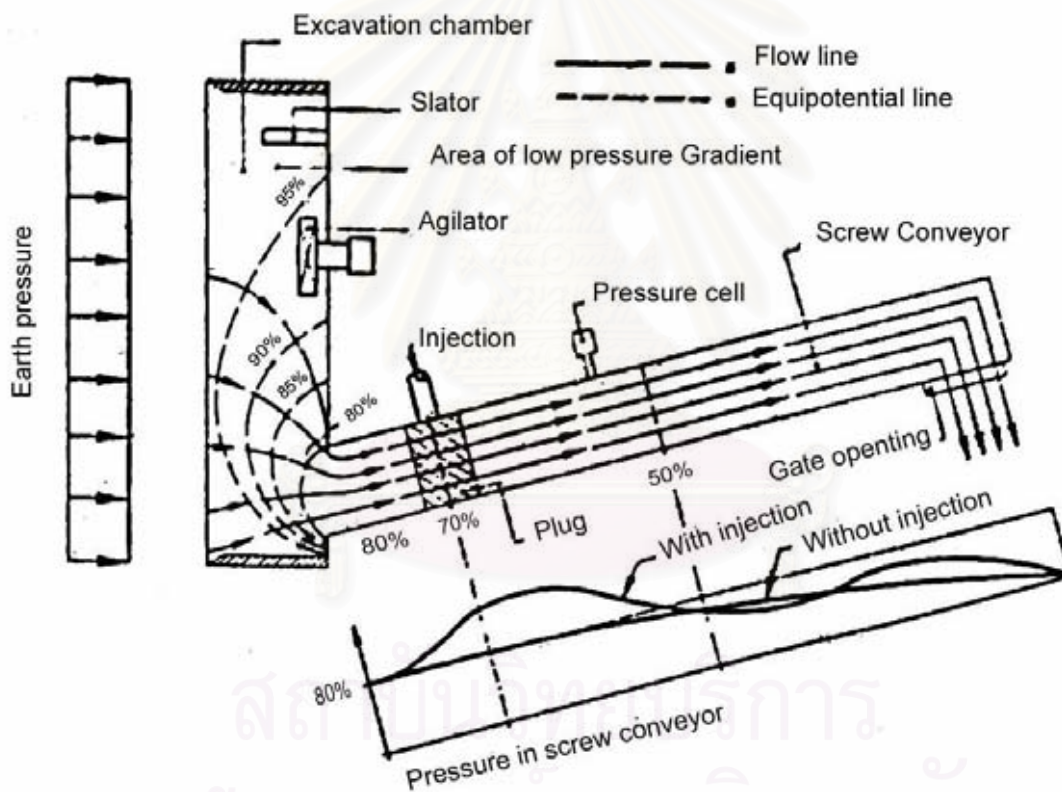
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุล (EPB Shield) เป็นวิธีการที่พยายามรักษาเสถียรภาพของหน้าตัดดินขุดโดยอาศัยแรงดัน (Face Pressure) ที่เพียงพอ เพื่อด้านทานแรงดันดินและแรงดันน้ำใต้ดินที่อยู่ด้านหน้าอุโมงค์ การรักษา Face Pressure ในระดับที่มากพอถือเป็นวิธีช่วยให้การขุดเจาะมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยทั่วไปแล้วระดับของ Face Pressure ที่ถือว่าจะไม่ส่งผลกระทบต่อชั้นดินเปลี่ยนแปลงไปมาก จะมีค่าดังสมการที่ 2.2

$$P_a + P_w < P_r < P_p + P_w \quad (2.2)$$

โดยที่	P_r	คือ	Face Pressure
	P_a	คือ	Active Earth Pressure
	P_p	คือ	Passive Earth Pressure
	P_w	คือ	Underground Water Pressure

ในกรณีที่ $P_r = P_r + P_w$ ($P_r =$ Earth Pressure at Rest) ชั้นดินจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือไม่เกิดการเคลื่อนตัว ในทางปฏิบัติ P_a และ P_p จะได้จากการคำนวณตามสภาพของชั้นดิน และ

กำหนดค่าใช้งานอยู่ในขอบเขตดังกล่าว โดยถือว่า $P_p + P_w$ เป็นขอบเขตบน (Upper Limit) และ $P_a + P_w$ เป็นขอบเขตล่าง (Lower Limit) การควบคุม Face Pressure สามารถทำได้โดยการปรับอัตราเร็วของหัวเจาะ (Shield Jack Speed) และ ความเร็วรอบของการหมุนของ Screw (Screw Conveyor Revolution Speed) ให้ค่า Face Pressure เป็นไปตามค่าที่กำหนดหรือคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (เกณฑ์ที่ยอมรับให้โดยทั่วไปคือ $\pm 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ หรือ $\pm 20 \text{ kN/m}^2$) Hagimoto และ Kashima (1985) ได้เสนอแนะวิธีการควบคุม Face Pressure ว่าควรจะต้องทำการตรวจสอบแรงดันที่เกิดขึ้นของ Discharge Soil เพิ่มเติมเข้าไปด้วย ซึ่งจะให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตลอดเส้นทาง การเคลื่อนตัวของดินชุด ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน แสดงในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะ การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ใน Soil Chamber และ Screw Conveyor

2.2.4 การปรับปรุงคุณสมบัติดินขุด (Kneading Mechanism and an injecting System of Mud-Making Agent)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าดินขุดควรมีสภาพเป็น Plastic Fluidity และมีความหนืด (Viscosity) ซึ่งในดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) จะมีคุณสมบัติเหล่านี้อยู่ แต่ในกรณีของชั้นทรายและกรวดคุณสมบัติของดินจะไม่อยู่ในลักษณะดังกล่าว ซึ่งส่งผลให้การเคลื่อนตัวจากผิวหน้าตัดไปจนกระทั่งถูกปล่อยออกจาก Screw Conveyor จะเป็นไปอย่างลำบาก เนื่องจากดินจะอยู่ในสภาพอัดแน่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินขุดให้มีสภาพเป็น Plastic Fluidity โดยการเติมวัสดุที่มีคุณสมบัติ Plastic เข้าไปผสมและทำการกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยใบพาย (Kneading Blade) ที่ติดตั้งอยู่ข้างใน Chamber ระบบการเติมสารผสมเพิ่ม (Mud-Making Agent Injecting System) จะถูกออกแบบให้มีจำนวนและตำแหน่งของท่อฉีดสอดคล้องกับสภาพของชั้นดิน, ขนาดของเครื่องเจาะ และอื่นๆ ใบพายจะถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากที่สุด

2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของ EPB Shield (Factors Influence on EPB Shield Performance)

1) สภาพชั้นดิน (Ground Condition)

Fugichi(1995) ได้กล่าวไว้ว่าหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุล (EPB Shield) มีความเหมาะสมในการขุดเจาะในชั้นดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) เมื่อขุดเจาะในชั้นทรายหรือดินที่ไหลด้วยยาก จะทำให้การทำงานของ Screw Conveyor เกิดปัญหาขึ้น ง่ายต่อการเกิดความผิดพลาดทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง ในการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเติมสารผสมเพิ่ม (Additive agent) เข้าสู่ Chamber ซึ่งจะช่วยให้ดินใน Chamber มีความเหลวที่พอเหมาะ และง่ายต่อการเคลื่อนตัวไปตาม Screw Conveyor ได้อย่างราบรื่น ประสิทธิภาพในการทำงานจึงเพิ่มขึ้นด้วย

Nishitake(1987) ได้กล่าวไว้ว่าในกรณีที่มีก้อนหินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ หรือร้อยละ 20 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องเจาะ เพื่อให้การขุดเจาะสามารถดำเนินงานต่อไปได้ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการบดอัดไว้ในบริเวณ Cutter Face เพื่อให้ก้อนหินแตกเป็นชิ้นเล็กก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ Chamber และพอที่จะผ่าน Screw Conveyor ออกไปได้

2) ความสามารถของเครื่องขุดเจาะ (Machine Capacity)

2.1) ส่วนการติดตั้งผนังอุโมงค์ (Provision of Support)

ก) การติดตั้งผนังอุโมงค์ (Erection of Lining) ในการติดตั้งชิ้นส่วน (Segments) เพื่อประกอบเป็นผนังอุโมงค์ จำเป็นจะต้องอาศัยเครื่องประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ (Segment Erector) ที่มีประสิทธิภาพในการทำงาน เพื่อลดเวลาในการติดตั้งและเพิ่มอัตราการทำงาน ระบบที่มีประสิทธิภาพสูงจะทำงานด้วยเครื่องจักรทั้งหมด นับตั้งแต่การจับยกขึ้นไปติดตั้งและการยึดด้วยสลักเกลียว (Bolts)

Parker et al(1971) ได้กล่าวว่า อัตราการทำงานของการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อนจะขึ้นอยู่กับอัตราการติดตั้งผนังอุโมงค์ โดยถ้าสามารถลดจำนวนต่อวงลงจาก 8 ชิ้น เป็น 6ชิ้นหรือ 4ชิ้น ได้จะทำให้ลดเวลาในการติดตั้งผนังอุโมงค์ลง อัตราการทำงานจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว

ข) การอุดช่องว่างรอบผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting) เป็นวิธีการป้องกันการทรุดตัวของชั้นดินให้มีค่าสูง ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานจะต้องอาศัยระบบการทำงานที่มีลักษณะพิเศษ เช่น สามารถที่จะ Grout ได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง (Simultaneous Grouting) แรงดันที่ใช้โดยทั่วไปจะสูงกว่าแรงดันใน Chamber (Face Pressure) เล็กน้อย และปริมาณที่ใช้จะมีค่าระหว่าง 150-200 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรช่องว่างรอบผนังอุโมงค์ (Tail Void)

2.2) การป้องกันการซึมเข้าสู่เครื่องเจาะ (Tail Seal)

Tail Seal เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องขุดเจาะประเภทต่างๆ เนื่องจากสามารถป้องกันการซึมของน้ำใต้ดินและการไหลทะลักของดินเข้าสู่หัวเจาะผ่านช่องว่าง (Clearance) ระหว่างผิวด้านนอกของผนังอุโมงค์ที่เพิ่งประกอบเสร็จกับผิวด้านในของ Shield บริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ Tail Seal เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุโมงค์ที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินมากๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 ผนังอุโมงค์ (Lining)

ผนังอุโมงค์โดยปกติจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ Primary Lining กับ Secondary Lining เป็นโครงสร้างค้ำยันรับแรงโดยตรงจากแรงภายนอกที่อยู่โดยรอบ การออกแบบและการก่อสร้างจะต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษเพื่อให้มีความแข็งแรงและคงทน

Hamamoto(1992) ได้เสนอแนะว่า แรงภายนอกที่กระทำกับอุโมงค์เกิดจากแรงดันและแรงดันน้ำ โดยแรงดังกล่าวจะกระทำกับ Primary Lining (Segments) ในลักษณะโดยรอบและจะมีการกระจายน้ำหนักเกิดแรงขึ้นระหว่าง Primary และ Secondary Lining

1) Primary Lining

Primary Lining จะก่อสร้างขึ้นบริเวณส่วนท้ายของ Shield โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นชิ้นส่วน (Segment) ปลายๆ ชิ้นตั้งแต่ 5 ถึง 7 ชิ้นใน 1 วง(Ring) มีความกว้าง 0.5 ถึง 1.2 เมตร ชิ้นส่วนผนังอุโมงค์จะทำขึ้นจากโรงงาน หลังจากนั้นจะทดสอบให้ได้มาตรฐานและลำเลียงมายังสถานที่ก่อสร้าง การประกอบจะยึดชิ้นส่วนต่างๆ เข้ากันด้วย Bolt โดย Primary Lining ชนิดต่างๆ ได้แก่

- Reinforce Concrete Segments

เป็นรูปแบบที่ใช้กันมานาน โดยปกติจะใช้ในอุโมงค์ขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 4-5 เมตร) จะประหยัดเมื่อขนาดของอุโมงค์มีขนาดใหญ่ขึ้น มีอายุการใช้งานนาน สามารถต้านทานการสึกกร่อน และทนความร้อนได้ดี แต่เนื่องจากน้ำหนักค่อนข้างมากรวมถึงรอยต่อค่อนข้างไม่แข็งแรง จึงมีแนวโน้มเกิดการเสียรูปค่อนข้างมาก

- Steel Segments

โดยทั่วไปจะใช้กับอุโมงค์ที่มีขนาดเล็กถึงขนาดกลาง ชิ้นส่วนต่างๆ จะถูกยึดเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมและยึดอีกครั้งด้วยแผ่นเหล็ก เนื่องจาก Steel Segments มีน้ำหนักค่อนข้างเบาจึงง่ายต่อการประกอบและขนย้าย เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น อาจทำให้มีราคาสูงกว่า Concrete Segments การต้านทานการสึกกร่อนไม่ดีเท่าที่ควร และมีปัญหา Strain และ Residual Stress จากการเชื่อม

- Composite Segments

Segments ชนิดนี้จะเป็นการประกอบขึ้นจากการนำแผ่นเหล็ก (Steel Plate)) ประกบทั้งสองด้านของ Reinforce Concrete Segments และยึดเข้าด้วยกัน ด้วยเหล็กฉาก เพื่อให้เกิดการถ่ายแรงระหว่างผิวหน้าของชิ้นส่วน 2 ด้าน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ Concrete Segments แล้วจะมีความแข็งแรง

กว่าและทำให้ความหนาของอุโมงค์ลดลง แต่จะมีปัญหาจากการสึกกร่อน และรอยต่อที่ไม่ค่อยแข็งแรงนัก ซึ่งจะเป็นลักษณะของ สลักเกลียว (Bolt)

2) Secondary Lining

Secondary Lining เป็นโครงสร้างที่เสริมเข้าไป โดยจะอยู่ด้านในของ Primary Lining โครงสร้างของผนังอุโมงค์จะมีได้ทั้งที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก(ทั้งหล่อในที่และที่หล่อสำเร็จ) หรือท่อเหล็ก ประโยชน์คือทำให้ผิวด้านในของอุโมงค์เรียบขึ้น ป้องกันน้ำและการสึกกร่อน และต้านทานแรงเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในอนาคต ความหนาขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการออกแบบ ความสามารถทำงานได้ (Workability) ถ้าเป็นคอนกรีตจะหนาประมาณ 15 ถึง 30 เซนติเมตร ในกรณีที่เป็นท่อสำเร็จการติดตั้งจะทำการดันให้เลื่อนเข้าไปในอุโมงค์

2.4) การอุดช่องว่างรอบผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting)

Backfill Grouting เป็นวิธีการเติมวัสดุเข้าไปในช่องว่างรอบผนังอุโมงค์หลังหัวเจาะ (Tail Void) ที่เกิดขึ้นระหว่าง Segments กับดินที่อยู่โดยรอบ ซึ่งเป็นการป้องกันการเกิด Loosening ของดิน และลดการทรุดตัวของดิน นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันการไหลซึมของน้ำเข้าสู่อุโมงค์ได้อีกด้วย วัสดุที่นำมาใช้ในงานมีข้อกำหนดหลายอย่าง เช่น ไม่เกิดการแยกตัว, มีความสามารถทำงานได้ดี, เกิดการหดตัวน้อย, กำลังเพิ่มขึ้นเร็วและมีค่ามากกว่าดินและเป็นวัสดุที่บดน้ำป้องกันการไหลของน้ำได้

รูปแบบการทำงานมี 2 แบบ คือแบบไม่ต่อเนื่อง (Seperate Grouting Method) และแบบต่อเนื่อง (Simultaneous Grouting Method)ตามการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ แบบแรกเป็นการอัดวัสดุด้วยแรงดันไปตามท่อผ่านรูที่เตรียมไว้ใน Segment (Grout Hole) ของ Ring ท้ายสุดที่เคลื่อนที่ออกจากหัวเจาะ สำหรับแบบต่อเนื่องวัสดุจะถูกยิงออกจากอุปกรณ์ที่อยู่ในส่วนท้ายของ Shield ตลอดเวลาที่มีการเคลื่อนที่ โดยพบว่า แบบต่อเนื่องสามารถทำให้ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินลดได้เป็นอย่างมากเนื่องมาจากค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground Loss)ลดลง

โดยปกติแรงดันที่ใช้ในการอุดช่องว่างรอบผนังอุโมงค์(Grouting Pressure) มีค่าประมาณ 1 ถึง 3 kg-f/cm² (ที่ Grout Hole) แรงดันนี้จะทำการพิจารณาตามความเหมาะสมกับแรงดันน้ำที่อยู่โดยรอบ, แรงดันของ Slurry(กรณีที่ใช้การเจาะแบบ Slurry) กำลังของ Segmentและอื่นๆ อัตราการเติมเต็ม (Grout filling Ratio)จะใช้ ประมาณ 150 % ถึง 200% ของปริมาตร ช่องว่างที่ประมาณไว้ ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามากเกินไป จะทำให้เกิดการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายนํ้ามากเกินไปในดินเหนียวอ่อน ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมเป็นอย่างดี

2.5) การเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Ground Movement Due to Tunneling)

2.5.1) ทั่วไป (General)

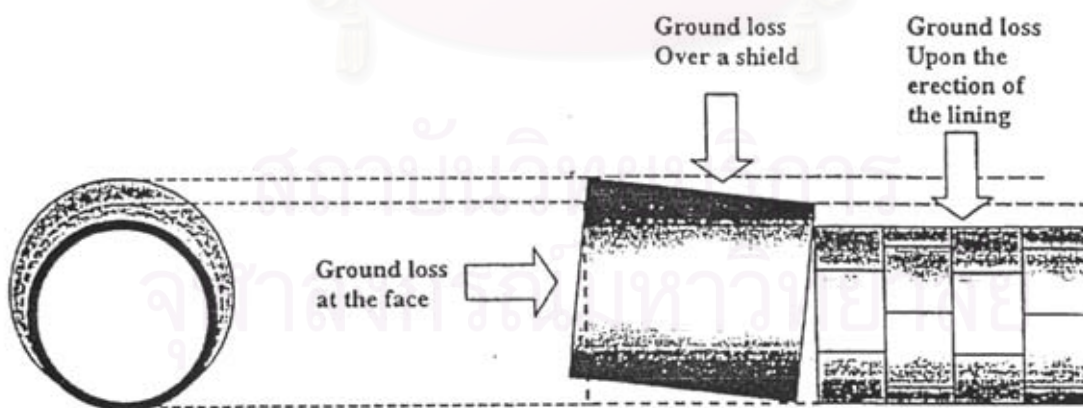
การสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน โดยทั่วไปจะส่งผลให้ดินรอบอุโมงค์เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของ Stress และ Strain ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเคลื่อนตัวของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทรุดตัวของดิน จะต้องมีการควบคุมและตรวจสอบอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด เพื่อป้องกันผลกระทบที่จะเกิดกับ สิ่งก่อสร้างที่อยู่ใกล้เคียง

Peck(1969) ได้แนะนำว่าการออกแบบผู้่ออกแบบจะต้องพิจารณาการสูญเสียมวลดินและ คาคณะเนการทรุดตัวของดินด้วยวิธีการที่เหมาะสม โดยจะต้องพิจารณาถึงชั้นดิน ระดับน้ำใต้ดิน รูปร่าง และความลึกของอุโมงค์ นอกจากนี้ควรพิจารณาถึงการทรุดตัวที่เกิดจากความคลาดเคลื่อน หรือความผิดพลาดจากการปฏิบัติงาน เพิ่มเข้าไปด้วย

การประเมินปัญหาสามารถประเมินได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ หนึ่ง เป็นขั้นตอนที่ถือว่ายากที่สุด คือ การคาดคะเนการสูญเสียมวลดิน (Ground Loss) ที่เกิดระหว่างการขุดเจาะ และการก่อสร้าง อุโมงค์ ขั้นตอนที่สอง เป็นการคาดคะเนการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบ ที่เกิดจากการสูญเสียมวลดิน และ ขั้นตอนที่สาม เป็นการประเมินความเสียหาย และ ความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นกับโครงสร้าง ใกล้เคียง อันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของมวลดิน

2.5.2) การพิจารณาค่า Ground Loss เนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์

การพิจารณา Ground Loss แบ่งได้ 3 ลักษณะ แสดงดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะ Ground Loss ที่เกิดขึ้นกับหัวเจาะชนิด EPB (Lee,K.M.et al , 1992)

1) Ground Loss ที่ด้านหน้าหัวเจาะอุโมงค์

Ground Loss นี้จะเกิดขึ้นทันที ยากที่จะควบคุมการทะลักของดินเข้ามาเนื่องจากดินถูกเปลี่ยนสภาพให้เป็น Plastic เพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถลำเลียงผ่าน Screw Conveyor ได้ การเปลี่ยนแปลงของ in situ stress ที่ด้านหน้าหัวเจาะเป็นผลจากการขุดเจาะเอาดินที่ด้านหน้าหัวเจาะออก ซึ่งปริมาณดินขุดจะเท่ากับปริมาณของ Ground Loss สำหรับกรณีที่มีการเคลื่อนตัวของดินเข้ามาทางด้านหน้าอุโมงค์ด้วยอัตราเร็วคงที่ การสูญเสียมวลดินจะเป็นฟังก์ชันของการขุดเจาะอุโมงค์ (Rate of Advance of the Tunnel) และอัตราการไหลของดิน (Rate of Extrusion of the Soil) โดยเปอร์เซ็นต์ Ground Loss สามารถคำนวณได้จากสมการ ที่ 2.3

$$\% V_L = \frac{(\pi R^2)(\text{Average Extrusion Rate at Face})}{(\text{Average Rate of Advance})} \quad (2.3)$$

$\% V_L$ คือ ร้อยละการสูญเสียมวลดินต่อปริมาตรดินขุด (Percent Ground loss)

2 Ground Loss เหนือหัวเจาะอุโมงค์

ค่า Ground Loss ที่เกิดขึ้นเหนือหัวเจาะอุโมงค์จะเท่ากับปริมาตรของดินที่ถูกขุดออก เมื่อส่วนหัวเจาะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าทำให้เกิดช่องว่างเพิ่มขึ้นที่บริเวณเหนือหัวเจาะ ซึ่งสาเหตุมาจากปัญหาการเบี่ยงเบนระหว่างแนวอุโมงค์ที่ออกแบบไว้ (Design Grade) กับแนวอุโมงค์ที่ขุดเจาะจริง (Actual Grade) โดยทางปฏิบัตินั้นผู้ควบคุมเครื่องขุดเจาะจะควบคุมให้เครื่องขุดเจาะทำมุมเงยขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแนวอุโมงค์ที่ออกแบบไว้ (Pitching Angle) เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงหัวเจาะจมลงเนื่องจากน้ำหนักของหัวเจาะเอง ในการขุดเจาะทางตรง โดยมุมที่เพิ่มขึ้น (Excess Pitch) ของการขุดเจาะจะทำให้เกิด Overcutting ของดินบริเวณตำแหน่งด้านบนของอุโมงค์ (Tunnel Crown)

ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่า Ground Loss ได้ โดยสมมุติให้บริเวณที่อยู่ตำแหน่งด้านบนของอุโมงค์ (Tunnel Crown) เหนือตำแหน่งด้านข้างของอุโมงค์ (Spring Line) ตลอดความยาวความยาวของหัวเจาะคูณกับมุมที่เพิ่มขึ้นของหัวเจาะบนแนวอุโมงค์ที่ขุดเจาะจริงโดย Lee et al. ได้เสนอ สมการดังแสดงในสมการที่ 2.4

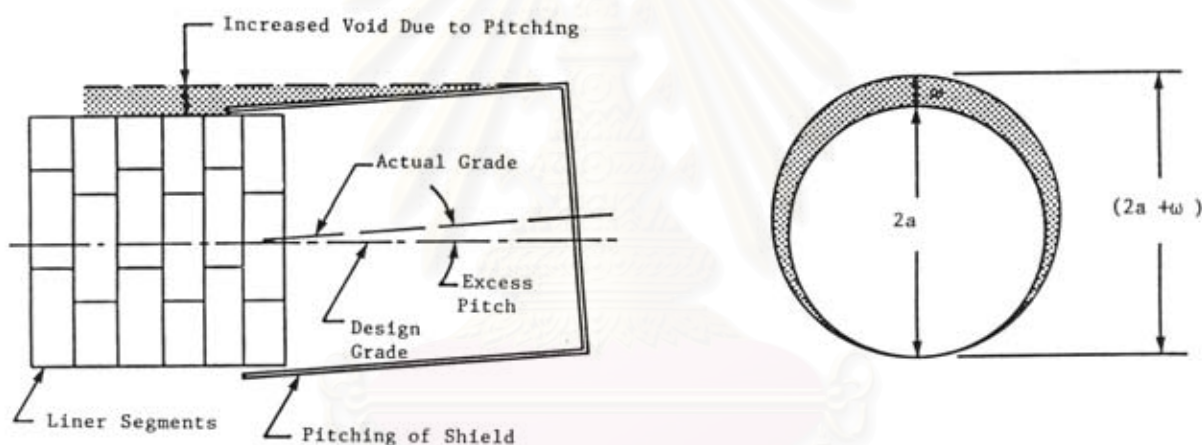
$$\begin{aligned}
 V_{\text{shield}} &= \frac{2\pi a l}{2} \times (\text{excess pitch}) \\
 &= \pi \left[\left(a + \frac{\omega}{2} \right)^2 - a^2 \right] \tag{2.4}
 \end{aligned}$$

เมื่อ V_{Shield} = ปริมาตรของ Overexcavation ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของการขุดเจาะ

a = รัศมีภายในของอุโมงค์

L = ความยาวของหัวเจาะ

ω = workmanship parameter = $L \times (\text{excess pitch})$



รูปที่ 2.3 แสดง Ground Loss เนื่อง หัวเจาะอุโมงค์เนื่องจาก Over Cutting (Lee, K .M.et al ,1992)

a) Tunnelling Head : Grund Loss due to Pitching of Tunnel Shield : $V_{\text{shield}} = \pi(aL)$

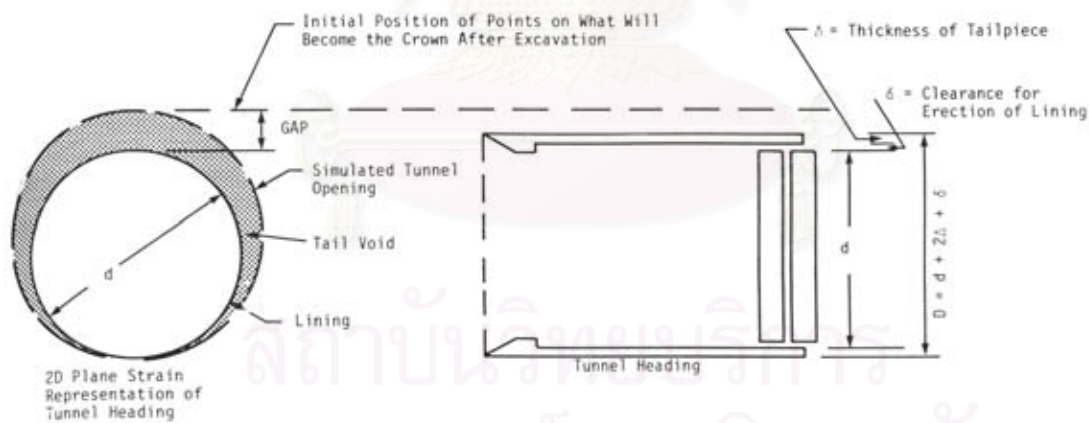
b) Equivalent transverse Section : $V_{\text{shield}} = \pi \{ [a + (\omega / 2)]^2 - a^2 \}$

ซึ่งในกรณีการขุดเจาะอุโมงค์ในทางโค้ง การเกิด Ground loss จะเกิดขึ้น เนื่องจากการเพื่อมุม การเลี้ยวด้านข้าง (Outside Curve) ซึ่งจะเกิดช่องว่างด้านข้างด้วย

3) Ground Loss ในระหว่างการติดตั้งผนังอุโมงค์

ค่า Ground Loss เกิดขึ้นเนื่องจากผนังอุโมงค์ไม่ได้แทนที่พื้นที่ที่หน้าตัดทั้งหมดจากการขุดเจาะด้านท้ายของหัวเจาะ ในระหว่างการติดตั้งผนังอุโมงค์จะมีระยะห่าง (Clearance) ค่าหนึ่งจากผิวด้านในของหัวเจาะ เพื่อให้สามารถติดตั้งอุโมงค์ได้เมื่อหัวเจาะเคลื่อนที่ไปด้านหน้า ดินที่อยู่ด้านบนหัวเจาะจะเคลื่อนที่เข้าไปในช่องว่าง (Tail Voids) บริเวณด้านท้ายหัวเจาะที่เกิดจากความหนาของผนังหัวเจาะด้านบน (Thickness of Tailpiece) รวมกับระยะห่างจากผิวด้านในของหัวเจาะกับผนังอุโมงค์ (Clearance for Erection of Lining) ดังนั้นขนาดของ Tail Voids จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการทรุดตัวทั้งหมด

ค่า Ground Loss นี้สามารถทำให้น้อยลงได้โดยการอัดฉีดน้ำปูนเพื่อเข้าไปเติมในช่องว่างในระหว่างการติดตั้งผนังอุโมงค์ก่อนที่ดินด้านบนจะเข้าไปแทนที่ Tail Voids ซึ่งประสิทธิภาพของการอัดน้ำปูนจะขึ้นอยู่กับอัตราการเคลื่อนตัวของดินในช่องว่างนี้ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ในดินทรายการเคลื่อนตัวของดินจะเร็วมาก ในขณะที่ดินเหนียวแข็งการเคลื่อนตัวจะช้า และยังมีการเสียรูปของผนังอุโมงค์ที่เกิดจากแรงดันดินรอบอุโมงค์ไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (Lateral Earth Pressure) แต่การแอ่นตัวนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ Ground Loss ชนิดอื่น

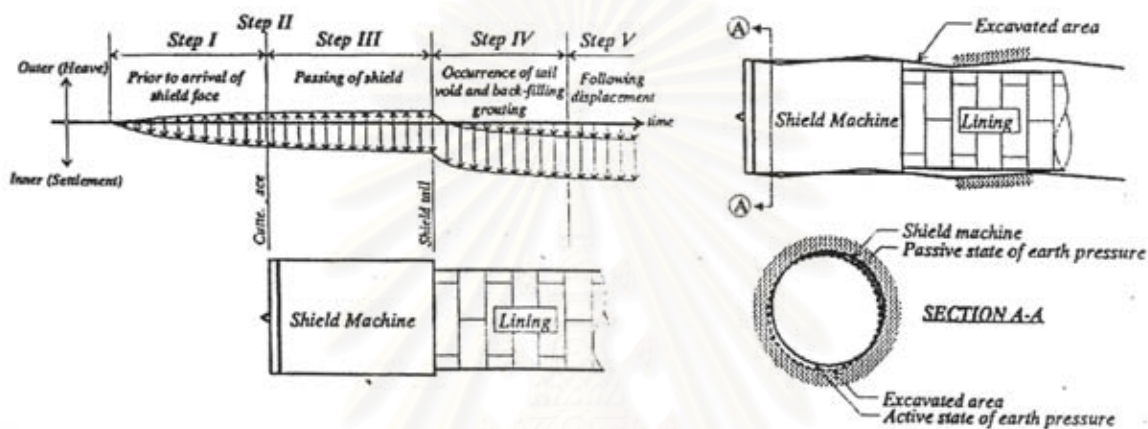


รูปที่ 2.4 แสดง Ground Loss ที่เกิดเนื่องจาก Tail Void (Lee, K .M.et al ,1992)

2.6) การจำแนกการทรุดตัวของผิวดิน (Classification of Ground Surface Settlement)

การทรุดตัวของผิวดินแบ่งออกเป็น 2 อย่างคือ การทรุดตัวตามแนวยาว และ การทรุดตัวตามแนวขวาง

2.6.1) การทรุดตัวตามแนวยาว (Longitudinal Section)



รูปที่ 2.5 แสดงการทรุดตัวตามแนวยาว (A. Sramoon and Sugimoto , 1999)

การทรุดตัวตามแนวยาวสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน คือ

1) Initial Settlement (S1) คือ การทรุดตัวก่อนที่หัวเจาะจะเคลื่อนที่ผ่าน เป็นการทรุดตัวหรือเกิด Heave ก่อนที่หัวเจาะจะเคลื่อนที่มาถึง ซึ่งมีสาเหตุมาจาก Ground Loss ด้านหน้าอุโมงค์ อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลระหว่างแรงดันดิน (Earth Pressure) ที่อยู่ด้านหน้าหัวเจาะ กับแรงดันส่วนหน้าของหัวเจาะ (Face Pressure) นอกจากนี้ในดินที่มีความเชื่อมแน่นยังสามารถเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรดินเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำเมื่อ Face Pressure มีค่าสูงกว่า At Rest Earth Pressure ของดินที่อยู่ด้านหน้าอุโมงค์

2) Shield Passing Settlement (S2) คือ การทรุดตัวระหว่างหัวเจาะเคลื่อนที่ผ่าน เป็นค่าทรุดตัวที่เกิดขึ้นในขณะที่หัวเจาะกำลังเคลื่อนที่ผ่านจากตำแหน่งด้านหน้าหัวเจาะ (Shield Face) ถึงด้านท้ายของหัวเจาะ (Shield Tail) ซึ่งค่าทรุดตัวนี้เกิดจากโครงสร้างดินถูกรบกวนขณะที่หัวเจาะเคลื่อนที่ผ่าน โดยเฉพาะ Friction และ Shear ระหว่างผิวด้านนอกของหัวเจาะกับดินที่อยู่รอบๆ ทำให้สูญเสีย

กำลังและลดค่า Modulus ของดินและยังเกิดจาก Ground Loss ที่เกิดขึ้นรอบหัวเจาะอันเนื่องมาจาก Over-Cutting และการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นทาง

3) Tail Settlement (S3) คือ การเคลื่อนตัวหลังจากที่หัวเจาะเคลื่อนที่ผ่าน เป็นการทรุดตัวหลังจากที่ส่วนท้ายของหัวเจาะเคลื่อนที่ผ่าน โดยมีสาเหตุมาจาก Ground Loss เนื่องจากช่องว่างที่อยู่รอบผนังอุโมงค์ ซึ่งไม่สามารถทำการ Grouting ได้ทันทีหลังจากเกิดช่องว่างขึ้น, การใช้แรงดันและปริมาตรในการ Grouting ที่ต่ำเกินไป และการเสียรูปของ Segment

4) Long Term Settlement (S4) คือ การทรุดตัวที่ตามมา เป็นการทรุดตัวในระยะยาวหลังจากที่หัวเจาะเคลื่อนที่ผ่านไปและอัดฉีดน้ำปูนเสร็จแล้ว ดินที่ด้านท้ายหัวเจาะจะเกิด Relaxation และทรุดตัวลงเรื่อยๆ เนื่องจากโครงสร้างดินถูกรบกวน กำลังของดินลดลง ต่อมาจะเกิด Consolidation และ Creep ซึ่งใช้เวลานาน

โดยการทรุดตัวตามแนวยาวทั้ง 4 ช่วง ช่วงที่มีค่าทรุดตัวที่ผิวดินมากที่สุดคือ ช่วงที่ 3 ช่วง Tail Settlement ซึ่งเมื่อดูจากค่าทรุดตัวที่ผิวดินของโครงการ MRTA ซึ่ง กิรติ เมืองแสน (2544) ได้ทำไว้ ค่า S1 มีค่าประมาณ 2-10 mm ส่วนค่า S2 ประมาณ 5 mm และค่า S3 ซึ่งสูงสุด ประมาณ 15- 20 mm ส่วนค่า S4 ไม่ได้มีการเก็บข้อมูล

2.6.2) การทรุดตัวตามแนวขวาง (Transverse Section)

การทรุดตัวตามแนวขวางเกิดขึ้นด้วยสาเหตุเดียวกันกับการทรุดตัวตามแนวยาวของอุโมงค์ โดยปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินเหนืออุโมงค์ สามารถแสดงได้ด้วย Error Function หรือ Probability Curve โดยนิยามปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ระยะใดๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.5

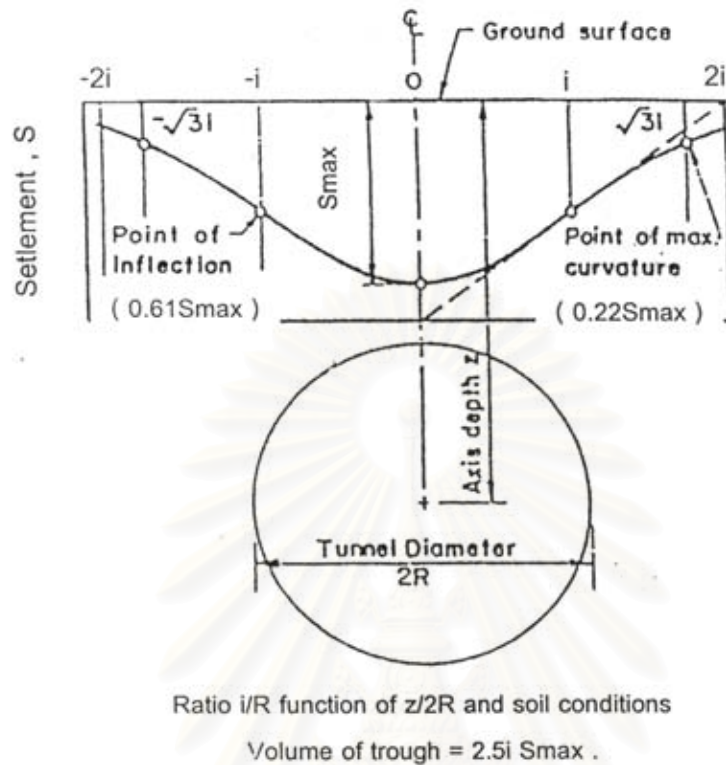
$$S = S_{\text{Max}} \exp(-x^2 / 2 i^2) \quad (2.5)$$

เมื่อ S คือ ปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดิน ที่ระยะใดๆ จากจุดศูนย์กลางของแนวอุโมงค์

S_{Max} คือ ปริมาณการทรุดตัวมากที่สุดที่ศูนย์กลางของอุโมงค์

x คือ ระยะตามขวางในแนวราบจากศูนย์กลางของอุโมงค์

i คือ ระยะจากกึ่งกลางของแนวอุโมงค์ถึงจุดเปลี่ยนความโค้ง (inflexion)



รูปที่ 2.6 แสดงการทรุดตัวที่ผิวดินตามแนวขวางเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Peck, 1969)

2.7) การควบคุมการเคลื่อนตัวของดินในการขุดเจาะอุโมงค์ (Controlling Ground Movements in Tunnel)

การควบคุมการเคลื่อนตัวของดินจะพิจารณาตามสาเหตุการสูญเสียมวลดิน และการจะเลือกวิธีการนำมาใช้จะต้องพิจารณาถึงลักษณะของชั้นดินด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลดการสูญเสียมวลดินมีดังนี้

- ควบคุมเสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์ตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะที่หัวเจาะเคลื่อนที่
- เลือกใช้เครื่องขุดเจาะที่มีขนาดเหมาะสม(อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง) เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมทิศทางและลดผลของ Pitching และ Yawing ในกรณีที่เครื่องขุดเจาะที่มีลักษณะยาวอาจต้องมี Articulation Joint เพื่อให้สามารถโค้งงอตัวได้

- ควบคุมการประกอบผนังอุโมงค์เพื่อควบคุมขนาดของ Tail Void และ ควบคุมการทำ Grouting ให้มีประสิทธิภาพด้วยการควบคุมแรงดันและปริมาณอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดโดยต้องใช้เวลาให้น้อยที่สุด และจัดให้มีระบบ Tail Seal ที่ได้มาตรฐาน

2.8) เสถียรภาพทางด้านหน้าอุโมงค์ (Stability of tunnel face)

เสถียรภาพด้านหน้าของอุโมงค์ระหว่างการขุดเจาะเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขุดในเฉพาะดินอ่อน(Soft Ground Tunneling) ซึ่งจะมีผลต่อการก่อสร้างและเป็นปัจจัยหลักต่อการออกแบบและก่อสร้างผนังอุโมงค์ (Tunnel Lining) เสถียรภาพด้านหน้ามีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง ได้แก่ กำลังของดิน (Shear Strength) และลักษณะความเค้น-ความเครียด(Stress-Strain Characteristics) ของดิน, ความลึก (Overburden Pressure) , ลักษณะของอุโมงค์(The Geometry of The Tunnel), การสูญเสียกำลังและการสูญเสียรูปที่ขึ้นกับเวลา (The Time-Dependent Loss of Strength and The Delayed Deformation) และรูปแบบการก่อสร้าง (Construction Procedures) การศึกษาในปัญหานี้ได้มีการนำเสนอโดย Deere et al(1969) โดยได้รวบรวมไว้ดังนี้

2.8.1) เสถียรภาพในดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น(Stability in Cohesionless Material)

เสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์ในวัสดุที่ไม่มีความเชื่อมแน่น เช่น ดินตะกอน (Uncemented Silt) ททรายและ กรวด จำเป็นต้องมีการคำนึงถึงผลกระทบจากสภาพน้ำใต้ดินและวิธีการก่อสร้าง

ในกรณีที่อุโมงค์ก่อสร้างเหนือระดับน้ำใต้ดินวัสดุเหล่านี้โดยปกติแล้วจะไม่สามารถคงตัวอยู่ได้เนื่องจากขาดแรงยึดเหนี่ยว (Lack of Cohesion Force) จะมีการคลายตัวออกจากจนกระทั่งเสถียรภาพความลาดชันด้วยมุมที่เท่ากับความลาดชันในสภาวะหลวม (Loose State) การคลายตัวของดินหน้าอุโมงค์สามารถก่อให้เกิดปัญหาอย่างมากได้ ถ้าไม่มีการนำวิธีการก่อสร้างที่สามารถตรวจวัดเพื่อควบคุมปริมาณดินขุดเจาะ

ในกรณีที่การขุดเจาะอุโมงค์ อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน เสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์จะมีผลอย่างมากจากแรงดันน้ำ (Seepage force) ที่พยายามจะไหลเข้าด้านหน้าอุโมงค์โดยทั่วไปแล้วในสภาวะนี้จะต้องนำวิธีการก่อสร้างที่ช่วยรักษาเสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์ไว้เข้ามาช่วย เช่น ใช้หัวเจาะแบบ Compress Air , การเติม Conditioning agent หรือ การทำ Grouting ที่ด้านหน้าอุโมงค์เป็นต้น

2.8.2) เสถียรภาพในดินที่มีความเชื่อมแน่น (Stability in Cohesive Materials)

เสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์ในดินที่มีความเชื่อมแน่น โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Stress ที่อยู่รอบอุโมงค์เปรียบเทียบกับกำลังของดิน ถ้า Stress ที่เกิดขึ้นมีค่ามากเกินไปดินเหนียวที่อยู่บริเวณด้านหน้าจะ Yield ส่งผลให้เกิด Plastic Deformation เนื่องจากดินเหนียวเป็นดินที่มีความซึมผ่านต่ำ (Low Permeability) ดังนั้นกำลังที่ใช้ในการพิจารณาจึงเป็น Undrain Shear Strength (S_u)

ในการศึกษาแบบจำลองเพื่อประเมินเสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์ ได้มีการนำเสนอ โดย Broms และ Bennemark(1967) ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$\frac{\gamma Z}{S_u} \leq \frac{2}{[1+(1/6)(B/Z)]} \quad (2.6)$$

โดยที่	B	คือ	ความกว้างของอุโมงค์
	Z	คือ	ความลึกของดินถึงกึ่งกลางอุโมงค์
	S_u	คือ	Undrained Shear Strength
	γ	คือ	หน่วยน้ำหนักของดิน

สำหรับอุโมงค์ที่อยู่ลึก จะทำให้ความกว้าง B มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความลึก Z ดังนั้น สมการข้างบน ซึ่ง อาจประมาณได้ว่า

$$\frac{\gamma Z}{S_u} \leq 6$$

ถ้าค่าของ Z/B น้อยกว่า 2 การพังทลายของดินหน้าอุโมงค์(ในแนวตั้ง) จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{\gamma}{S_u} \leq \frac{2(Z/B) - 1}{1+(1/6)(B/Z)}$$

ในกรณีที่กำลังของดินไม่เพียงพอ แรงค้ำยัน (Air Pressure , p_a) สามารถที่จะนำมาเพิ่มเสถียรภาพด้านหน้าได้ ในกรณีนี้เสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์แทนด้วยสมการ

$$\frac{\gamma Z - p_a}{S_u} \leq 6$$

ความสัมพัทธ์ของสมการข้างต้นและตัวเลขที่คำนวณได้ มักจะถูกเรียกว่า Stability Factor, N_f Deere et al(1969) ได้อธิบายความพฤติกรรมจากความสัมพัทธ์ดังกล่าวโดยได้รวบรวมไว้ดังนี้

- ถ้า $\gamma Z / S_u \leq 2$ ถึง 3 การเคลื่อนตัวของดินหน้าอุโมงค์จะเกิดขึ้นน้อย และอยู่ในสภาพ Elastic
- ถ้า $3 \leq \gamma Z / S_u \leq 6$ การเคลื่อนตัวของดินจะอยู่ในช่วง Plastic การเคลื่อนตัวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอัตราส่วนของ $\gamma Z / S_u$ ที่เพิ่มขึ้น
- ถ้า $\gamma Z / S_u \geq 6$ เสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์ จะอยู่ในสภาพ วิกฤติเสี่ยงต่อการเกิด พังทลาย (Failure)

Peck (1969) รวบรวมความสัมพัทธ์ระหว่าง Stability Factor และพฤติกรรมของดินเหนียวโดยได้จากการศึกษาอุโมงค์ในอดีต พบว่าเมื่อค่า N_f มีค่าเท่ากับ 7 อาจส่งผลให้หัวเจาะ (Shield) ไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากหัวเจาะจะเกิดการเอียงในระหว่างการขุดเจาะ ในทันทีทันใดที่ดินถูกขุดออกแรงดันน้ำติดลบ (Negative Pore Pressure) จะเกิดขึ้นและถ้าดินยังคงอยู่ในสภาพนี้ แรงดันน้ำในช่องว่างจะ Dissipate ออกไป เป็นผลให้กำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) มีค่าลดลง ดังนั้นถ้าขุดเจาะดินในอัตราต่ำ ควรที่จะควบคุม N_f ให้มีค่าต่ำด้วย

การที่ N_f มีค่าสูงจะมีผลทำให้ดินด้านหน้าและรอบๆอุโมงค์จะเกิดการเคลื่อนตัวสูง ซึ่งเป็นผลก่อให้เกิดการทรุดตัวของดินและการเสีรูปร่างของอุโมงค์ (Limning) จากเหตุผลดังกล่าวจึงจำเป็นต้องรักษาหรือควบคุมให้ค่า N_f มีค่าต่ำกว่า 5 หรือ 4 การทดสอบหาค่า Undrain Shear Strength เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาเสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์ ควรที่จะมีการทดสอบโดยแปรเปลี่ยนแรงดันรอบข้าง (Confining Pressure) ให้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับเวลา

2.8.3) เสถียรภาพของดินหลายชนิด (Stability in Mixed Materials)

บ่อยครั้งที่มักพบว่าดินด้านหน้าอุโมงค์จะประกอบด้วยดินหลายชั้นหรือมากกว่า 1 ชนิด เสถียรภาพหน้าอุโมงค์อาจประเมินได้โดยการวิเคราะห์ในแต่ละชนิดแยกอิสระต่อกัน อย่างไรก็ตาม ปัญหาส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับชั้นดินเม็ดหยาบ (Granular Materials หรือ Cohesionless Soils) ที่อยู่ใต้ระดับน้ำ (Water Table) ซึ่งจำเป็นต้องหาวิธีป้องกัน และเมื่อความลึกของอุโมงค์มีค่าต่ำ หัวเจาะที่มีค้ำยันด้านหน้า เช่น Compress Air หรือ Earth Pressure Balance สามารถที่จะรักษาเสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์ไว้ได้

2.9) การปรับปรุงคุณสมบัติดินในงานอุโมงค์ (Soil Conditioning in Tunnelling)

ปัจจุบันงานขุดเจาะอุโมงค์เป็นที่นิยมและใช้กันแพร่หลายทั่วโลก ทำให้มีการวิจัยต่างๆมากมายที่จะนำมาพัฒนางานขุดเจาะอุโมงค์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น หนึ่งในนั้นก็คือ การใช้สารผสมเพิ่ม (Conditioning Agents หรือ Additive) กับหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุล (EPBs) ซึ่งปัจจุบันเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่าหัวเจาะแบบอื่นในหลายๆด้าน

2.9.1) จุดประสงค์ของการปรับปรุงคุณสมบัติดิน (Soil conditioning Objectives)

Milligan(2000)แนะนำว่า เราสามารถทำให้ประสิทธิภาพของการขุดเจาะอุโมงค์สูงขึ้นได้ โดยการใช้สารผสมเพิ่ม ผลลัพธ์ที่ได้คือ

- การลดลงของแรงเสียดทานที่บริเวณผิวหน้าหัวเจาะ (Machine Cutter Head) และทุกส่วนของระบบขนถ่ายดินออก (Muck Removal System)
- การเพิ่มเสถียรภาพด้านหน้าของอุโมงค์ (Face Stability) และสามารถควบคุมการทรุดตัวของดินได้ดีขึ้น
- การเพิ่มประสิทธิภาพการไหลผ่านหัวเจาะของดินขุด
- การลดลงของพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนหัวเจาะ
- ทำให้ดินมีความเป็น Plasticity ที่พอเหมาะ
- การลดแรงเสียดทานใน ท่อ บี้ม วาล์ว ของระบบ Slurry Machine
- เพิ่มความปลอดภัยให้แก่คนงานในอุโมงค์
- ปรับปรุงคุณสมบัติดินใน Pressure Chamber ของ EPB โดยทำให้เกิด
- แรงดันดินใน Chamber มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

- สามารถควบคุมการไหลเข้ามาของน้ำใต้ดิน ได้ดีขึ้น
- การอุดตัน (Clogging) ของดินใน Chamber ลดลง
- สามารถควบคุมการไหลของดินและน้ำใน Screw Conveyor ได้ดีขึ้น

2.9.2) การปรับปรุงคุณสมบัติดินในการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธี Earth Pressure Balance Shield

- สารปรับปรุงคุณภาพดิน หรือ สารผสมเพิ่ม (Conditioning Agents, Additive Agents)

สารผสมเพิ่มที่ใช้กันมากได้แก่ โฟม, น้ำ หรือ น้ำมันโดยมีส่วนผสมหลักเป็น Bentonite หรือ Polymer

ในการก่อสร้างโดย วิธี EPB จุดประสงค์หลักคือ การทำให้ดินมีความเป็น พลาสติก มากขึ้น, มีแรงเสียดทานภายในต่ำ และ มีสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านต่ำ ซึ่งถ้าดินไม่มีลักษณะดังที่กล่าว ดินจะเกิดการอุดตันในบริเวณหัวเจาะและมีปัญหาในการลำเลียงดินผ่าน Screw Conveyor ซึ่งถ้าไม่มีการเติมสารผสมเพิ่มแล้ว การเจาะอุโมงค์โดยวิธี EPB จะสามารถใช้ได้เฉพาะใน ดินเม็ดละเอียด (Fine-grained Soils) เท่านั้น (Maidl et al, 1996)

Babendererde(1998) พบว่าในการก่อสร้างโดยวิธี EPB เมื่อใช้ โพลีเมอร์ ผสมกับ โฟม หรือ เบนโทไนท์ จะช่วยทำให้เสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์เพิ่มขึ้น คุณสมบัติของโพลีเมอร์ คือ การยับยั้ง และ ขจัดน้ำออก (Dehydration) และยังสามารถใช้หล่อลื่นอุโมงค์และ Shaft ได้ เมื่อใช้ร่วมกับ น้ำมัน

โพลีเมอร์ที่ดูดซับน้ำได้ (PHPA) เมื่อใช้ร่วมกับโฟม ในปริมาณเล็กน้อยจะสามารถช่วยทำให้ ดินเม็ดหยาบจับตัวกันเป็นรูปร่างได้ดีขึ้น

2.9.3) พฤติกรรมของ ผิวหน้าหัวเจาะ (Tunnel Face)

แรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนอุโมงค์จะลดลงได้ มาจาก 2 สาเหตุคือ

- 1) แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจาก ดิน กับ ผิวหน้าหัวเจาะลดลง
- 2) แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจาก ดิน กับ ผิวรอบนอกของหัวเจาะลดลง

เมื่อแรงที่ใช้ลดลงก็ทำให้ประหยัดพลังงาน เมื่อ Torque ที่ใช้ลดลง ก็จะทำให้การเสีรูปร่างของหัวเจาะที่เกิดจากการบิดลดลง ทำให้ชีวิตอายุการใช้งานของอุโมงค์ให้ยาวขึ้น

การฉีดสารหล่อลื่น หรือ สารผสมเพิ่ม จำเป็นจะต้องฉีดไปในบริเวณที่จะทำการขุด คือ บริเวณ ฟันกัดดินรอบๆหน้าหัวเจาะ ที่สำคัญคือต้องฉีดไปในบริเวณที่มี ความเร็วสัมพัทธ์ ระหว่างดิน กับ ฟันกัดดินสูงสุด

ในการขุดอุโมงค์ด้วยวิธี EPB บริเวณหน้าหัวเจาะจะถูกค้ำยันโดยมวลดินขุดที่ผสมขึ้นใหม่ใน Chamber โดยดินที่มีค่า สัมประสิทธิ์ความชื้นผ่าน มากกว่า 10^{-6} m/s ควรใช้สารผสมเพิ่มช่วย

2.9.4) พฤติกรรมของดินในหัวเจาะ(Pressure Chamber)

ข้อดีของ EPB คือ การพังทลายแบบทันทีทันใด (Collapse) จะไม่มีการเกิดขึ้น เพราะมวลดินขุด ซึ่งคอยออกแรงสมดุลด้านแรงดันด้านหน้าอยู่นั้น จะไม่สามารถหนีไปไหนได้ ทำให้ Condition ของดิน ไม่เปลี่ยน และยังทำให้สามารถควบคุมการไหลเข้ามาของน้ำได้

พฤติกรรมในหัวเจาะนี้มี 2 จุดที่ต้องคำนึงถึง คือ การลดลงของแรงเสียดทาน และ การป้องกันการอุดตันของดิน ซึ่งจะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ ดินมีความเป็น พลาสติก ที่พอเหมาะ ไม่เหนียวจนเกินไป และยังทำให้ควบคุมแรงดันด้านหน้าได้ง่ายด้วย โดยสภาพ พลาสติก ที่พอเหมาะจะได้อีกต่อเมื่อเราสามารถควบคุม ค่าความชื้นผ่านของดินได้

ส่วนใหญ่แล้ว EPB เหมาะสมที่จะใช้กับ Soft Clay, Silts และ Fine Sands ซึ่งทำการ Remould ดินในหัวเจาะได้ง่าย ดินจะนุ่มพอเหมาะและมีค่าความชื้นผ่านต่ำ และไม่จำเป็นต้องใช้สารผสมเพิ่ม เพียงแค่เติมน้ำเล็กน้อย

อันที่จริงแล้ว ใน Stiff Clay นั้น Face Pressure Balance สามารถช่วยลดการทรุดตัวของดินได้ แต่จะมีปัญหาคือ ในกรณีที่ ดินมี PI สูง จะต้องใช้น้ำปริมาณมากเพื่อจะเปลี่ยนให้ดินมี Water Content ที่เหมาะสมได้ แต่ดินกลับมีค่าความชื้นผ่านต่ำมาก ทำให้เกิดปัญหา การควบคุม Face Pressure ให้คงที่ก็ทำได้ยาก มวลดินจะเกิดการรวมตัวเป็นก้อนเล็กๆและจะเกิดการ Slide ไปบนดินที่อ่อนกว่า ส่วนดินที่เหนียวมากๆ ก็จะไปอุดตันอยู่ในหัวเจาะและ ในสายพานลำเลียง

ใน Stiff Clay จุดมุ่งหมายที่ต้องการ คือการให้เกิดก้อนเล็กๆ ของดินเหนียวแฉ่งไปมาในกลุ่มก้อนของ โฟม หรือ โพลีเมอร์ ซึ่งดินเหนียวจะไม่เกิดการดูดน้ำ (Uptake of Water) เนื่องจากโฟม จะเคลือบกลุ่มก้อนดินเหนียวไว้ และทำให้สามารถลื่นไหลไปมาในหัวเจาะได้โดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ๆ และในเมื่อดินสามารถยุบตัว (Compressible) ได้ดีขึ้น จะทำให้ Pressure ใน Chamber มีความ อ่อนไหว (Sensitivity) ต่อมวลดินที่จะเข้า และออกจาก Chamber น้อยลง ทำให้ Face Pressure คงที่มากขึ้น ซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญมาก

2.9.5) ผลของโฟม (Foam Action)

Foam สามารถใช้กับหัวเจาะ EPB ในดินเม็ดละเอียด Fine grained soils ได้ดี แต่ถ้าใช้กับดินเม็ดหยาบ (Coarse grained soils) ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดิน ต้องไม่เกิน 10^{-5} m/s (Herrenknecht, 1999)

ระบบหัวเจาะ EPB จะทำงานได้มีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อ

- ดินหน้าหัวเจาะสัมผัสกับหัวเจาะแบบแนบสนิทและเต็มหน้าตัด
- ดินใน Chamber อยู่ในสภาพที่มีความเป็นพลาสติกที่พอเหมาะ
- มีการป้องกันการไหลเข้ามาของน้ำใต้ดิน และ Face Pressure ต้องควบคุมได้ มีความสม่ำเสมอ

โฟม สามารถรวมตัวเข้ากับดินได้ดีและง่ายมาก เมื่อเราเติมโฟมเข้าไป ฟองอากาศจะทำให้ความหนาแน่นของดินลดลง เมื่อแรงเสียดทานภายในดินลดลง จะทำให้พลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนหัวเจาะลดลง

การฉีดโฟมเข้าไปบริเวณหน้าหัวเจาะ จะทำให้ โฟม ผสมกับดิน ก่อนที่ฟองอากาศจะทำการแยกมวลดินออกจากกัน เครื่องผลิตโฟม (Foam Generating Unit) จะผลิต โฟมโดยการกวนสารละลายโฟมที่อยู่ใน Compress Air Unit และฉีดออกมาผ่านหัวฉีด (Nozzles) ซึ่งอยู่ทางด้านหน้าของ Cutting Wheel หรือฉีดเข้าไปใน Excavation chamber ซึ่งจากประสบการณ์ของวิศวกร เครื่องผลิตโฟมควรอยู่ใกล้กับหัวฉีด (Injection Point) ให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ (Cash & Vine- Left, 1996 Maurey, 1998) และหัวฉีดก็ควรอยู่ให้ใกล้กับ Cutter head ให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เช่นกัน (Moss 1998)

จุดประสงค์หลักอย่างหนึ่งของการผสมโฟมเข้าไปคือเพื่อสร้างชั้นดินที่บึบ (Impermeable Layer) แต่ ในกรณีของสารละลาย “เบนโทไนท์” จะเกิดชั้นดินที่บึบได้ก็ต่อเมื่อหลังจากเกิดการ Consolidation ของสารละลายแล้วเท่านั้น และที่สำคัญ ในดินที่มีค่า k ต่ำ ความสามารถในการกักตัวของ Filter Cake จะ “ ล้มเหลว ” (Herrenknecht, 1994) สำหรับ โฟม สามารถใช้ได้กับ ดินทุกชนิด ซึ่งท้ายสุดหลังจาก โฟม ผสมกับดินแล้วค่า k จะมากกว่า 10^{-5} m/s

เมื่อเราใส่ PAs (Anionic-active water absorbent polymers) เข้าไปด้วย อนุภาคของดินจะถูกเคลือบและมวลดินจะแยกตัวออกเป็นสามส่วน “ (Three-phase system) ” คือ ดิน น้ำ อากาศ (Herrenknecht & Maidl, 1995) ในส่วนหน้าของหัวเจาะ โฟม จะทำการไล่น้ำออกจากมวลดิน และหลังจากนั้น โพลีเมอร์ จะทำหน้าที่ดูดซับน้ำไว้ ดังนั้น หลังจากเกิด Three-Phase System ความหนาแน่นของน้ำ ในมวลดินจะไม่เท่ากับ ความดันน้ำใต้ดินในตอนแรก

ถ้าความดันใน Chamber ลดลง Gas Phase ในโครงสร้างดินก็จะขยายและทำให้ดินเปลี่ยนรูปได้ คือ ปริมาตรดินใน Chamber ที่ถูกอัดไว้ จะสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้มาก ถ้าอัตราส่วนของโฟม : ดินชุด เปลี่ยนไป ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินใน Chamber จะมีผลอย่างมากต่อแรงดันดินที่อยู่หน้าหัวเจาะ

อีกสาเหตุหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดว่าควรใช้ โฟม แทน เบนโทไนท์ คือ ปริมาณน้ำส่วนเกินที่ใช้ ถ้าใช้โฟม จะมีปริมาณน้ำส่วนเกินน้อยกว่าใช้ เบนโทไนท์ มาก การใช้โฟม ทำให้ Natural Water Content ไม่เปลี่ยนแปลงมาก ซึ่งมีผลให้ปริมาตรดินชุดน้อยกว่าการใช้ เบนโทไนท์ มาก

เนื่องจากส่วนประกอบกว่า 90% ของโฟมประกอบ ด้วย อากาศ ซึ่งสามารถสลายตัวได้ง่ายเพียงไม่กี่วัน อีก 10% ของโฟม ประกอบด้วยสารละลายซึ่ง 90-99% ของโฟม เป็นน้ำและที่เหลืออีกเล็กน้อยถึงจะเป็น Foaming Agents กับ โพลีเมอร์ (Maidl et al, 1996)

ผลจากห้องทดลอง (DECON, 1996) บอกว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในงานชุดเจาะอุโมงค์คือ 10% สารละลาย : 90% อากาศ แต่ยังคงขึ้นอยู่กับ ความเสถียรภาพของโฟมและอุณหภูมิด้วย

ในการใช้โฟมเป็นสารปรับปรุงคุณภาพดินแต่ละชนิดนั้น มีข้อแตกต่างกันต้องมีการเลือกใช้พารามิเตอร์ต่างๆให้เหมาะสมโดยตัวแปรที่สำคัญมีอยู่ 2 ตัวคือ

1) Foam Expansion Rate (FER) หรือ Expansion Rate (ER) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้วัดประสิทธิภาพความเข้มข้นของสารละลาย (Quality of Foam) ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$FER = \frac{Q_{FOAM}}{Q_{LIQUID}} = \frac{Q_{LIQUID} + Q_{AIR}}{Q_{LIQUID}} \quad (2.7)$$

2) Foam Injection Ratio (FIR) หรือ Injection Ratio (IR) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วัดปริมาณ โฟมที่ฉีดเข้าไปในดินชุด (Quality of Foam) ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$FIR = \frac{Q_{FOAM}}{Q_{SOIL}} = \frac{Q_{LIQUID} + Q_{AIR}}{Q_{SOIL}} \quad (2.8)$$

ค่า FIR ควรแปรผันตามสภาพชั้นดินโดย บริษัท Obayashi ของญี่ปุ่น ได้คิดสูตรขึ้นมา (Knsakabe et al, 1999) ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$Q = 0.5a [(60-4 X^{0.8}) + (80-3.3 Y^{0.8}) + (90-2.7 Z^{0.8})] \% \quad (2.9)$$

X = % ของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 mm (< Fine Sand)

Y = % ของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.420 mm (< Coarse Sand)

Z = % ของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 2.00 mm (< Fine Gravel)

a = ค่าปรับแก้ ซึ่งสัมพันธ์กับค่า CU (Coefficient of Uniformity) , $1 < a < 1.6$

โดยสูตรนี้ใช้ได้กับ EPB เท่านั้นและเป็น empirical ที่ใช้ข้อมูลจากข้อมูลในญี่ปุ่นเท่านั้น

ในการก่อสร้างด้วยวิธี EPB โพลีเมอร์-โฟม มีข้อดีมากกว่าการใช้ เบนโทไนท์ หรือ สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เนื่องจาก สามารถช่วยลด แรงตึงผิวของของเหลว ทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กๆ และ เกิดฟองอากาศ 2 ชั้น (Double film bubbles) ขึ้น ซึ่งจะรวมกันเป็นโครงข่าย (Networks) และเมื่อรวมกับดินชุดใน Chamber จะส่งผลทำให้มวลดินเกิดสภาวะ Three phase system ขึ้น และในมวลดินก็จะเกิด Capillary Cohesion ขึ้น

โฟม จะทำให้เม็ดดิน เกิดเสถียรภาพขึ้นชั่วคราว น้ำจะถูกขับออกจากมวลดินโดยโฟมและจะถูกโพลีเมอร์ดูดซับไว้ โพลีเมอร์-โฟม จะสร้างฟองอากาศที่เสถียรภาพขึ้นในมวลดินและแรงดันภายในฟองอากาศนี้ จะเป็นตัวออกแรงดัน น้ำใต้ดินไม่ให้เข้ามา ทำให้ค่าความชื้นผ่านของดิน ลดลง และ เพิ่มเสถียรภาพให้แก่เม็ดดินได้เนื่องจาก ฟองของโฟม จะช่วยเพิ่ม Cohesion ให้แก่ดินทำให้ดินมีความเหนียวนุ่มพอเหมาะ ทำให้ประสิทธิภาพการขุดสูงขึ้น และโฟม ยังทำให้ดินใน Chamber มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น

ในประเด็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับการใช้โฟมแล้ว เรียกได้ว่าแทบไม่มีเลยเพราะ ส่วนประกอบส่วนใหญ่ของโฟมก็คือ อากาศ ส่วน Foaming agent ก็เป็นสารที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งเมื่อเทียบกับ เบนโทไนท์แล้ว นับว่ายังมีปัญหานี้อยู่

2.9.6) กรณีศึกษา (Case Studies)

- Peron & Marcheselli (1999) รายงานการใช้โพลีเมอร์ใน Sandy – gravelly soils ในอุโมงค์ดิน เส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 m ในประเทศอิตาลี โดยใช้โพลีเมอร์ของบริษัท Obayashi จากญี่ปุ่น โดยใช้โพลีเมอร์ 1.5% cellulose polymer 0.7% ผสมกับน้ำ อัตราส่วนของสารละลายโพลีเมอร์ 100 ลิตร : อากาศ 100 ลิตร ที่ความดัน 1.9 bar FIR ใช้ประมาณ 60-80% ในดินแห้งและ 50-80% ในดินที่มีน้ำ

- Wallis (1995) รายงานการใช้โพลีเมอร์ในอุโมงค์ในเมือง Valencia อุโมงค์อยู่ใต้น้ำใน Alluvial Sands และ Gravels มีดินละเอียดประมาณ 15% และมี Stiff Clay เล็กน้อย ใช้การขุดเจาะแบบ EPB มีหัวฉีดทั้ง เบนโทไนท์ และ โพลีเมอร์ จากประสบการณ์การทำงาน พบปัญหาจากการใช้ เบนโทไนท์ มากมาย และยังพบว่าการใช้ โพลีเมอร์ ทำให้ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) และมีความสามารถในการยุบตัว (Compressibility) สูงกว่า

- ปริมาตรดินขุด 1 ลูกบาศก์เมตร ใช้โพลีเมอร์ประมาณ 500 ลิตร ซึ่งเป็นสารละลาย โพลีเมอร์เพียง 18 ลิตร เปรียบเทียบกับการใช้ สารละลาย เบนโทไนท์ต้องใช้ ถึง 220 ลิตร/เมตร³ ใช้ค่า FIR ประมาณ 25-35% ผลปรากฏว่า เมื่อโพลีเมอร์ผสมกับดินแล้ว สามารถช่วยลดแรงและ Torque ที่ใช้กับ Cutting Wheel ลงประมาณ 20% Herrenknecht และ Maidl (1995) ได้รายงานประสิทธิภาพของการใช้ โพลีเมอร์ออกมาในทำนองเดียวกัน

- Webb และ Breeds (1997) รายงานความสำเร็จของการใช้โพลีเมอร์ในงานอุโมงค์ซึ่งอยู่ใต้ระดับน้ำ 18.3 เมตร ขุดเจาะผ่านชั้นดินผสม มีการใช้โพลีเมอร์ออกมาเป็นผลดีในทำนอง เดียวกัน

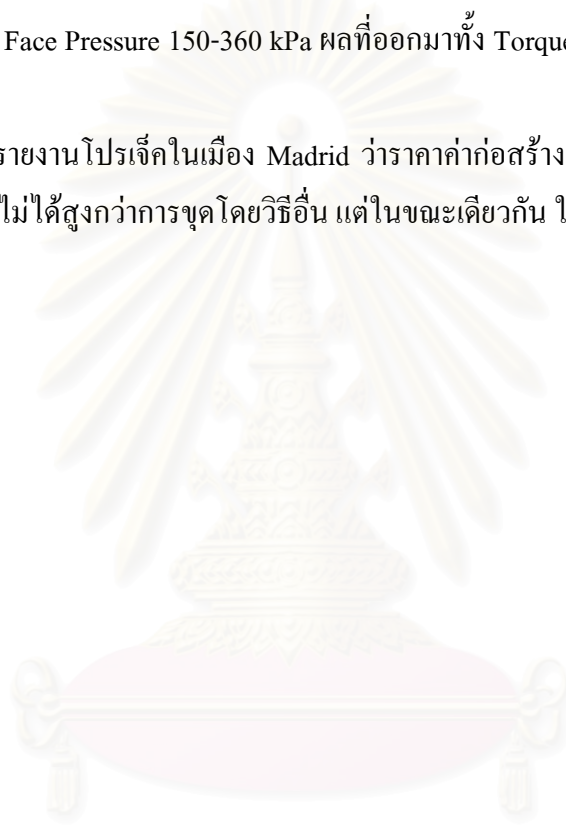
- Munroy (1998) รายงานผลสำเร็จของการใช้โพลีเมอร์เป็น สารผสมเพิ่ม คือสามารถลด Torque ของ Cutter-head ขนาด 7.7 m ที่ทำการขุดเจาะใน ดินเหนียว ใช้ FER = 20 และฉีดไปหลายๆจุด ทั้ง หน้าหัวเจาะ ,ใน Chamber และ ใน Screw Conveyor Babenderede(1998) ได้รายงานในโปรเจ็คเดียวกันนี้ว่า torque ที่เกิดขึ้นกับ Cutter Head ลดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และ Thrust Force ลดลงจาก 2000 ตันเหลือประมาณ 1200ตัน

- มีเอกสารมากมายที่ แสดงถึงผลดีของการใช้สารผสมเพิ่มกับหัวเจาะระบบ EPB (Pelle and Castner,1998) รายงานถึงผลดีของการใช้สารผสมเพิ่ม ว่าสามารถช่วยลดแรงเสียดทานที่ผิวหน้าหัวเจาะลงได้

- Maidl(1999)บันทึกผลของการใช้ EPB กับ โฟมในประเทศเนเธอร์แลนด์ในชั้นดิน Silty and Clayey Sands โดยมี Earth Pressure สูงถึง 350 kPa และ Maidl and Jonker(2000) ได้อภิปรายถึงความยืดหยุ่น และการประยุกต์ใช้งานที่เพิ่มขึ้น หลังจากมีการใช้โฟม และยังตั้งข้อสังเกตว่าในชั้นดินที่มี Earth Pressure สูง การลำเลียงดินโดย Screw Conveyor จะมีปัญหา ต้องใช้ Conveyor Belt และ Slurry Pipe แทน

- โครงการใน Singapore(Reilly,1999) มีการใช้ระบบ EPB กับโฟมและโพลีเมอร์ หรือกับโฟม และ เบนโทไนท์ ภายใต้ Face Pressure 150-360 kPa ผลที่ออกมาทั้ง Torque และ Settlement ลดลงเป็นที่น่าพอใจมาก

- Melis(1999) รายงานโปรเจ็คในเมือง Madrid ว่าราคาก่อสร้างทั้งหมด เมื่อใช้วิธี EPB กับสารปรับปรุงคุณภาพดิน ไม่ได้สูงกว่าการขุดโดยวิธีอื่น แต่ในขณะที่เดียวกัน ใช้เวลาก่อสร้างน้อยกว่ามาก



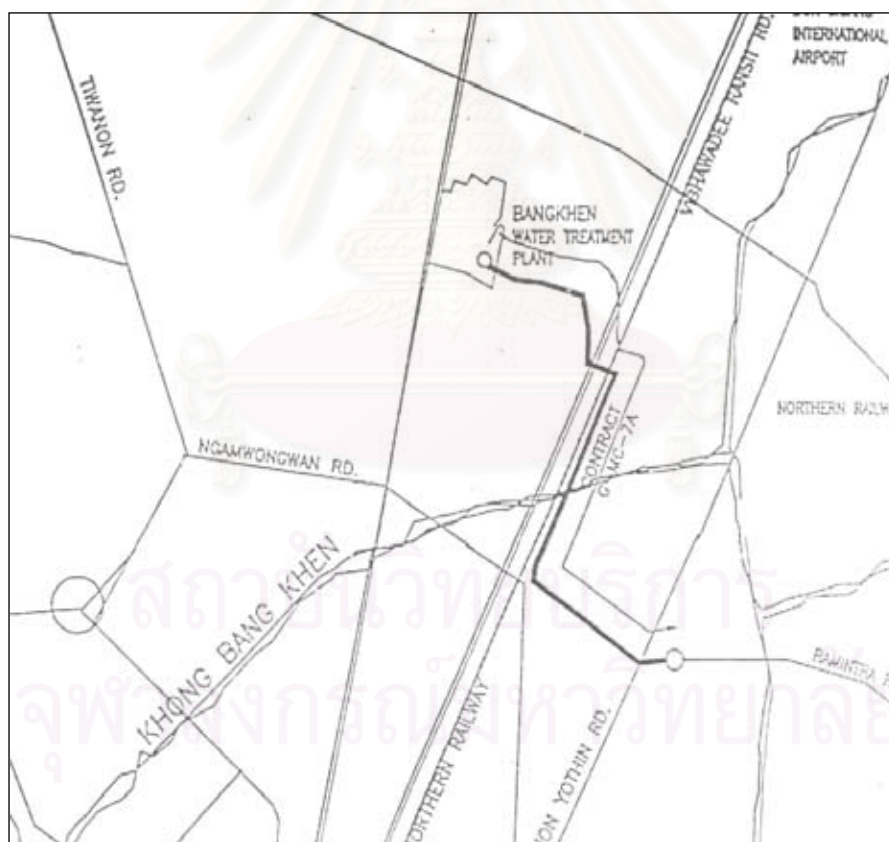
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การรวบรวมข้อมูล และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ลักษณะทั่วไปของโครงการ

การประปานครหลวง ได้ริเริ่มโครงการเพิ่มกำลังการผลิตน้ำประปา เพื่อแจกจ่ายให้กับประชาชน ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑล จึงมีโครงการก่อสร้างชุดเจาะอุโมงค์ส่งน้ำประปา จาก โรงกรองน้ำบางเขนไปสู่สถานีสูบน้ำจ่ายน้ำประปามีนบุรี โดยโครงการก่อสร้างสัญญา G-MC-7A นี้เป็น เพียงส่วนหนึ่งของโครงการดังกล่าวโดยเริ่มทำการขุดเจาะตั้งแต่โรงกรองน้ำบางเขนถึงถนนงามวงศ์วาน รวมเป็นระยะทางทั้งหมดประมาณ 6.7 กิโลเมตรเริ่มตั้งแต่ เขต บางเขน ถึงถนน งามวงศ์วาน ดังรูป ที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แนวเส้นทางอุโมงค์ส่งน้ำประปาโครงการ G-MC-7A จาก โรงกรองน้ำบางเขนถึงถนน งามวงศ์วาน

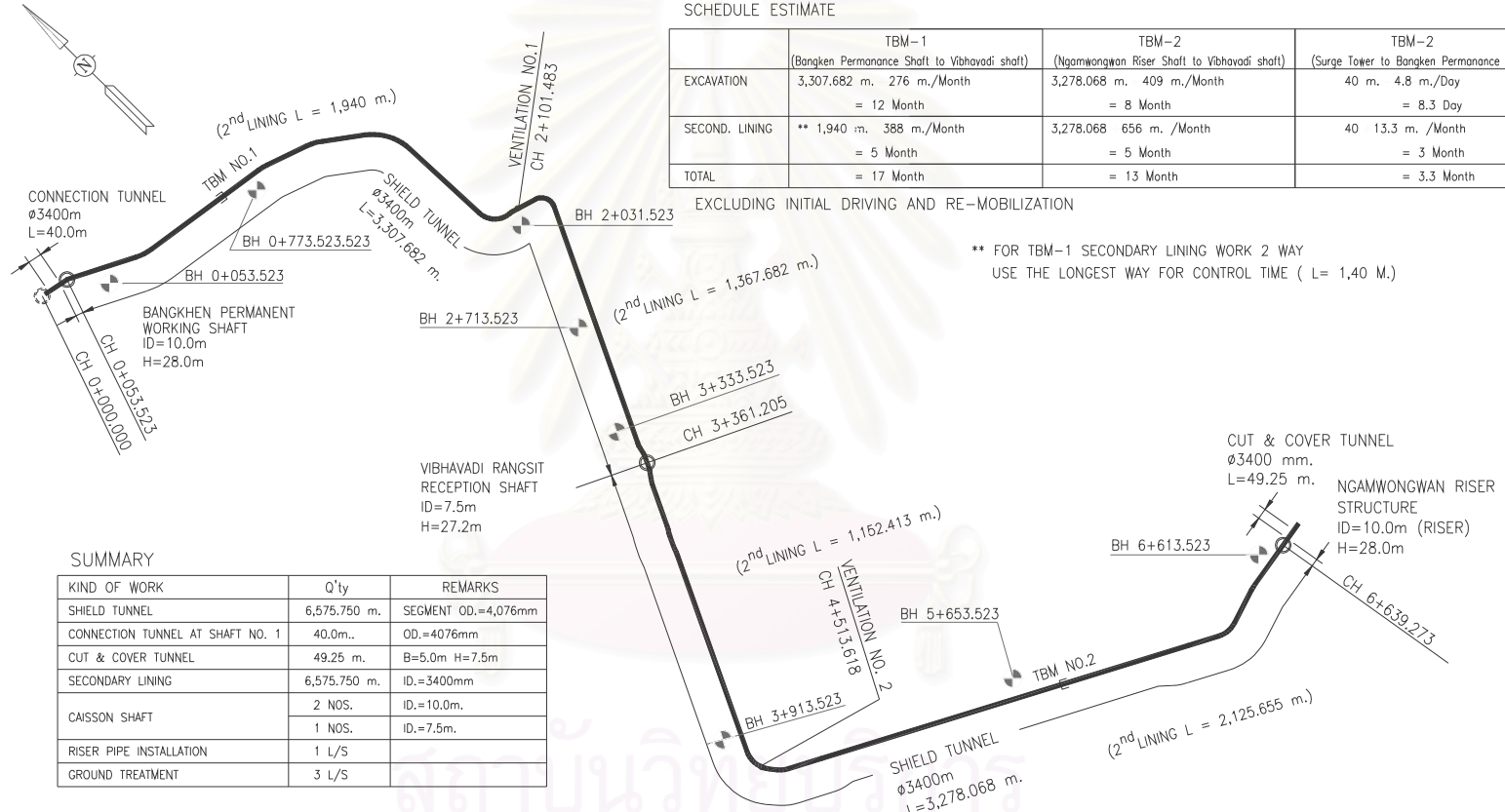
การขุดเจาะจะแบ่งเป็น 2 ช่วง โดย ช่วงแรก ซึ่งเป็นช่วงที่ทำการเก็บข้อมูล และทำการวิจัยในครั้งนี้ จะ ยาวประมาณ 3.3 กิโลเมตร เริ่มตั้งแต่เขต บางเขน (CH 0+000.00) ถึง ถนน วิภาวดี- รังสิต (CH 3+361.205) ดังแสดงใน รูปที่ 3.2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะเส้นทางอุโมงค์ และ ตำแหน่งหลุมเจาะ

CONSTRUCTION OF TRANSMISSION TUNNEL
(FROM BANGKHEN WTP. TO NGAMWONGWAN ROAD)



SCHEDULE ESTIMATE

	TBM-1 (Bangken Permanence Shaft to Vibhavadi shaft)	TBM-2 (Ngamwongwan Riser Shaft to Vibhavadi shaft)	TBM-2 (Surge Tower to Bangken Permanence Shaft)
EXCAVATION	3,307.682 m. 276 m./Month = 12 Month	3,278.068 m. 409 m./Month = 8 Month	40 m. 4.8 m./Day = 8.3 Day
SECOND. LINING	** 1,940 m. 388 m./Month = 5 Month	3,278.068 656 m. /Month = 5 Month	40 13.3 m. /Month = 3 Month
TOTAL	= 17 Month	= 13 Month	= 3.3 Month

EXCLUDING INITIAL DRIVING AND RE-MOBILIZATION

** FOR TBM-1 SECONDARY LINING WORK 2 WAY
USE THE LONGEST WAY FOR CONTROL TIME (L = 1,40 M.)

SUMMARY

KIND OF WORK	Q'ty	REMARKS
SHIELD TUNNEL	6,575.760 m.	SEGMENT OD.=4,076mm
CONNECTION TUNNEL AT SHAFT NO. 1	40.0m.	OD.=4076mm
CUT & COVER TUNNEL	49.25 m.	B=5.0m H=7.5m
SECONDARY LINING	6,575.750 m.	ID.=3400mm
CAISSON SHAFT	2 NOS.	ID.=10.0m.
	1 NOS.	ID.=7.5m.
RISER PIPE INSTALLATION	1 L/S	
GROUND TREATMENT	3 L/S	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลักษณะอุโมงค์ ส่วนใหญ่จะเป็น คาคอุโมงค์ คอนกรีต มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.05 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.7 เมตร ทำการ ขุดเจาะด้วยวิธี ระบบแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Shield , EPB) ข้อมูลทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดง ลักษณะทั่วไปของโครงการ

เจ้าของโครงการ	การประปานครหลวง (Metropolitan Waterworks Authority , MWA)
ชื่อโครงการ	Transmission Tunnel Project from Bangkok Water Treatment Plant to Ngamwongwan Road
ผู้รับเหมาโครงการ	TN Joint Venture consisting of -Summit Grade Ltd.,Part. -Asiatec Development Corp.,Ltd. -Nishimatsu Construction Co.,Ltd
ราคาค่าก่อสร้าง	1,067,844,712.00 บาท
ระยะเวลาก่อสร้าง	เริ่มโครงการ 29 มิถุนายน 2544 วันสิ้นสุดสัญญา 16 ตุลาคม 2548 รวมระยะเวลา 840 วัน
ความลึกของอุโมงค์	จากผิวดินถึงกึ่งกลางอุโมงค์ ประมาณ 20.5 เมตร
ชนิดดิน	เป็นชั้นดินเหนียวแข็งปนทราย
Tunneling Method	Shield Tunneling Type
Excavation Method	Earth Pressure Balance Type
ความยาวอุโมงค์	ประมาณ 6.7 กิโลเมตร
Primary Lining	Precast Concrete Segment เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4,076 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3,700 mm
Secondary Lining	Steel Tube Element เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3,400 mm หนา 18 mm

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลจริงที่ได้จาก สนาม จะแบ่งเป็น 3 อย่างหลักๆ คือ

- 1) ข้อมูลทั่วไปของโครงการ วิธีการขุดเจาะอุโมงค์
- 2) ข้อมูล Ground Surface Settlement
- 3) ข้อมูล TBM Record (Tunnel Boring Machine)

3.2.1 ข้อมูลทั่วไปของโครงการ และวิธีการขุดเจาะอุโมงค์

โครงการนี้มีการใช้สารผสมเพิ่ม 2 อย่าง คือ โฟม และ เบนโทไนท์ เนื่องจากช่วงแรก ซึ่งขุดเจาะโดยใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม พบปัญหา คือ ค่า Ground Surface Settlement มีค่าสูงมาก สูงถึง 140 mm จึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนชนิดสารผสมเพิ่มมาเป็นใช้ โฟม แทน ซึ่งปรากฏว่า ได้ผลดี ทั้ง ค่า Ground Surface Settlement ที่ลดลงมาก เหลือประมาณ 20 mm และ ประสิทธิภาพ การขุดเจาะ ที่เพิ่มขึ้นใน หลายๆ ด้าน

ข้อมูลทั่วไปของการขุดเจาะอุโมงค์ ประกอบไปด้วย

- 1) ลักษณะชั้นดิน (Soil Profile) และคุณสมบัติของดิน (Boring Log)
- 2) การเลือกใช้ สารผสมเพิ่ม (Additive agent) เพื่อปรับปรุงคุณภาพ การขุดเจาะอุโมงค์ ให้ดีขึ้น

ปัจจุบันงานขุดเจาะอุโมงค์เป็นที่นิยมและใช้กันแพร่หลายทั่วโลก ทำให้มีการวิจัยต่างๆ มากมายที่จะนำมาพัฒนางานขุดเจาะอุโมงค์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น หนึ่งในนั้นก็คือ การใช้สารผสมเพิ่ม(Conditioning Agents หรือ Additive) กับหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุล(EPB) ซึ่งปัจจุบันเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่าหัวเจาะแบบอื่นในหลายๆด้าน

สำหรับโครงการนี้ มีการใช้ สารผสมเพิ่มอยู่ 2 อย่าง คือ เบนโทไนท์ และ โฟม

- เบนโทไนท์ (Sodium Montmorillonite type)

เบนโทไนท์ที่ใช้ในโครงการ G-MC-7A มีอัตราส่วนผสม คือ เบนโทไนท์ : น้ำสะอาด เท่ากับ 1 : 15

จุดประสงค์ของการใช้ เบนโทไนท์ ก็เพื่อ เป็นสารหล่อลื่น โดยจะทำการอัดฉีด ไปที่พื้นผิวด้านนอก ผ่านรูหัวเจาะอุโมงค์ (Pot hole) ซึ่งมีจำนวน 8 จุด ติดอยู่บริเวณตอนหน้า และตอนกลางของหัวเจาะ เพื่อ ช่วย ลดแรงเสียดทานที่พื้นผิว ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอก ของหัวเจาะ ทำให้การเคลื่อนตัวของหัวเจาะคล่องตัวขึ้น

- โฟม

โฟมที่ใช้ในโครงการนี้ ยี่ห้อ CONDAT รุ่น CLB F4/AD ผลิตโดยประเทศ ฝรั่งเศส โดยทางเจ้าของผลิตภัณฑ์ มีคำแนะนำในการใช้ผลิตภัณฑ์ คือ

Foam Concentration = 2-3 % with Water

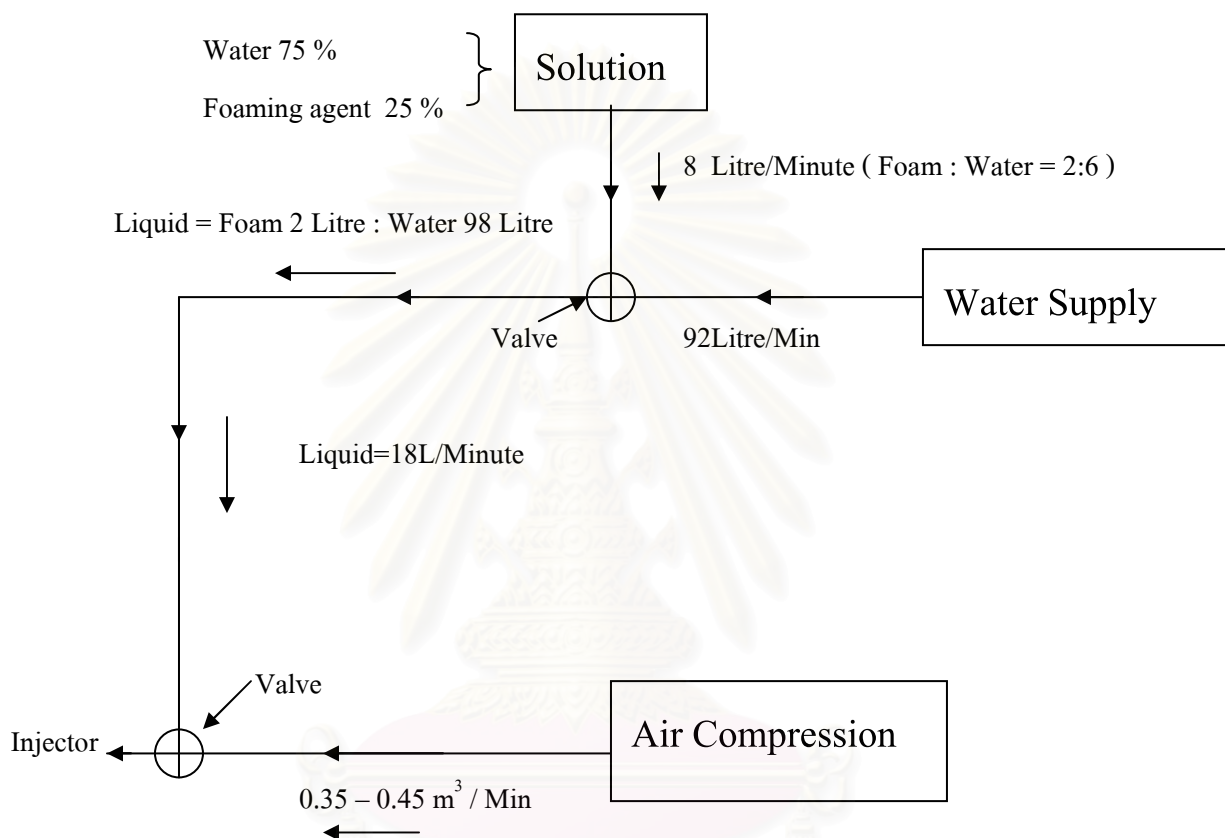
FER (Foam Expansion Ratio) = 25 %

FIR(Foam Injection Ratio) = 40 %

มีผลการทดลองเปรียบเทียบ Torque หลังการใช้โฟม จากห้องแล็บของ HERRENCKNECHT เมื่อเปรียบเทียบ Torque ของดินที่ไม่ได้ผสมโฟม กับดินที่ผสมโฟม อัตราส่วน FIR (Foam Injection Ratio) เท่ากับ 60 % ค่า Torque จะลดลงถึง 76 % ซึ่งทำให้การขุดเจาะ อุโมงค์มีประสิทธิภาพ และรวดเร็วขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการผสมโฟมของโครงการ G-MC-7A นี้ ดังแสดงในแผนภูมิ 3.1



แผนภูมิ 3.1 แสดงวิธีการเตรียม โฟม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่า FER และ FIR ที่ใช้ในโครงการสามารถคำนวณได้ดังนี้

1) FER (Foam Expansion Ratio) or Expansion Ratio (ER) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้วัดประสิทธิภาพความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งมีความหมายในเชิงกายภาพ คือ (**Quality of Foam**) โดย

$$\begin{aligned} \text{FER} &= \frac{Q_{\text{FOAM}}}{Q_{\text{LIQUID}}} = \frac{Q_{\text{LIQUID}} + Q_{\text{AIR}}}{Q_{\text{LIQUID}}} \\ &= \frac{(18 \text{ Litre/Minute} + 350 \text{ Litre/Minute})}{18 \text{ Litre/Minute}} \\ \text{FER} &= 20 \% \end{aligned}$$

ซึ่ง Q_{air} ที่ใช้ในโครงการนี้แปรผันตั้งแต่ 350 – 450 L/Min ฉะนั้นค่า FER จะมีตั้งแต่ 20 -26 %

2) FIR (Foam Injection Ratio) or Injection Ratio (IR) เป็น พารามิเตอร์ที่ใช้ วัดปริมาณโฟม ที่ฉีดเข้าไปในดินชุด ซึ่งมีความหมายในเชิงกายภาพ คือ (**Quantity of Foam**) โดย

$$\begin{aligned} \text{FIR} &= \frac{Q_{\text{FOAM}}}{Q_{\text{SOIL}}} = \frac{Q_{\text{LIQUID}} + Q_{\text{AIR}}}{Q_{\text{SOIL}}} \\ &= \frac{(18 \text{ L/Min} + 350 \text{ L/Min})}{Q_{\text{SOIL}}} \end{aligned}$$

$Q_{\text{soil}} =$ ความเร็วในการเจาะ (Penetration Rate) x พื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์

Penetration rate หาได้จาก ระยะ Jack Stroke (1200 mm) / เวลาที่ใช้ในการเจาะต่อ 1 ring
(15 Minute) = 1200 / 15 = 80 mm/ min = 0.08 m /min

โดยรัศมีอุโมงค์ ภายนอก มีค่าเท่ากับ 4.076 m

$$\text{FIR} = \frac{(18 \text{ L/min} + 350 \text{ L/min})}{(0.08) \times (\pi \times 4.076^2 / 4)}$$

$$\text{FIR} = 30 \%$$

ซึ่ง Q air ที่ใช้ในโครงการนี้แปรผันตั้งแต่ 350 – 450 L/Min ฉะนั้นค่า FIR จะเท่ากับ 30 - 40 %

3) ลักษณะ คุณสมบัติของ คาดูโมงค์ และตำแหน่งการขุดเจาะอุโมงค์
คาดูโมงค์ในโครงการนี้มี 2 แบบ คือ

ก) เป็นชิ้นส่วน คอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป (Precast Concrete Segment Lining โดยจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

- Straight Ring , ST ใช้สำหรับอุโมงค์ใน แนวเส้นตรง โดยเส้นรอบวงทั้งสองด้านจะขนานกัน มีขนาด 1200 มม.

-Tapered Ring ใช้สำหรับอุโมงค์ ในแนวโค้ง มี 2 แบบ คือ

T1 มีขนาด 800 มม.

T2 มีขนาด 1200 มม.

ใน 1 วง จะประกอบไปด้วย Normal segment 5 ชิ้น + Key segment 1 ชิ้น

ข) ชิ้นส่วน Steel Segment มีขนาด 500 มม. ใช้ในช่วงการก่อสร้าง Obstruction บริเวณ Underpass

3.2.2) ข้อมูล Ground Surface Settlement

การเก็บข้อมูล Ground Surface Settlement ใช้เครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ เรียกว่า Ground Settlement Marker Type 3 (G3) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการทรุดตัว ในแนวตั้งที่พื้นผิวจราจร หรือบนทางเท้า มีราคาถูก ติดตั้ง ง่าย แต่ สามารถหลุดออกจากพื้นผิวได้ ไม่คงทน ถาวร รายละเอียด ของเครื่องมือ ประกอบไปด้วย หมุด Stainless Steel ฝังลงในผิวจราจร ประมาณ 76 มม. และจะมีฝาครอบเพื่อป้องกันการกระทบ กระเทือน

การเก็บข้อมูล Ground Surface Settlement ทำการเก็บ ทุก Station โดยแต่ละ Station ห่างกัน 5 เมตร ข้อมูลที่มี เริ่มจาก Sta 0+120 จนถึง Sta 1+437 โดยข้อมูลที่มี จะเป็นการเก็บหลังจากทำการขุดเจาะแล้ว ประมาณ 1 อาทิตย์ โดย วัดที่ แนว Center ของอุโมงค์ และ 2,3 เมตร ห่างออกไป ทั้งด้านซ้าย และด้านขวา ของอุโมงค์ รวม 5 จุด ต่อ 1 Cross Section

โดย Station ต่างๆ ที่นำมาวิเคราะห์ แบ่งออก เป็น 4 Condition เพื่อนำไปศึกษาค่า TBM Record และ ทำการ เลือก Station ต่างๆ ตาม Condition ออกมา Condition ละ 5 Station เพื่อนำมาทำการ Back Analysis โดย FEM ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดง Station และ Condition ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ TBM Record และ FEM

Item.	Conditioning Agent	Tunnel Route	TBM Record Analysis		FEM Back Analysis
			Ring No.	Station	Station
1	Bentonite	Straight	218 - 276	0+266 - 0+321	0+290 , 0+300 , 0+310 , 0+320
2	Bentonite	Curve	192 - 217 , 277 -469	0+120 - 0+265 , 0+322 - 0+567	0+260 , 0+325 , 0+430 , 0+500 , 0+515
3	Foam	Straight	690 - 723 , 860 - 913 , 1049 - 1205	0+831 - 0+867 , 1+033 - 1+093 , 1+257 - 1+437	0+860 , 1+080 , 1+290 , 1+350 , 1+435
4	Foam	Curve	470 - 689 , 724 - 859 , 914 - 1048	0+568 - 0+830 , 0+868 - 1+032 , 1+094 - 1+256	0+655 , 0+820 , 0+980 , 1+120 , 1+210

3.2.3) ข้อมูล บันทึกหัวเจาะ (Tunnel Boring Machine Record , TBM Record)

ข้อมูล บันทึกหัวเจาะ จะทำการเก็บข้อมูลทุก Ring ตั้งแต่ Ring No. 192 จนถึง Ring No. 1205 การเก็บข้อมูลจะทำการเป็น Spread sheet และนำเสนอข้อมูลในลักษณะกราฟ โดยให้แกนนอนเป็น Ring number เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ต่อไป ข้อมูล TBM Record ประกอบไปด้วย

- 1) Face Pressure (bar) คือ ค่าแรงดันดินใน Soil chamber ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ย จากการตรวจวัดของ Face pressure Gauge ด้าน บน และ ล่าง
- 2) Push Pressure (bar) คือ ค่าแรงดันรวม ที่ Thrust Jack 16 ตัว ออกแรงดันหัวเจาะ โดยใช้ผนัง อุโมงค์ที่ติดตั้งอยู่ด้านหลังหัวเจาะ เป็นที่ค้ำยัน ทารด้วย พื้นที่หน้าตัดอุโมงค์
- 3) Articulate Pressure (bar) คือ ค่าแรงดันรวม ที่ Articulate Jack ออกแรงดันหัวเจาะ เพื่อให้หัว เจาะ สามารถ เลี้ยว ซ้าย ขวา ก้ม เงย ได้ โดย Articulate Jack จะอยู่ระหว่าง Thrust Jack กับ Soil Chamber
- 4) Cutter Torque (bar) คือ ค่ากำลังที่ใช้ในการหมุนหัวเจาะ (Excavation tool) เพื่อตัดดิน ให้เข้า มาใน Soil Chamber
- 5) Screw conveyer speed (rpm) คือ ค่า ความเร็วรอบ ของ Screw conveyer ที่ใช้ในการลำเลียงดิน ออกจาก Soil chamber ไปสู่ด้านหลังหัวเจาะ
- 6) Penetration Rate (mm/min) คือ อัตราการเคลื่อนตัวไปด้านหน้าของหัวเจาะเฉลี่ย ต่อ Segment 1 วง
- 7) Primary Grouting (Litre) คือ ปริมาณของวัสดุที่ใช้ทำ Backfill Grouting ต่อ Segment 1 วง

3.3) ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

จากปัญหา และ การแก้ไขใน หัวข้อ 3.2 จึงนำไปสู่การวิจัย เพื่อศึกษา พฤติกรรมของ โฟม และ เบนโทไนท์ เมื่อใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการขุดเจาะอุโมงค์ ด้วยวิธี EPB ให้เข้าใจมากขึ้น โดย การ ดำเนินงานวิจัย แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

- 1) การทดลองในห้องปฏิบัติการ
- 2) การวิเคราะห์ ข้อมูลที่ได้จากสนาม (TBM Record)
- 3) การวิเคราะห์ การทรุดตัวของผิวดินโดยใช้ โปรแกรม FEM (Plaxis)

3.3.1) การวิจัยโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ทำการทดสอบตัวอย่างโดยดินที่ใช้คือ ทราย ทำการผสมทรายกับ โฟม และ เบนโทไนท์ที่ อัตราส่วนต่างๆ เพื่อหาคุณสมบัติและพฤติกรรม ของดินที่เปลี่ยนไป

3.3.1.1) วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ และการเตรียมตัวอย่าง

1) ทราย โดย ทรายที่ใช้เป็น Fine Sand มีค่า $G_s = 2.65$ เป็นตัวอย่าง ทรายที่เก็บมาจาก บริเวณ อาคารสำนักงานกรุงเทพมหานคร ดินแดง ถนน มิตรไมตรี ห้วยขวาง กทม. ที่ความลึก ประมาณ 21.0 – 22.5 เมตร เป็น Fine Sandy Clay, yellow brown, stiff (CL) มีค่า SPT ประมาณ 18 blow/ft

หลังจากเก็บตัวอย่างมาแล้ว ต้องนำตัวอย่างไปล้างน้ำ แล้วร่อน ผ่านตะแกรง เบอร์ 200 เพื่อ แยก ทราย ออกจาก Clay และ Silt หลังจากนั้น นำทรายไปอบจนแห้ง

- การเตรียมตัวอย่างทราย สามารถนำทรายแห้งที่อบไว้แล้วมาใช้ได้เลย

2) โฟม โดย โฟมที่ใช้เป็น โฟมยี่ห้อ Meyco Fix SLF 20 มีลักษณะเป็น เจล กึ่งแข็งกึ่งเหลว ดัง แสดงในรูปที่ 3.3 เป็น โฟมที่ใช้เพื่อการปรับปรุง ประสิทธิภาพของงานอุโมงค์โดยตรง มีคุณสมบัติ หลักๆคือ

- ลดค่า Permeability ของดิน
- ทำให้ดิน มีความเป็น Plastic เพิ่มขึ้น , เพิ่ม Face stability ของดินหน้าหัวเจาะ
- ลด แรงเสียดทานภายในเมื่อดิน และลดการเสียดสีของดินรอบๆหัวเจาะ กับ หัวเจาะ
- ลดความเหนียวของดิน ป้องกันดินอุดตันหัวเจาะ
- Technical Data of Meyco Fix SLF 20

Form	ของเหลว
Colour	สีใส
Density	1005-1015 kg/m^3 at 20 Degree Celcius
Solubility in water	สามารถละลายได้ทั้งหมด(Absolutly)
Typical concentrate	2- 6 % solution in water

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของ Foaming Agent ก่อนที่จะนำไปผสมกับน้ำ

- การเตรียม โฟมสามารถทำได้โดย นำ โฟมมาผสม กับ น้ำเปล่า ตาม ค่า FER ที่ต้องการ ซึ่งในโครงการนี้ CONDAT ซึ่งเป็นเจ้าของผลิตภัณฑ์ โฟม แนะนำให้ใช้ค่า FER = 25 และ ค่า FIR = 30 – 40 %

การเตรียม โฟม ให้ได้ ค่า FER ตามที่ต้องการ ทำได้โดยนำ Foam agent ความเข้มข้น ต่างๆ ผสม น้ำ ไป ปั่นด้วยเครื่องปั่นดิน ประมาณ 5 นาที จนได้ เนื้อโฟมที่ฟูเต็มที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งทุกครั้ง ที่ผสมโฟม และ น้ำ ด้วยความเข้มข้นเดียวกัน แล้วปั่นนั้น ค่า FER ที่ได้ จะ ใกล้เคียงกัน โดยมีอัตราส่วนดังนี้

เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น โฟม : น้ำเปล่า เท่ากับ 0.5 % โดยน้ำหนัก จะได้ค่า FER เท่ากับ 10

เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น โฟม : น้ำเปล่า เท่ากับ 1 % โดยน้ำหนัก จะได้ค่า FER เท่ากับ 15

เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น โฟม : น้ำเปล่า เท่ากับ 2 % โดยน้ำหนัก จะได้ค่า FER เท่ากับ 20

เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น โฟม : น้ำเปล่า เท่ากับ 3 % โดยน้ำหนัก จะได้ค่า FER เท่ากับ 25

เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น โฟม : น้ำเปล่า เท่ากับ 5 % โดยน้ำหนัก จะได้ค่า FER เท่ากับ 35

หลังจากนั้น เท ฟองโฟม ที่ได้ลง ถ้วยตวง แล้วตักไปใช้ ตาม เปอร์เซ็นต์ FIR ที่ต้องการ



รูปที่ 3.4 แสดงวิธีการปั่นโฟม และตัวอย่างโฟม หลังจากปั่นเสร็จ แล้ว

3) เบนโทไนด์

การเตรียม เบนโทไนด์ ทำได้โดย นำ เบนโทไนด์ มาผสม กับ น้ำเปล่า ตามเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น ที่ต้องการ ซึ่งในโครงการนี้ ใช้ อัตราส่วน เบนโทไนด์ : น้ำเปล่า เท่ากับ 1 : 15 โดย น้ำหนัก (7 % concentrate) แต่ในบางการทดสอบจะทำการเพิ่ม หรือ ลด ความเข้มข้น เพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆ โดยจะใช้เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้น 3 ค่า คือ 4 % , 7% และ 11 % โดยน้ำหนัก

หลังจากนั้น นำ เบนโทไนด์ ที่ผสม น้ำ ไป ปั่นด้วยเครื่องปั่นดิน ประมาณ 15 นาที ให้เบนโทไนด์ ละลายเข้ากับน้ำจนหมด แล้วเทลง ถ้วยตวง แล้วตักไปใช้ ตาม ปริมาณที่ต้องการ โดย อัตราส่วน การใช้ เบนโทไนด์ ที่โครงการนี้ใช้ตาม คำแนะนำ ของ บริษัท HERRENCKECHT ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน ที่ใช้โดยทั่วไปคือ ใช้ เบนโทไนด์ ประมาณ 220ลิตร ต่อ ปริมาตรดินชุด 1 ลูกบาศก์เมตร หรือ V bent / V soil เท่ากับ 0.22 โดย ในการทดสอบนี้ เราจะใช้ V bent / V soil ตั้งแต่ประมาณ 0.2 ถึง 1.1

3.3.1.2) วิธีทดสอบ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างดินที่ใช้ คือ ดินทราย วิธีทดสอบ คือ ผสม โฟม และ เบนโทไนด์ เข้ากับทราย ใน อัตราส่วน ต่างๆกัน และ นำไปทดสอบเพื่อหาความ สำคัญ ของ ชนิด ของสารละลาย ความเข้มข้น และ ปริมาณของสารละลาย ที่มีต่อ พฤติกรรม ของดิน โดยการทดสอบจะ แบ่งเป็น 4หัวข้อได้แก่

1) Basics Properties Testing ของดิน ที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ Sieve Analysis และ Specific Gravity

2) Direct Simple Shear Testing เพื่อเป็นการศึกษา ผลของโฟมและเบนโทไนท์ ที่มีต่อแรงเสียดทานของดิน โดยตัวแปรที่ต้องการศึกษาคือ ค่ามุมแรงเสียดทานของดิน

โดย เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ คือ เครื่อง Direct Shear ดังแสดงในรูป 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องทดสอบ Direct Shear

ทดสอบโดย ผสม โฟม กับ เบนโทไนท์ เข้ากับ ทราย ใน อัตราส่วน ต่างๆกัน ดังนี้

- อัตราส่วนทราย ผสม โฟม

- ❑ Dry Sand
- ❑ Dry Sand + Water 4 %
- ❑ Dry Sand + Water 10 %
- ❑ Dry Sand + Water 26.5 % (Saturated Sand)
- ❑ Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15% , FIR = 10 %)
- ❑ Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15% , FIR = 20 %)

- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 20% , FIR = 10 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 20% , FIR = 20 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 20% , FIR = 25 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 30% , FIR = 40 %)
- Dry Sand + Water 26.5 % + Foam (FER = 20 % , FIR = 25 %)

- อัตราส่วนทราย ผสม เบนโทไนท์

- Dry Sand + Water 10 % + Bentonite (4 % concentrate , $V_{bent}/V_{soil} = 0.4$)
- Dry Sand + Water 10 % + Bentonite (7 % concentrate , $V_{bent}/V_{soil} = 0.2$)
- Dry Sand + Water 10 % + Bentonite (7 % concentrate , $V_{bent}/V_{soil} = 0.4$)
- Dry Sand + Water 10 % + Bentonite (11 % concentrate , $V_{bent}/V_{soil} = 0.4$)
- Dry Sand + Water 26.5 % (Saturated Sand)

เมื่อปั่น โฟม จนฟูเต็มที่แล้ว จึงนำไปผสมกับ ทรายโดยเครื่องผสมดิน ดังรูปที่ 3.6 และนำไปเทลง Shear Box ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แสดงการผสม ทราย กับ โฟม เข้าด้วยกัน ด้วยเครื่อง ผสมดิน



รูปที่ 3.7 แสดงการเตรียมตัวอย่าง ทราบ กับ โฟม ลงใน Shear Box

การ ทดสอบครั้งนี้ ใช้ Normal Stress ซึ่งคำนวณ จาก สภาพจริงในสนาม คือที่ระดับความลึก ประมาณ 20 เมตร ซึ่งเป็นระดับของการขุดเจาะอุโมงค์ มีค่า Vertical Effective Stress ประมาณ 1.6 ksc ดังนั้น จึงทำการทดสอบ เพื่อหาค่า Friction Angle โดยใช้ Normal Stress 3 ค่า คือ 0.8 ksc , 1.6 ksc และ 2.4 ksc โดยใช้ อัตราการเฉือนของเครื่อง Direct Simple Shear ใช้ Shear strain rate เท่ากับ 2 มิลลิเมตร /นาทึ

3) Compressibility Testing เป็นการจำลองสภาพดินที่อยู่ใน Soil Chamber ว่าเมื่อ ผสมกับ โฟม และ เบนโทไนท์แล้ว เมื่อ มีการเปลี่ยนแปลง แรงดันหลายๆ ค่า แล้วดินจะมีพฤติกรรม อย่างไร โดยใช้ เครื่อง Oedometer เป็นเครื่องมือทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยกราฟที่ต้องการศึกษาคือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void ratio กับ Vertical Stress โดย ค่า Maximum Vertical Stress ที่ใช้ทดสอบ คือ 12.8 ksc



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่อง Oedometer ใช้ทดสอบหา Compressibility ของตัวอย่าง

ทดสอบโดย ผสมโฟม กับ เบนโทไนท์ เข้ากับ ทราย ใน อัตราส่วน ต่างๆกัน ดังนี้

- อัตราส่วนทราย ผสม โฟม

- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 10 % , FIR = 10 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 10 % , FIR = 30 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 10 % , FIR = 40 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15 % , FIR = 10 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15 % , FIR = 30 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15 % , FIR = 40 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 20 % , FIR = 10 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 20 % , FIR = 30 %)

- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 20 % , FIR = 40 %)

- อัตราส่วนทราย ผสม เบนโทไนท์

- Dry Sand + Water 10 % + Bentonite (7 % concentrate , $V_{\text{bent}}/V_{\text{soil}} = 0.1$)
- Dry Sand + Water 10 % + Bentonite (7 % concentrate , $V_{\text{bent}}/V_{\text{soil}} = 0.35$)
- Dry Sand + Water 10 % + Bentonite (7 % concentrate , $V_{\text{bent}}/V_{\text{soil}} = 0.75$)

ซึ่งเมื่อผสม ทราย กับ โฟม หรือ เบนโทไนท์ แล้ว จึงนำไปใส่ใน Oedometer Box ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการเตรียมตัวอย่าง ทราย ผสม โฟม เพื่อทำการทดสอบ Compressibility

3) Power Consumption Testing เป็นการจำลองพฤติกรรมของหัวเจาะในอุโมงค์ เพื่อวัด Torque (Power Consumption) ที่เปลี่ยนไป เมื่อใช้โฟม และ เบนโทไนท์ ในอัตราส่วน ต่างๆ โดยจะมีการติดตั้ง Watt Meter (TOU Meter, รูปที่ 3.10) เข้ากับเครื่องผสมดิน ดังแสดง ในรูป 3.11 ใช้กำลัง ปั่น เบอร์ 1 และวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมดินที่ส่วนผสมต่างๆกัน



รูปที่ 3.10 เครื่อง TOU Meter ใช้ในการวัดพลังงานที่ใช้ ปั่นดิน



รูปที่ 3.11 แสดง การวัดพลังงานที่ใช้ในการปั่นตัวอย่าง โดยเครื่อง TOU Meter

ทดสอบโดย ผสม โฟม กับ เบนโทไนท์ เข้ากับ ทราย ใน อัตราส่วน ต่างๆกัน ดังนี้

- อัตราส่วนทราย ผสม โฟม

- Dry Sand
- Dry Sand + Water 10 %
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15% , FIR = 4 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15% , FIR = 8 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15% , FIR = 12 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15% , FIR = 16 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15% , FIR = 19 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15% , FIR = 22 %)
- Dry Sand + Water 10 % + Foam (FER = 15% , FIR = 25 %)

- อัตราส่วนทราย ผสม เบนโทไนท์

- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.04)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.09)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.13)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.18)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.27)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.35)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.44)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.53)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.62)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.75)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.88)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 0.97)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 1.06)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 1.15)
- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 1.24)

- Dry Sand + Bentonite (7 % concentrate , V bent / V soil = 1.37)

3.3.2) การวิเคราะห์ ข้อมูลที่ได้จากสนาม

ข้อมูลที่ได้จากสนาม จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ค่าควบคุมหัวเจาะ (TBM Record) และ Ground Surface Settlement โดยในส่วนนี้จะทำการศึกษา เปรียบเทียบค่าควบคุมหัวเจาะ โดยมีปัจจัย ต่างๆกัน ส่วน Ground Surface Settlement จะทำการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรม Plaxis วิเคราะห์เพิ่มเติมด้วย

การศึกษาค่าควบคุมหัวเจาะ (TBM Record) แบ่งปัจจัยที่ศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ

- 1) เปรียบเทียบค่า TBM Record ช่วงที่มีการใช้ โฟม กับ ช่วงที่มีการใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม
- 2) เปรียบเทียบ ค่า TBM Record ช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง กับ ช่วงที่อุโมงค์อยู่ในทางตรง

โดยค่า TBM Record ที่ จะทำการศึกษา เปรียบเทียบได้แก่

- Face Pressure
- Push Pressure
- Articulate Pressure
- Cutter Torque
- Screw conveyer speed
- Penetration Rate

ในส่วนนี้ต้องอาศัยข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเข้ามาช่วยวิเคราะห์ เพื่อให้สามารถเข้าใจ และ อธิบาย พฤติกรรมของดินในหัวเจาะ ได้ดีขึ้น

3.3.3) การวิเคราะห์ การทรุดตัวของผิวดินโดยใช้ โปรแกรม PLAXIS

ทำการวิเคราะห์หา Ground Surface Settlement โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 7.2 ซึ่งพิจารณา ลักษณะปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ (Plain Strain) และใช้แบบจำลองดินของ Mohr Coulomb

โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมดินในชั้นดินเหนียวจะทำการวิเคราะห์โดยวิธี หน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) และอาศัยหลักการ $\sigma = 0$ Concept ส่วนในชั้นทรายจะทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis)

ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่เกี่ยวข้อง แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

1) พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับดิน ได้แก่

- กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Undrain Shear Strength , S_u)
- สัมประสิทธิ์แรงคั้นด้านข้างแบบสถิต (K_0)
- ค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำของดิน (E_u)
- หน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_d) และหน่วยน้ำหนักรวม (γ_t)
- ค่า Cohesion , C และ Friction Angle ของดิน
- ค่า Poission Ratio , ν ของดิน

2) พารามิเตอร์ ที่เกี่ยวกับโครงสร้างใต้ดิน

- น้ำหนักของอุโมงค์ , W
- ค่าสติเฟนสของผนังอุโมงค์, EA และ ลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์
- ค่าความแข็งเชิงคด (Flexural Rigidity , EI)
- ค่า Poission ratio , ν ของคอนกรีต

การวิเคราะห์โดยใช้ โปรแกรม Plaxis เราจะทำ การ Back Analysis จากข้อมูล Ground Surface Settlement ที่ได้จากในสนาม วิเคราะห์ กลับ เพื่อ เปรียบเทียบค่า เปอร์เซ็นต์ Ground Lossของกรณีต่างๆ คือ

- 1) เปรียบเทียบค่า เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ของช่วงที่มีการใช้ โฟม กับ ช่วงที่มีการใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม
- 2) เปรียบเทียบ ค่า เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ของช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง กับ ช่วงที่อุโมงค์อยู่ในทางตรง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลงานวิจัย

การวิเคราะห์ปัญหา และทางแก้ไข ที่เกิดขึ้นในโครงการนี้ ต้องใช้การวิเคราะห์จากหลายขั้นตอนมาผสมผสานกัน โดยข้อมูลหลักๆที่รวบรวมมาได้จากนํ้างาน คือ ข้อมูล TBM Record และ ข้อมูล Ground Surface Settlement ซึ่งมีปัจจัยหลักที่จะทำการศึกษา คือ การใช้สารผสมเพิ่ม (Conditioning Agent) ที่ต่างกัน คือ โฟม และ เบนโทไนท์ โดย การวิเคราะห์ ผลงานวิจัยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

- 1) การวิเคราะห์ผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ
- 2) การวิเคราะห์ข้อมูลหัวเจาะจากสนาม (TBM Record)
- 3) การวิเคราะห์ Ground Surface Settlement โดยใช้ โปรแกรม FEM (PLAXIS)

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ

เพื่อให้เข้าใจ พฤติกรรมของดินในหัวเจาะ เมื่อผสมกับ สารผสมเพิ่ม ต่างชนิดกัน ให้ดีขึ้น จึงต้องมีการทดสอบ คุณสมบัติเบื้องต้น โดย ตัวอย่างทดสอบที่ใช้คือ ทราย เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของสารผสมเพิ่ม ได้โดยตรง และง่าย โดยไม่ต้องคำนึงถึง ปัจจัยที่จะมาจาก สารประกอบอื่นๆ ในดิน มากนัก การทดสอบนี้จะพยายามจำลองสภาพ และคุณสมบัติ ของวัสดุที่นำมาทดสอบให้ใกล้เคียง กับนํ้างานของโครงการนี้ให้มากที่สุด ไม่ว่าจะเป็น ตัวอย่างทราย โฟม เบนโทไนท์ และ อัตราส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในโครงการ โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แบ่งเป็น 3 การทดสอบ คือ

- 1) การทดสอบ Direct Simple Shear
- 2) การทดสอบ Compressibility
- 3) การทดสอบ Power Consumption

โดยโครงการ G-MC-7A มีการใช้สารผสมเพิ่ม 2 ชนิดคือ โฟม และ เบนโทไนด์ ซึ่งมีรายละเอียดของสารผสมเพิ่มดังนี้

1) โฟม

โฟม ที่ใช้ในโครงการนี้ ยี่ห้อ CONDAT รุ่น CLB F4/AD ผลิตโดยประเทศ ฝรั่งเศส โดยทางเจ้าของผลิตภัณฑ์ มีคำแนะนำในการใช้ผลิตภัณฑ์สำหรับงานขุดเจาะอุโมงค์ คือ

Foam Concentration = 2-3 % with Water

FER (Foam Expansion Ratio) = 25 %

FIR(Foam Injection Ratio) = 40 %

2) เบนโทไนด์

ค่าที่แนะนำให้ใช้ในงานขุดเจาะอุโมงค์ โดยบริษัท HERENCKENECH ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญในงานขุดเจาะอุโมงค์ คือ อัตราส่วน เบนโทไนด์ : น้ำ เท่ากับ 1 : 15 หรือประมาณ 7 % ความเข้มข้น และ ปริมาณ เบนโทไนด์ ที่ใช้ คือ เบนโทไนด์ 220 ลิตร ต่อ ปริมาตร ดินขุด 1 ลูกบาศก์เมตร หรือ $V_{\text{bent}} / V_{\text{soil}} = 0.22$

โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการทั้ง 3 การทดสอบ จะใช้ อัตราส่วนผสมของ โฟม และ เบนโทไนด์ ดังที่ได้กล่าวข้างต้นเป็นเกณฑ์ และจึง ทำการ เพิ่ม ลด ปริมาณสารผสมเพิ่ม เพื่อดูผลกระทบในด้านต่างๆ

4.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ Direct Simple Shear

จุดประสงค์ของการทดสอบ Direct Simple Shear นี้ เพื่อเป็นการศึกษามุมเสียดทานของดินที่อยู่ใน Soil chamber ว่าหลังจากผสมกับ โฟม และเบนโทไนด์ แล้วมีสภาพอย่างไร

วิธีทดสอบคือ ผสม โฟม หรือ เบนโทไนด์ เข้ากับ ทรายเป็นอัตราส่วน ที่เราต้องการ แล้วนำไปเลื่อนจน ตัวอย่างพัง โดยใช้ Normal Stress = 1.6 ksc ซึ่งคำนวณจาก Effective Stress ของดินหน้า หัวเจาะ ที่ระดับความลึก ประมาณ 20 เมตร และ Normal Stress อีก 2 ค่า คือ 0.8 ksc และ 2.4 ksc บันทึก ค่าแรงเลื่อนสูงสุด นำค่า แรงเลื่อนสูงสุด กับค่า หน่วยแรงตั้งฉาก ทั้ง 3 ค่า ไปพล็อต กราฟ เพื่อหาค่า มุมเสียดทาน ของตัวอย่าง

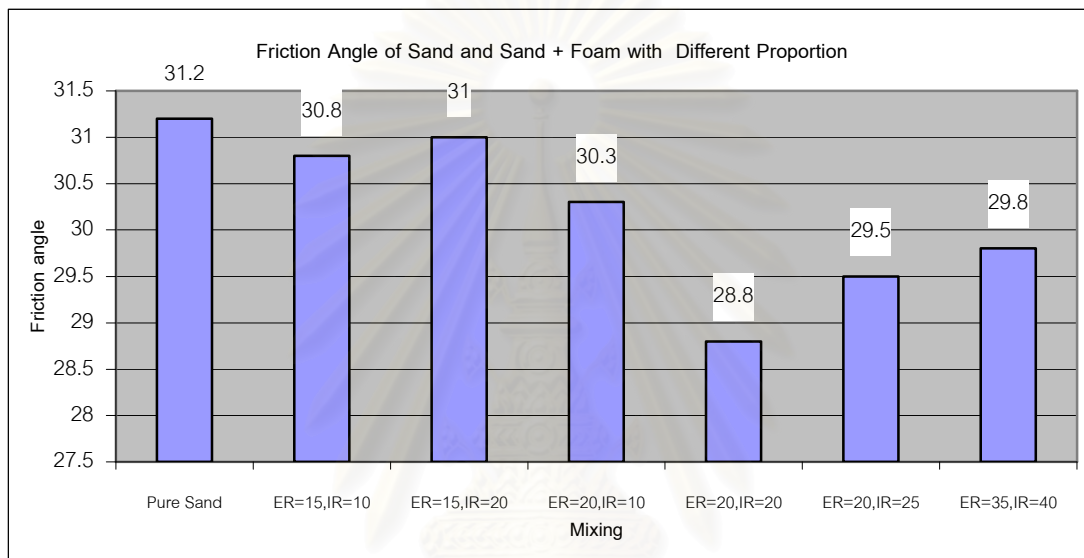
ทำการเปรียบเทียบ ค่ามุมแรงเสียดทาน ของดิน เมื่อผสม กับ โฟม และเบนโทไนด์ ในอัตราส่วน ต่างๆ กัน โดยผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.1 – 4.3

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสม และค่า Friction Angle ของตัวอย่างทดสอบ Direct Simple Shear

Sample no.	Mixing	Proportion		Water Content (%)	Friction Angle (Degree)
		FER Or Bentonite concentrate	FIR Or Vbentonite/Vsoil		
DS1	Dry Sand 400 g	0	0	0	33.3
DS2	Dry Sand 400g+ Water 16 g (w= 4 %)	0	0	4	31.2
DS3	Dry Sand 400g+ Water 106 g (w=26.5% , Saturated Sand)	0	0	24	27.6
DF1	Dry Sand 400 g+ Water 40 g + Foam(1% concentrate) 20 ml	15	10	4	30.8
DF2	Dry Sand 400 g+ Water 40 g + Foam(1% concentrate) 40 ml	15	20	4	31
DF3	Dry Sand 400 g+ Water 40 g + Foam(2% concentrate) 20 ml	20	10	4	30.3
DF4	Dry Sand 400 g+ Water 40 g + Foam(2% concentrate) 40 ml	20	20	4	28.8
DF5	Dry Sand 400 g+ Water 40 g + Foam(2% concentrate) 60 ml	20	25	4	29.5
DF6	Dry Sand 400 g+ Water 40 g + Foam(5% concentrate) 120 ml	35	40	4	29.8
DB1	Dry Sand 400 g +Bentonite(7%concentrate) 120 ml	7	0.4	25	29.9
DB2	Dry Sand 400 g +Bentonite(11 % concentrate) 120 ml	11	0.4	24.5	32.8
DB3	Dry Sand 400 g +Bentonite(4 % concentrate) 120 ml	4	0.4	24	29.7

4.1.1.1 การทดสอบ Direct Simple Shear ของ ทราย และ ทราย ผสม กับ โฟม

เพื่อทำการศึกษาผลของสารผสมเพิ่มที่มีต่อ ค่า Friction Angle ของทราย การเปรียบเทียบ จึงต้องทำที่ค่า Water Content เดียวกัน โดยในกรณีของ โฟม จะทำการเปรียบเทียบค่า Friction Angle ของทรายล้วน ที่ Water Content 4 % กับ ค่า Friction Angle ของทราย ผสม โฟม ใน อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งจะมีค่า Water Content ประมาณ 4 % เช่นเดียวกัน โดยได้ผลการทดสอบ ดัง แสดงในตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.1

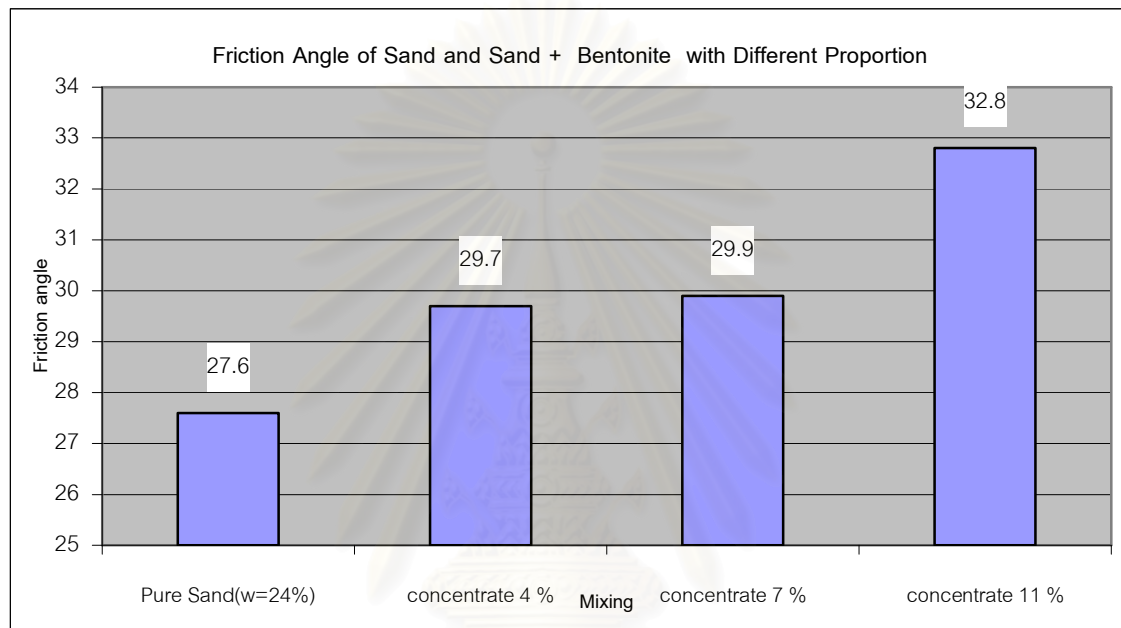


รูปที่ 4.1 แสดงค่า Friction Angle ของ ทราย และ ทราย ผสม โฟม ที่ส่วนผสมต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า Friction Angle ของ ทรายเปล่า = 31.2 องศา และ ของ ทรายผสม โฟมที่ อัตราส่วนต่างๆจะมีค่า ตั้งแต่ 28.8 – 31 องศา ซึ่งจะเห็นว่ามีการลดลงเล็กน้อย ไม่เห็นผลที่ ชัดเจนนัก แสดงถึงว่า ที่ความหนาแน่นของตัวอย่างที่เท่ากัน อัตราส่วนผสมโฟมที่เพิ่มขึ้นไม่มีผล ต่อค่า Friction Angle ของดิน น่าจะมีสาเหตุมาจาก โฟม มีใช้มีคุณสมบัติ เป็นสารหล่อลื่น โดยตรง ส่วนประกอบหลักของโฟมจะเป็นอากาศ มากกว่า เมื่อทำการทดสอบที่ความหนาแน่นเดียวกัน ค่า Friction Angle จึงไม่ต่างกันมากนัก

4.1.1.2 การทดสอบ Direct Simple Shear ของ ทราย และ ทราย ผสม กับ เบนโทไนด์

โดยจะทำการศึกษาในหลักการเดียวกันกับ การศึกษาผลของ โฟม คือเปรียบเทียบ Friction Angle ของตัวอย่างที่ Water Content เดียวกัน การทดสอบจึงไม่ได้ทำการแปรผัน ปริมาณ เบนโทไนด์ แต่จะแปรผัน เฉพาะ ความเข้มข้น ของ เบนโทไนด์ โดยจะ ชีดเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ เบนโทไนด์ ที่ใช้จริงในสนาม 7 % เป็นค่ากลาง และทำการเพิ่ม ลด อีก 2 ตัวอย่าง เป็น 4 % และ 7% ซึ่งได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2

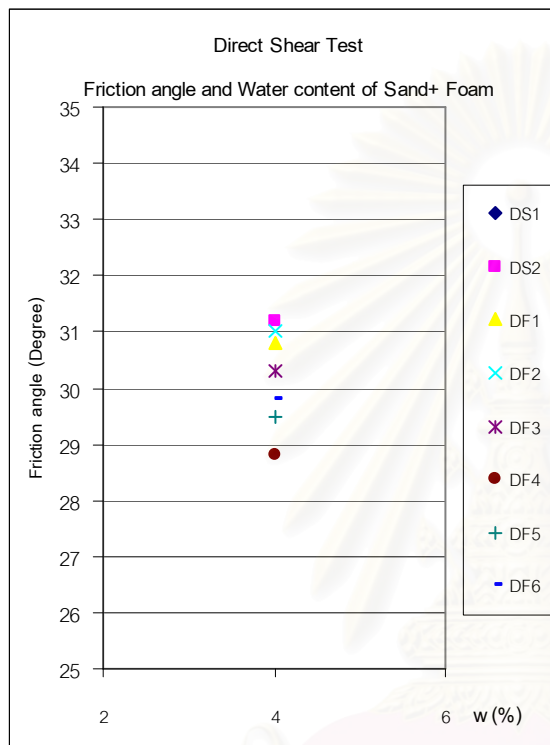


รูปที่ 4.2 แสดงค่า Friction Angle ของ ทราย และ ทราย ผสม เบนโทไนด์ ที่ส่วนผสม ต่างๆ

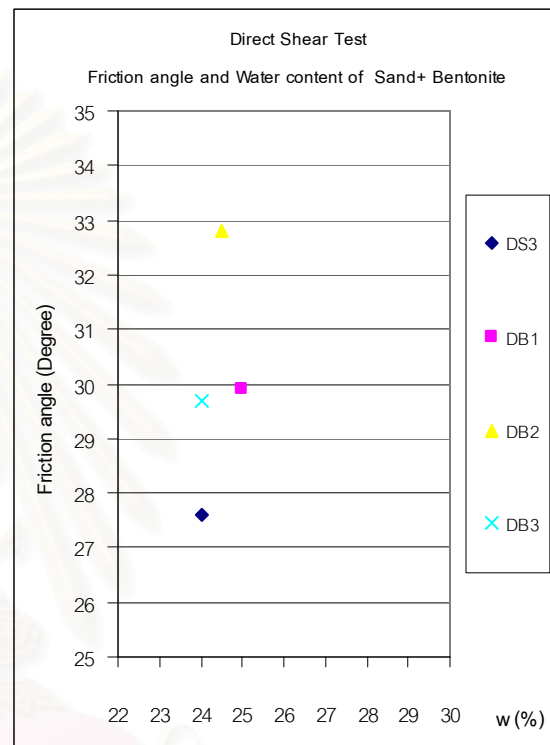
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า Friction Angle ของ ทราย เท่ากับ 27.6 องศา และ ของ ทรายผสม เบนโทไนด์ ที่อัตราส่วนต่างๆ จะมีค่า ตั้งแต่ 29.7 – 32.8 องศา ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แปรผันตามปริมาณ ของ เบนโทไนด์ ที่ เพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะมีสาเหตุ มาจาก เบนโทไนด์ ซึ่งก็คือ ดิน เหนียวชนิดหนึ่ง เมื่อทำการผสม กับ ทราย แล้ว อนุภาคเล็กๆ ของดินเหนียวจะเข้าไปแทรกอยู่ ระหว่างอนุภาคทราย และทำให้ Relative Density ของ ทราย เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

4.1.1.3 การเปรียบเทียบค่า Friction Angle และ ค่า Water Content ของทราย ผสม โฟม และ ทราย ผสม เบนโทไนท์

การทดสอบ Direct Simple Shear นี้เมื่อผสม โฟม กับ เบนโทไนท์ เข้า กับตัวอย่างทราย ตามอัตราส่วนที่ได้จาก Site แล้ว ยังมีอีก จุดหนึ่งที่น่าสังเกต ก็คือค่า Water content ของตัวอย่าง ซึ่งหลังจากทำการทดสอบแล้ว ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.3a , 4.3 b



รูปที่ 4.3a แสดง Friction Angle ของ ทราย + โฟม



รูปที่ 4.3b แสดง Friction Angle ของ ทราย + เบนโทไนท์

จากรูปที่ 4.3a และ 4.3b จะเห็นว่าตัวอย่างทรายที่ผสมกับ โฟม เมื่อทำการ ทดสอบแล้ว ค่า Water Content ของตัวอย่างจะมีค่า ประมาณ 4 % ส่วนตัวอย่างที่ผสมกับ เบนโทไนท์ จะมีค่า Water Content ประมาณ 24 % ที่เป็นเช่นนี้เพราะส่วนประกอบหลักของ เบนโทไนท์ กว่า 90% คือน้ำ ซึ่งต่างจาก โฟม ที่มีส่วนประกอบหลัก 90 % คือ อากาศ 9 % คือน้ำ ซึ่งการที่ดินในหั่วเจาะ มีค่า Water content ที่สูง มากเกินไป ไม่เป็นผลดีนัก ต่อประสิทธิภาพการขุด เพราะจะทำให้ การลำเลียงดิน ผ่าน Screw Conveyor เป็นไปโดยลำบาก ดินไม่มีความเหนียวเพียงพอ และจะทำให้การขุดเจาะเป็นไปอย่างล่าช้า

จากรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3a และ 4.3b จะเห็นว่า ถึงแม้ว่า โฟม จะไม่ได้มีผลต่อค่า Friction Angle ของดินโดยตรง แต่เมื่อ พิจารณาถึง ค่า Push Pressure และ ค่า Articulate Pressure ช่วงที่ใช้ โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม จะมีค่า ต่ำกว่า ช่วง ที่ใช้ เบนโทไนท์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่า โฟมจะมี

คุณสมบัติไม่ใช่ สารหล่อลื่น โดยตรง ไม่สามารถ ลด Friction ระหว่าง ดินรอบๆ หัวเจาะ กับ หัวเจาะ ได้ แต่ โฟม มีคุณสมบัติ อื่นๆ ที่จะทำ ให้หัวเจาะสามารถขับเคลื่อน ไปด้านหน้า ได้ โดยใช้แรงดันที่ไม่สูงนัก ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจาก โฟมทำให้ดินหน้าหัวเจาะ มีความ นุ่ม พู มากกว่า การใช้ เบนโทไนท์ ทำให้ สามารถขุดเจาะได้โดยมี Cutter Head Torque ที่ต่ำ และสามารถลำเลียงดินเข้ามาสู่ หัวเจาะได้ง่าย และต่อเนื่องกว่า ตรงกันข้ามกับการใช้ เบนโทไนท์ ซึ่งถึงแม้ว่า จะไม่เห็นผล การเพิ่มค่า Friction Angle ที่ชัดเจนนัก แต่ก็ มีแนว โน้มที่ว่า การฉีด เบนโทไนท์ เข้าไป บริเวณหน้า หัวเจาะ จะเป็นการทำให้มวลดินหน้าหัวเจาะ มีอนุภาค ดินเล็กๆ เข้าไปแทรก มากขึ้น เป็นการทำให้ ค่า Cutter Head Torque สูงขึ้น

4.1.2 การทดสอบเพื่อหาค่า Compressibility ของดิน

การทดสอบนี้ เป็นการจำลอง สภาพดิน ที่อยู่ใน Soil Chamber ว่าเมื่อผสมกับโฟม และ เบนโทไนท์ แล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงของ Void Ratio และค่า Compressibility อย่างไร เนื่องจากการที่จะควบคุม Face pressure ให้ได้ดินั้น ดินใน Soil Chamber จำเป็น จะต้องมีสภาพเป็น Plastic และมีค่า Compressibility ที่สูงด้วย ค่า Compressibility ที่สูงนั้น แสดงถึงว่า ดินใน Soil Chamber จะมีความสามารถในการยุบตัวสูง มีความนุ่ม มีสภาพคล้ายเบาะนุ่ม ซึ่งทำให้สามารถกระจายแรงดันจาก Thrust Jack ไปสู่บริเวณ ด้านหน้าหัวเจาะได้นุ่มนวลขึ้น เป็นการลดความ Sensitive ของการกระจายแรงดันดิน ทำให้มีความยืดหยุ่น ในการทำงานมากขึ้น

การทดสอบหาค่า Compressibility ของตัวอย่างดิน แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

- 1) ทดสอบหาค่า Compressibility ของ ทราย ผสม โฟม
- 2) ทดสอบหาค่า Compressibility ของ ทราย ผสม เบนโทไนท์

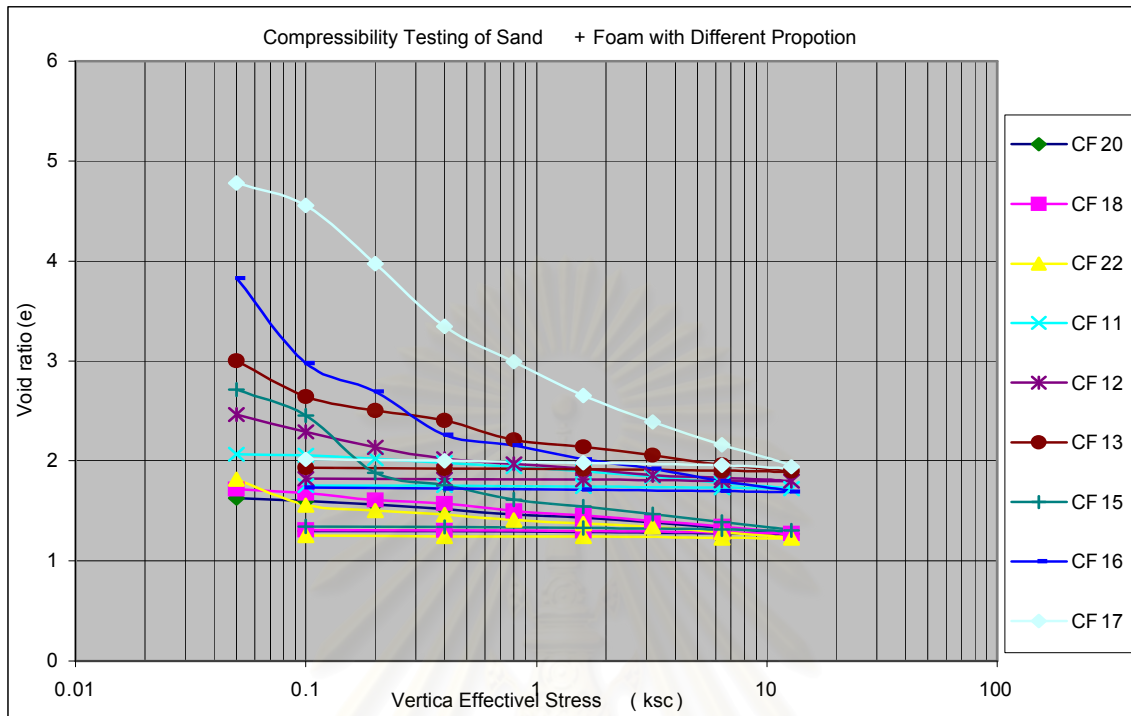
โดยเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ คือ เครื่อง Oedometer และ ใช้ค่า Maximum Vertical Effective Stress เท่ากับ 12.8 ksc หรือเท่ากับ 8 เท่าของ Vertical Effective Stress (1.6 ksc) ของดินบริเวณ หน้าหัวเจาะที่ระดับความลึก 20 เมตร

4.1.2.1 การทดสอบหาค่า Compressibility ของ ทราย ผสม โฟม

การทดสอบ นี้ เพื่อศึกษา ว่าเมื่อมีการเพิ่ม ค่า Foam Expansion Ratio (FER) และ Foam Injection Ratio (FIR) เข้าไป จะทำให้พฤติกรรมของดิน เปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยจะทดสอบ ทั้งหมด 9 ตัวอย่าง แปรผันค่า FER 3 ค่า คือ 10 % , 15% และ 20 % และ แปรผันค่า FIR 3 ค่าคือ 10% , 30 % และ 40 % ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4 – 4.7

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดง ส่วนผสม และ Void Ratio ของดิน ผสม โฟม ที่อัตราส่วนต่างๆ

Maximum Vertical Effective Stress = 12.8 ksc									
No.	Sample no.	Mixing					Initial void ratio (e_i)	Final void ratio (e_f)	Diff void ratio ($e_i - e_f$)
		Dry sand (g)	water (g)	Foam concentrate (%)	FER(%)	FIR(%)			
1	CF20	300	30	0.5	10	10	1.62	1.26	0.35
2	CF18	300	30	0.5	10	30	1.71	1.27	0.44
3	CF22	300	30	0.5	10	40	1.81	1.22	0.58
4	CF11	300	30	1	15	10	2.06	1.72	0.34
5	CF12	300	30	1	15	30	2.46	1.79	0.66
6	CF13	300	30	1	15	40	3.00	1.89	1.10
7	CF15	300	30	2	20	10	2.71	1.30	1.40
8	CF16	300	30	2	20	30	3.83	1.69	2.13
9	CF17	300	30	2	20	40	4.77	1.94	2.83

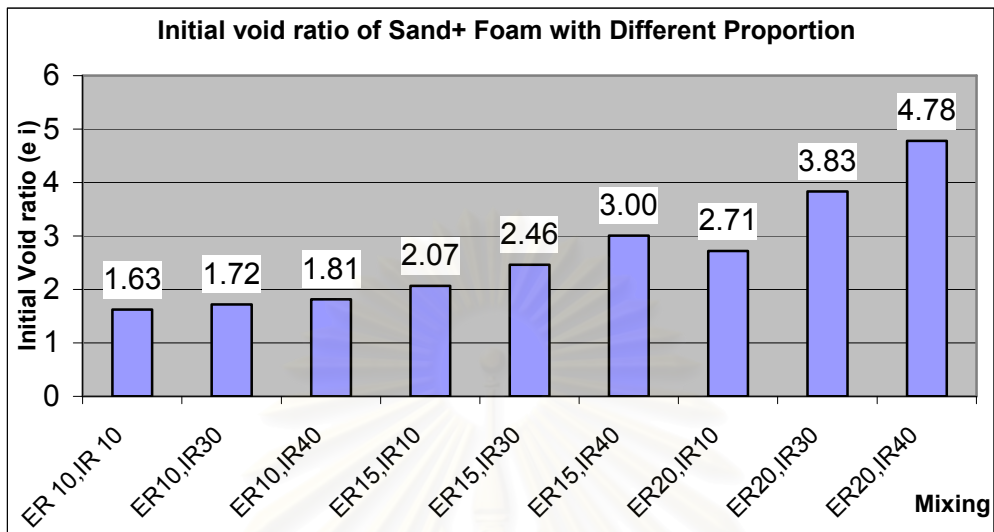


รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Void Ratio กับ Vertical Stress ของ ดิน ผสม โฟม ที่อัตราส่วนต่างๆ

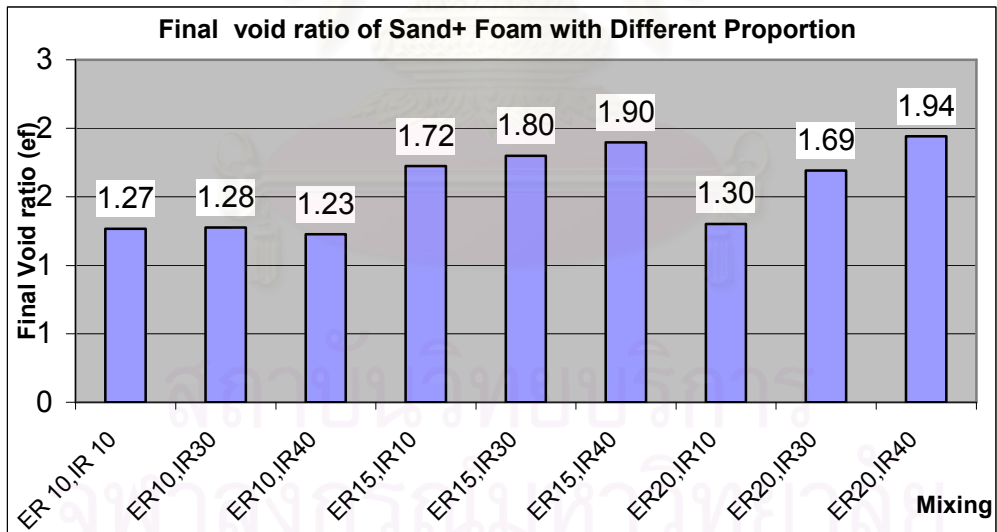
เพื่อให้เห็นผลของ โฟม ที่มีต่อค่า Void Ratio ของดิน ให้ชัดเจนขึ้น จึงทำการแยกการ เปรียบเทียบ Void Ratio ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- 1) Initial Void Ratio (e_i)
- 2) Final Void Ratio (e_f)
- 3) Different Void Ratio (de)

โดยค่า FER (Foam Expansion Ratio) หรือ ER (Expansion Ratio) และ ค่า FIR(Foam Injection Ratio) หรือ IR (Injection Ratio) ในแกน x จะเพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวา ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 – 4.7



รูปที่ 4.5 แสดงค่า Initial Void Ratio ของ Sand+ โฟม ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

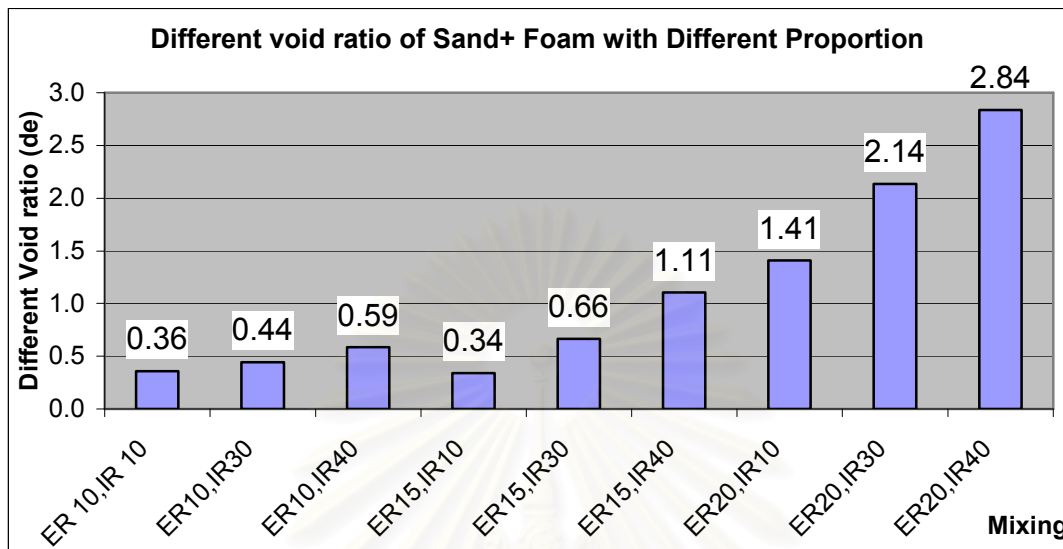


รูปที่ 4.6 แสดงค่า Final Void Ratio ของ Sand + โฟม ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

*Note.

ER (Expansion Ratio) = FER (Foam Expansion Ratio)

IR (Injection Ratio) = FIR(Foam Injection Ratio)



รูปที่ 4.7 แสดงค่า Different Void Ratio ของ Sand + โฟม ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 –4.7 จะเห็นว่าการเพิ่มปริมาณ FER และ FIR มีผลต่อค่า Compressibility ของดิน คือเมื่อเพิ่ม FER และ FIR แล้ว ค่า Initial Void Ratio (e_i), Final Void (e_f) Ratio และ Different Void Ratio ($e_i - e_f$) จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนผสม โฟม 0.5 % concentrate หรือ FER = 10 % เมื่อมีการเพิ่มค่า FIR ค่า Void Ratio จะยังไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อผสมที่อัตราส่วน โฟม 1 % และ 2 % concentrate หรือ FER = 15 และ 20 ตามลำดับ จะเริ่มเห็นความแตกต่างของค่า Compressibility มากขึ้น โดยที่ส่วนผสม FER = 15 และ 20 นั้น ค่า Initial Void Ratio จะต่างกัน ชัดเจน แต่จะมีค่า Final Void Ratio ใกล้เคียงกัน ส่วนค่า Different Void Ratio นั้นจะเพิ่มขึ้นตาม ปริมาณ FER และ FIR

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้ โฟมเป็นสารผสมเพิ่ม สามารถทำให้ค่า Void Ratio ของดินเพิ่มขึ้นได้ ซึ่ง การที่ค่า Void Ratio ของดินเพิ่มขึ้นนี้ แสดงถึงว่าดินมีค่า Compressibility เพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าเปรียบกับดินที่อยู่ใน Soil Chamber ของหัวเจาะแล้ว การที่ดินมีค่า Compressibility สูงขึ้น นับว่าเป็นผลดีมาก เพราะจะทำให้การควบคุมค่า Face Pressure ทำได้ง่าย เนื่องจากดิน จะมีความ ยืดหยุ่นสูงขึ้นทำให้ สามารถรับ และ กระจาย Pressure จากด้านหลัง หัว เจาะ ไปสู่ Cutting Face ได้ดี และ นุ่มนวลขึ้น และการที่ดินมีค่า Compressibility สูงนี้ ยังมีข้อดีอีก คือจะทำให้ค่า ความอ่อนไหว (Sensitivity) ของดินใน Soil Chamber ลดลง ทำให้ Pressure ที่อยู่ ด้านหน้าหัวเจาะ จะมีค่าที่สม่ำเสมอ (Smooth) มากขึ้น ไม่ผันผวนขึ้นลง ตามสภาพดินที่เข้ามาใน

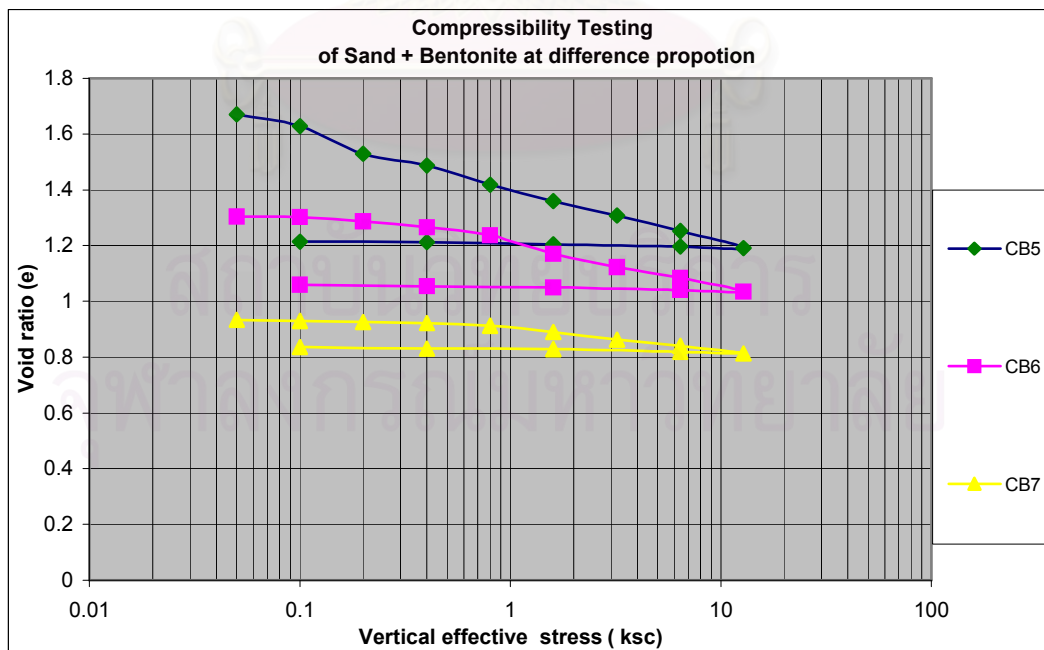
หัวเจาะมากนัก ทำให้ผู้ควบคุมหัวเจาะ (Shield Operator) สามารถทำงานได้ง่าย และต่อเนื่อง ทำให้การขุดเจาะรวดเร็วขึ้นด้วย

4.1.2.2 การหาค่า Compressibility ของ ทรายผสม เบนโทไนท์

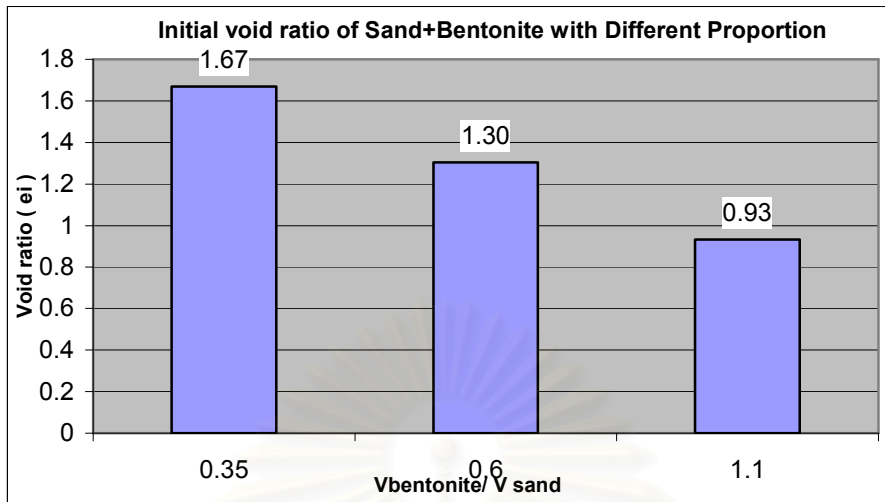
การหาค่า Compressibility ของ ทรายผสม เบนโทไนท์ ทำการทดสอบโดย นำทรายมาผสมกับ เบนโทไนท์ ความเข้มข้น 7 % ในปริมาณต่างๆ กัน เพื่อเปรียบเทียบค่า Void Ratio ของแต่ละตัวอย่าง ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.8-4.11

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดง ส่วนผสม และ Void Ratio ของดิน ทรายผสม เบนโทไนท์ ที่อัตราส่วนต่างๆ

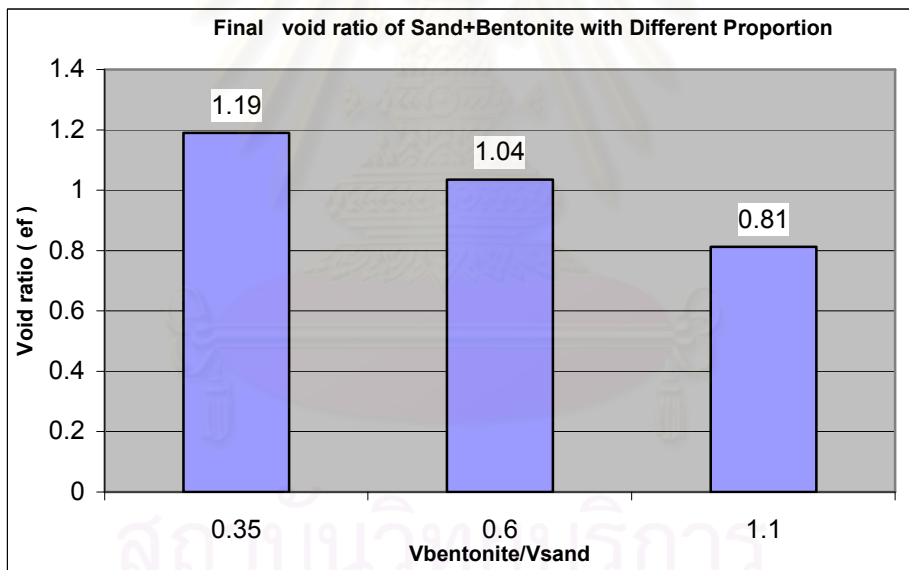
At Low stress , Maximum vertical Effective Stress = 12.8 ksc									
No.	Sample no.	Mixing					Initial void Ratio (e_i)	Final void Ratio (e_f)	Different Void Ratio (de)
		Dry sand (g)	water (g)	Bentonite concentrate (%)	Bentonite Volume (ml)	Vbentonite/V sand			
1	CB5	300	30	7	10	0.1	1.66	1.19	0.47
2	CB6	300	30	7	40	0.35	1.30	1.03	0.26
3	CB7	300	30	7	85	0.75	0.93	0.81	0.12



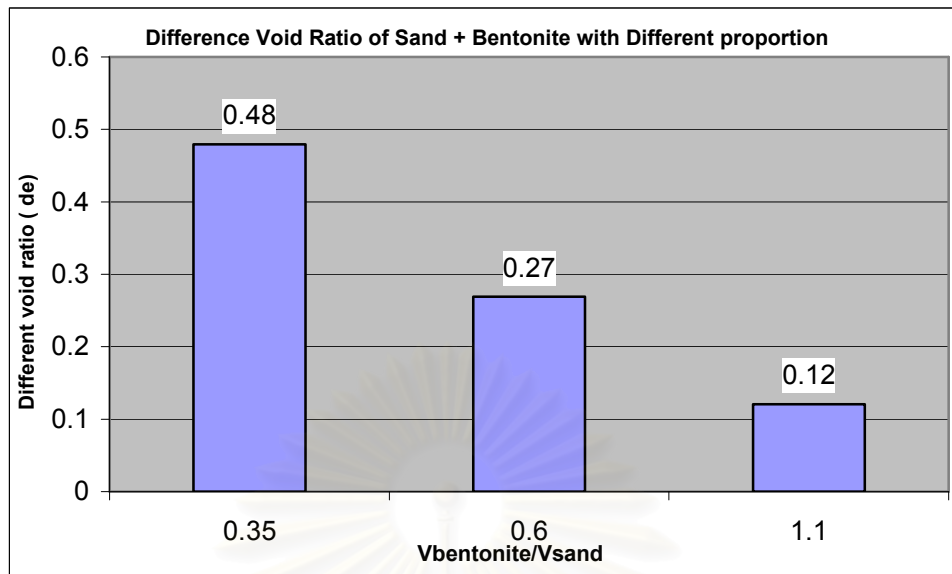
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Void Ratio กับ Vertical Stress ของ ดิน ทรายผสม เบนโทไนท์ ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.9 แสดงค่า Initial Void Ratio ของ Sand+ Bentonite ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 4.10 แสดงค่า Final Void Ratio ของ Sand+ Bentonite ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 4.11 แสดงค่า Difference Void Ratio ของ Sand+ Bentonite ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 ถึง 4.11 จะเห็นว่า การเพิ่มปริมาณ เบนโทไนท์ มีผลทำให้ค่า Compressibility ของดินลดลง ทั้งค่า Initial Void ratio , Final Void Ratio และ Difference Void Ratio ลดลง น่าจะเป็นเพราะว่า การเพิ่มปริมาณ เบนโทไนท์ เปรียบเสมือน การเพิ่มอนุภาคดินเล็กๆ เข้าไปแทรก ระหว่างเม็ดทราย ซึ่งเป็นการทำให้ Void Ratio ของมวลดินรวม ลดลง ซึ่งเปรียบเสมือนว่า ดินใน Soil Chamber ที่ผสมกับเบนโทไนท์ จะมีความสามารถในการรับแรง และกระจายแรงได้นุ่มนวลน้อยกว่าการใช้โฟม การกระจาย Face pressure จาก Bulk Head ไปสู่ Cutting Face ก็อาจควบคุมได้ยาก ค่า Face pressure จะ มีความผันผวนค่อนข้างมาก (Sensitivity สูง) ซึ่งจะทำให้การควบคุมหัวเจาะทำได้ลำบาก ต้องคอยปรับแรงดัน และ ปรับค่า Screw Conveyor Speed อยู่ตลอดเวลา ทำให้ต้องใช้เวลาขุดเจาะที่มากขึ้น ซึ่งท้ายที่สุดแล้วจะมี ผลทำให้ค่า Ground Surface Settlement สูงขึ้นด้วย

4.1.3 การทดสอบ Power Consumption

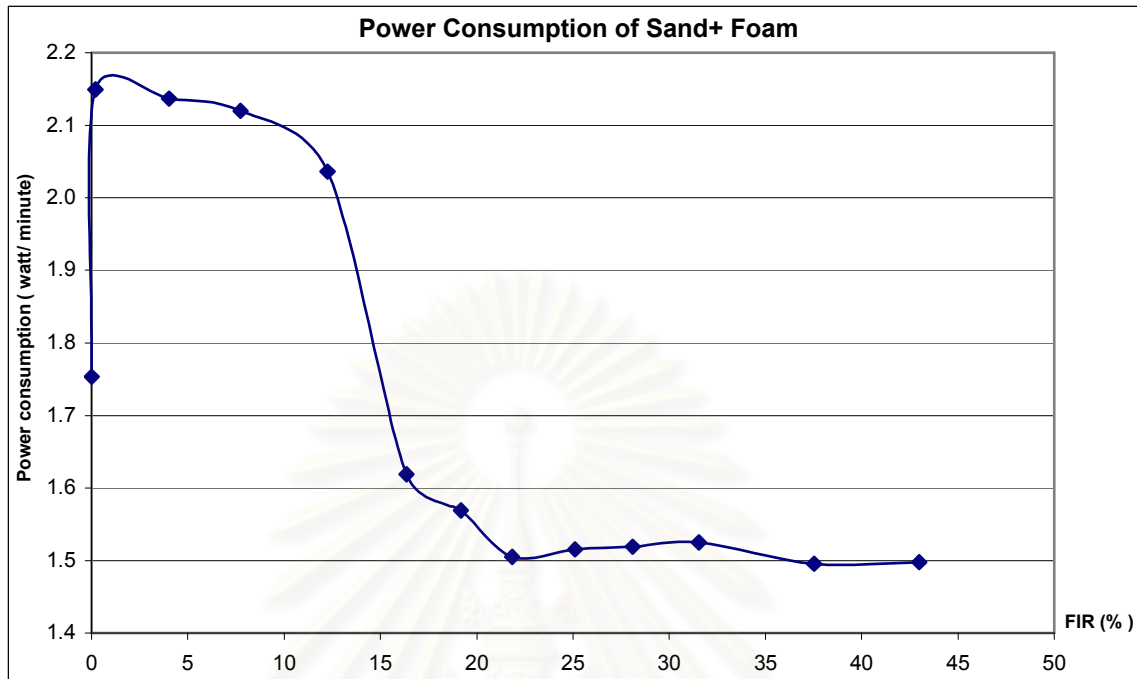
การทดสอบ Power Consumption นี้ เป็นการจำลอง สภาพหัวเจาะอุโมงค์ว่า เมื่อมีการฉีด โฟม และ เบนโทไนท์ ผ่าน ท่อ (Nozzle) ไปยังดินที่อยู่บริเวณหน้าหัวเจาะ (Cutting Disc)แล้ว มีผลต่อค่า Cutter Head Torque ของหัวเจาะอย่างไร โดยจะใช้เครื่องปั่นดิน และใบพัด แทนหัวเจาะอุโมงค์ และใส่ดินให้เต็มหม้อผสมดิน แทนตัวอุโมงค์ ทำการปั่นดิน โดยใช้เครื่อง TOU Meter (Watt Meter) วัด กำลังไฟฟ้าที่เครื่องปั่นดินใช้ในการปั่นดิน โดยในแต่ละตัวอย่าง จะทำการปั่นจนกระทั่ง ตัวอย่างดิน ดูเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) โดยในแต่ละตัวอย่างจะทำการจับเวลาที่ใช้ในการปั่น แล้วนำไปหาร พลังงานที่ใช้ โดย ค่า Torque ที่ได้ จะมีหน่วย เป็น Watt/ Minute การทดสอบจะทำการเพิ่มปริมาณ โฟม และ เบนโทไนท์ ขึ้นไปเรื่อยๆ และวัดพลังงานส่วนผสมละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย

4.1.3.1 การทดสอบ Power Consumption ของ ทราย ผสม โฟม

การทดสอบจะเริ่มจากทำการปั่น Dry Sand น้ำหนัก 3000 g ก่อน ทำการวัดค่าพลังงานที่ใช้ 3 ครั้ง หลังจากนั้น เติมน้ำลงไป 10 % (300 g) และ ค่อยๆเพิ่ม ปริมาณ โฟมขึ้นไปเรื่อยๆ โดยใช้ค่า FIR (Foam Injection Ratio) ตั้งแต่ 4 % จนถึง 43 % ซึ่งเป็นจุดที่พลังที่ใช้ เริ่มคงที่แล้ว จึงหยุดการทดสอบ โดยค่า FER (Foam Expansion Ratio) ที่ใช้ คือ FER = 20 % ค่าเดียว ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในโครงการนี้ และใช้กันเป็นมาตรฐานโดยทั่วไป โดยได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ ในรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนผสม และ Power consumption ของ ทรายผสม โฟม ที่ส่วนผสมต่างๆ

Dry Sand 3000 g + Foam (FER 20 %)													
Sample no.	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	PF7	PF8	PF9	PF10	PF11	PF12	PF13
Dry Sand (g)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Foam volume	0	0	60	120	200	280	340	400	480	560	660	860	1080
FIR (%)	0	0	4.02	7.73	12.25	16.35	19.19	21.83	25.10	28.11	31.55	37.52	42.99
Water Content (%)	0	10	10.1	10.2	10.4	10.6	10.8	10.9	11.1	11.3	11.5	12	12.5
Power consumption(watt/min),1 st Test	1.73	2.13	2.13	2.09	2.12	1.61	1.51	1.50	1.53	1.51	1.51	1.48	1.49
Power consumption(watt/min), 2 nd test	1.76	2.15	2.14	2.12	2.12	1.62	1.58	1.51	1.51	1.50	1.53	1.50	1.47
Power consumption(watt/min), 3 rd test	1.76	2.15	2.13	2.13	2.13	1.617	1.59	1.50	1.49	1.53	1.52	1.49	1.52
Power consumption(watt/min), Average	1.75	2.14	2.13	2.11	2.13	1.61	1.56	1.50	1.51	1.51	1.52	1.49	1.49



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Power Consumption ของตัวอย่าง ทราย ผสม โฟม ที่ เปอร์เซนต์ FIR ต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่า เมื่อมีการเติมน้ำลงไปจะทำให้พลังงานเพิ่มขึ้น จากพลังงานที่ใช้ปั้น Dry Sand คือ 1.75 watt/min ไปเป็น 2.15 watt/min (Water content = 10 %) หลังจากนั้นพอเติม โฟมลงไป พลังงานที่ใช้ในการปั้นจะลดลงเรื่อยๆ จนเหลือ ประมาณ 1.5 watt/min ซึ่ง ณ.จุดนี้ตัวอย่างดินมีค่า Water Content เพียง 12.5 % เท่านั้น เพิ่มขึ้นจากจุดที่พลังงานสูงสุด ซึ่งมี Water Content 10 % เพียง 2.5 % ซึ่งจะเห็นว่า การเพิ่มปริมาณ โฟม มีผลทำให้พลังงานที่ใช้ปั้นดินลดลงอย่างมาก และไม่ทำให้ตัวอย่างดินมีค่า Water Content ที่สูงนัก โดย จากตัวอย่างนี้ จะเห็นว่า พลังงานที่ใช้ในการปั้นดิน ลดลงถึง 30 % เลยทีเดียว ซึ่งการทดสอบนี้เปรียบเสมือนการหาค่า Cutter Head Torque ของหัวเจาะอุโมงค์ การที่พลังงานที่ใช้ลดลง น่าจะมีสาเหตุมาจากการที่ ฟองโฟม เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างเม็ดดิน ทำให้ Void Ratio ของดิน เพิ่มขึ้น และลดแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินลง

4.1.3.2 การทดสอบ Power Consumption ของ ทราบ ผสม เบนโทไนท์

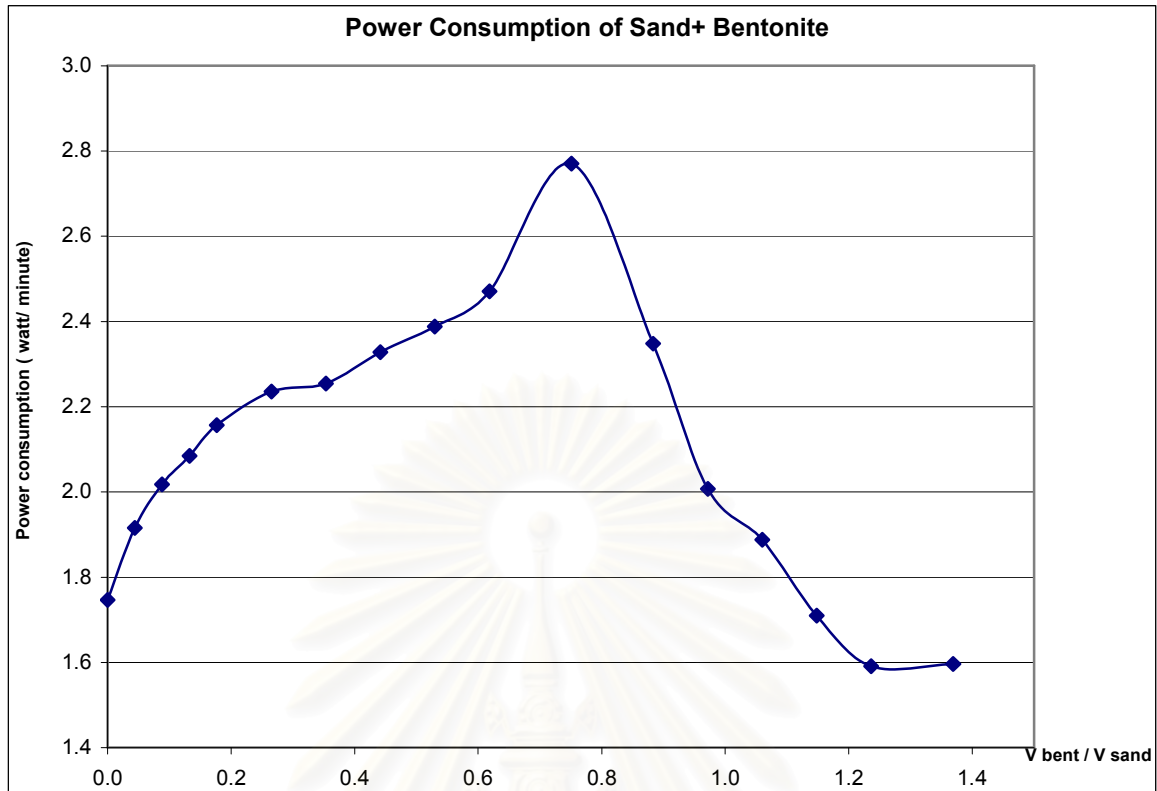
การทดสอบจะทดสอบเหมือนกับการทดสอบ กับ โฟม คือ ทำการวัดพลังงานที่ใช้ปั้น Dry Sand น้ำหนัก 3000 g หลังจากนั้น ค่อยๆเพิ่ม ปริมาณ เบนโทไนท์ขึ้น โดยใช้ค่า V Bentonite / V Soil ตั้งแต่ 0.04 -1.37 โดยใช้เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น ของเบนโทไนท์ เท่ากับที่ใช้ในโครงการนี้ คือ 7 % และทำการวัดพลังงานที่ใช้ปั้นดิน ตัวอย่างละ 3 ค่า แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.13 – 4.14



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราส่วนผสม และ Power consumption ของ ทราบ ผสม เบนโทไนท์ ที่ส่วนผสมต่างๆ

Dry Sand 3000 g + Bentonite (7 % Concentrate)																	
Sample no.	PB1	PB2	PB3	PB4	PB5	PB6	PB7	PB8	PB9	PB10	PB11	PB12	PB13	PB14	PB15	PB16	PB17
Dry Sand	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Bentonite volume	0	50	100	150	200	300	400	500	600	700	850	1000	1100	1200	1300	1400	1550
V bent / Vsand	0.00	0.04	0.09	0.13	0.18	0.27	0.35	0.44	0.53	0.62	0.75	0.88	0.97	1.06	1.15	1.24	1.37
Water Content (%)	0.00	1.55	3.10	4.65	6.20	9.30	12.40	15.50	18.60	21.70	26.35	31.00	34.10	37.20	40.30	43.40	48.05
Power consumption(watt/min) 1 st Test	1.75	1.92	2.00	2.07	2.14	2.21	2.26	2.33	2.36	2.42	2.73	2.35	2.02	1.91	1.67	1.58	1.56
Power consumption(watt/min) 2 nd Test	1.74	1.90	2.02	2.10	2.16	2.27	2.23	2.33	2.37	2.57	2.77	2.33	1.98	1.80	1.76	1.59	1.54
Power consumption(watt/min) 3 rd Test	1.74	1.92	2.02	2.07	2.16	2.22	2.26	2.31	2.41	2.41	2.80	2.36	2.00	1.95	1.69	1.592	1.67
Power consumption(watt/min) average	1.74	1.91	2.01	2.08	2.15	2.23	2.25	2.32	2.38	2.47	2.77	2.34	2.00	1.88	1.70	1.59	1.59

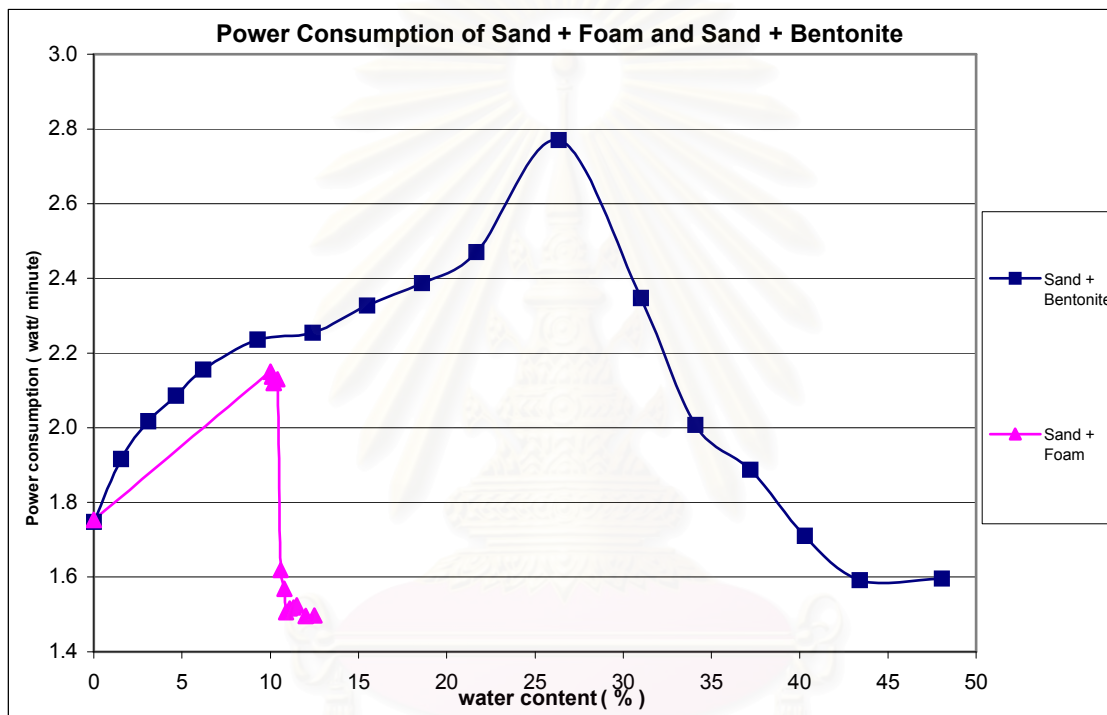


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Power Consumption กับ ปริมาณ เบนโทไนท์ ที่ผสมกับทราย ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าการเพิ่ม ปริมาณ เบนโทไนท์ ไม่เพียงแต่ไม่ช่วยลด ค่า Cutter Head Torque แล้ว แต่ยังทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ปั่นดินสูงขึ้น โดยพลังงานเพิ่มขึ้นจาก 1.8 watt/min ไปถึง 2.7 watt/min ซึ่ง เพิ่มขึ้นถึง 50 % เลยทีเดียว แต่พอเพิ่มปริมาณ เบนโทไนท์จนถึงจุดๆ หนึ่ง พลังงานจึงเริ่มลดลงมา ซึ่ง ณ.จุดนั้น ค่า Water Content ของตัวอย่างเท่ากับ 27 % ซึ่งดินมีสภาพ เป็น Saturated Sand ไปแล้ว ซึ่งถ้าดินอยู่ในสภาพ Saturated การควบคุม Face Pressure และการ ลำเลียงดินออกจากหัวเจาะ จะทำได้ลำบากมาก

4.1.3.3 การเปรียบเทียบ ค่า Power Consumption ของ ทราย ผสม โฟม กับ ทราย ผสม เบนโทไนท์ ที่ Water Content ต่างๆ

ปัจจัย หนึ่งที่สำคัญ ในการควบคุมการขุดเจาะอุโมงค์ ให้ได้มีคุณภาพ คือ ค่า Water Content ที่เหมาะสม ของดินใน Soil Chamber เพราะ ค่า Water Content ที่ สูงเกินไป จะทำให้การลำเลียงดิน ออกจากหัวเจาะ ทำได้ลำบาก ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบ ค่า Power Consumption ของ เครื่องปั้นดิน ที่ Water Content ต่างๆ ได้ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4. 14 แสดง การเปรียบเทียบ Power Consumption ของ ทราย ผสม โฟม กับ ทราย ผสม เบนโทไนท์ ที่ Water content ต่างๆ

จากรูปที่ 4.14. จะเห็นว่า โฟม สามารถลดพลังงานในการปั้นดิน ได้มากกว่า เบนโทไนท์ โดยไม่ทำให้ค่า Power Consumption เพิ่มขึ้นเลย นับตั้งแต่ เริ่มใส่โฟม จากกราฟของโฟม ที่เห็นว่า พลังงานเพิ่มขึ้นจากจุดแรกไปจุดที่สองนั้น คือการเพิ่มปริมาณ น้ำ อย่างเดียวแต่หลังจากเริ่มเติม โฟม ลงไป พลังงาน จะลดลงเรื่อยๆ โดยค่า Water Content ของตัวอย่างทราย ผสม โฟม ที่จุดพลังงานต่ำสุดเท่ากับ 12.5 % ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทราย ที่ผสม กับ เบนโทไนท์ พลังงานจะเริ่มลดลง เมื่อค่า Water Content ของตัวอย่าง เท่ากับ 27 % และจะลดลงถึงจุดที่พลังงาน ใกล้เคียงกับจุดที่พลังงานที่ใช้ต่ำสุด ของตัวอย่างโฟม (1.5 Watt/Min) เมื่อค่า Water Content ของตัวอย่าง มีค่า เท่ากับ 48 % ซึ่งจะเห็นว่าที่จุดที่ใช้พลังงานเท่ากัน ค่า Water Content ของตัวอย่าง ทรายผสมโฟม

กับ ทราย ผสม เบนโทไนท์ จะต่างกันโดยสิ้นเชิง ซึ่งค่า Water Content ถือว่า เป็นปัจจัยสำคัญ ที่จะ ทำให้ดินในหัวเจาะ มีค่า Plasticity ที่พอเหมาะ สามารถ กระจาย Face Pressure ได้ดี และ ถ้าเลี้ยง ดินออกจากหัวเจาะ โดยผ่าน Screw Conveyor ออกไปได้ง่าย และต่อเนื่อง ซึ่งดินจะต้องมีความเหนียว เพียงพอ ไม่ละเอียด จนเกินไป

ที่อัตราส่วนของ เบนโทไนท์ซึ่งใช้กันทั่วไปใน งานอุโมงค์ คือ $V \text{ bentonite} / V \text{ soil} = 0.22$ นั้น ค่า Power Consumption ประมาณ 2.2 Watt/Min ส่วนของโฟมที่ Water Content เดียวกันนั้น ค่า Power Consumption ประมาณ 1.6 Watt/Min นั่นก็คือที่ค่า Water Content ที่เหมาะสมนั้น เบนโทไนท์ ไม่มีประโยชน์ต่อการลดพลังงานหัวเจาะ ส่วนจุดที่งานที่ใช้ค่านั้นค่า Water Content ก็สูงเกินไป ไม่สามารถทำงานได้



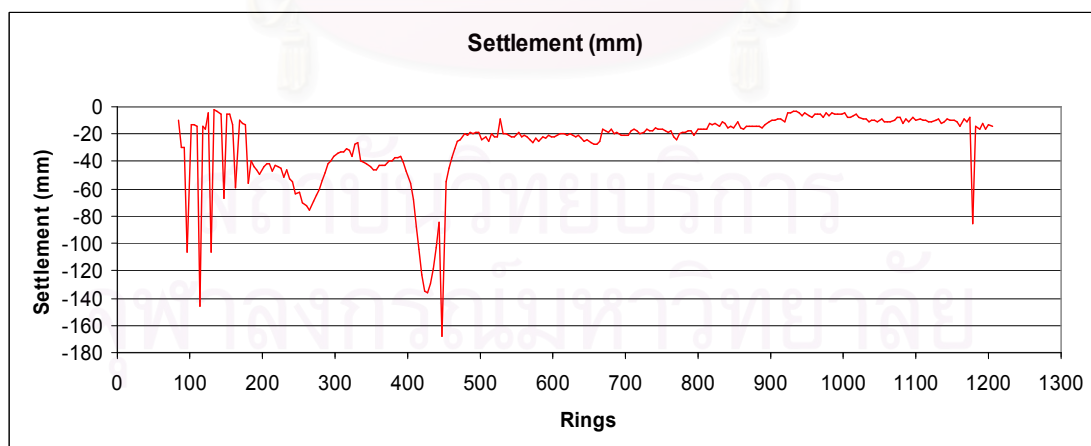
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากสนาม (Tunnel Boring Machine Record)

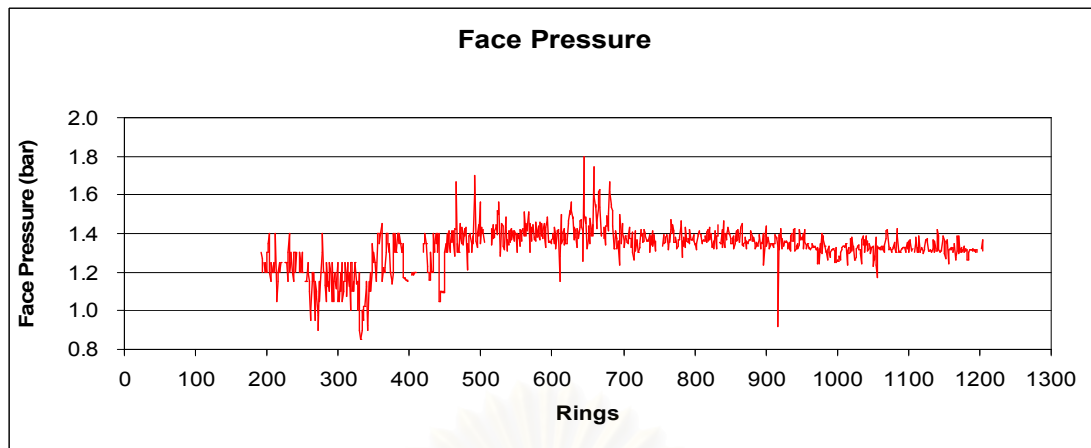
ข้อมูลหัวเจาะที่เก็บได้จากสนาม จะมีการทำบันทึกไว้ทุก Ring โดยแต่ละช่วงของการขุดเจาะอุโมงค์ จะมีปัจจัยกระทบ หลายอย่าง ไม่เหมือนกัน เราจึงจะทำการศึกษา วิเคราะห์ ว่าแต่ละปัจจัย มีผลต่อ ค่า TBM Record อย่างไรบ้าง โดยในการวิเคราะห์ นี้ เราจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ มาช่วยวิเคราะห์ด้วย เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรม ของดิน ในหัวเจาะ EPB มากขึ้น โดย ค่า TBM Record ที่จะทำการศึกษาประกอบ ไปด้วย

- ❑ Surface Settlement
- ❑ Face Pressure
- ❑ Cutter Torque
- ❑ Penetration Rate
- ❑ Screw conveyer speed
- ❑ Push Pressure
- ❑ Articulate Pressure

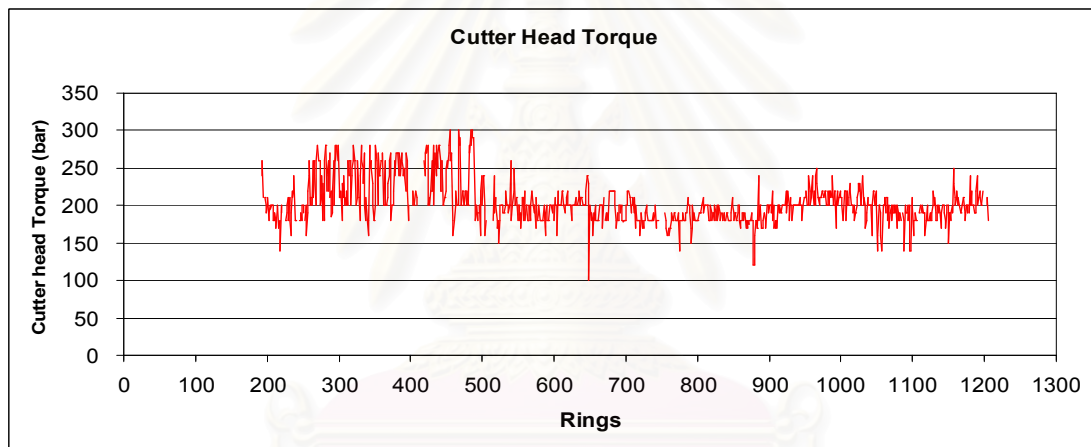
โดยข้อมูล TBM Record ที่นำมาศึกษา ใช้ตั้งแต่ Ring No. 192 – Ring No. 1205 หรือ Station 0+120 – Station 1+ 437 ดังแสดงในรูปที่ 4.15(a) – 4.15 (g)



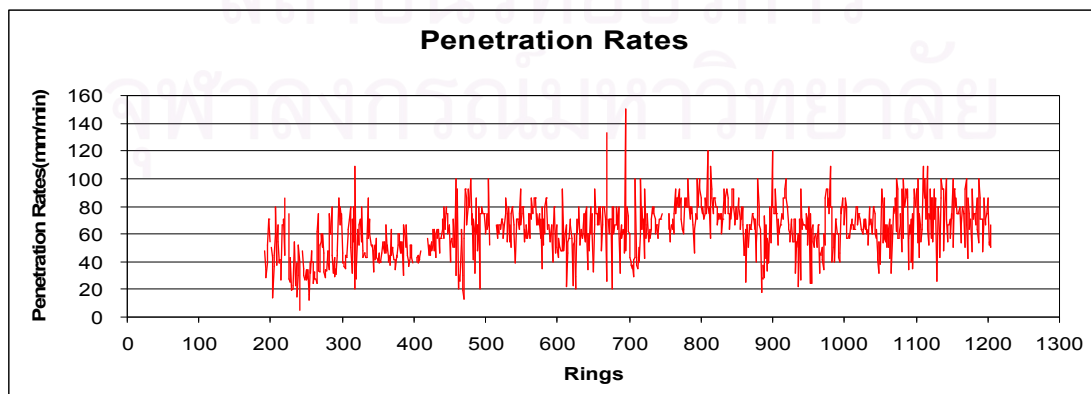
รูปที่ 4.15 (a) ค่า Ground Surface Settlement (mm) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205



รูปที่ 4.15 (b) ค่า Face Pressure (Bar) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205



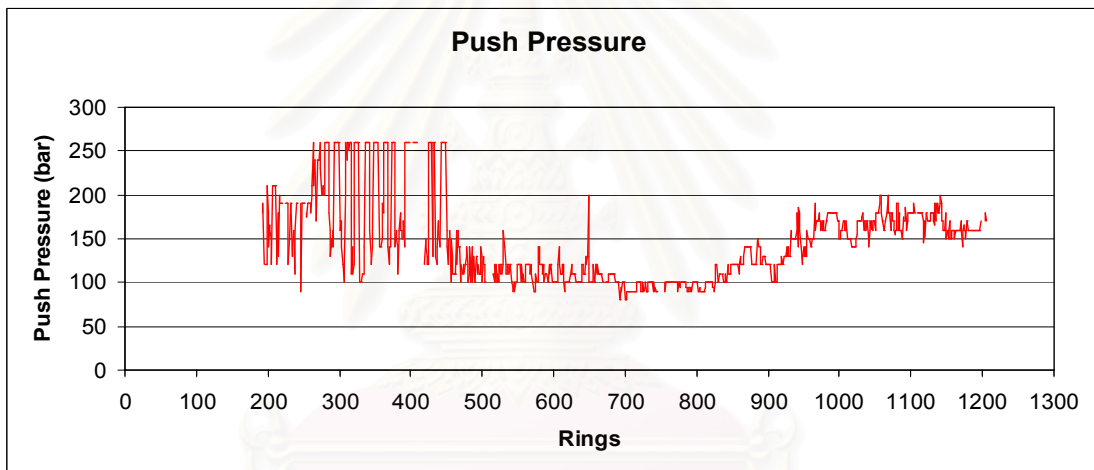
รูปที่ 4.15 (c) ค่า Cutter Head Torque (Bar) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205



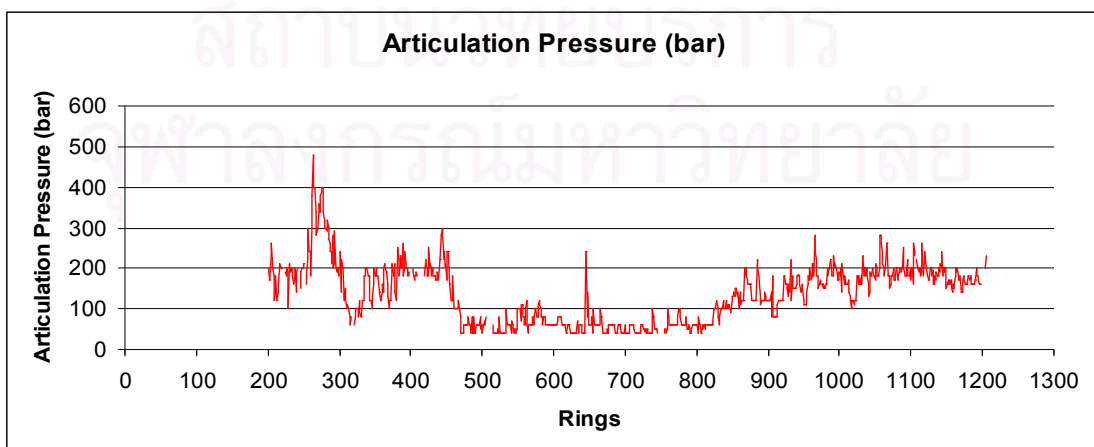
รูปที่ 4.15 (d) ค่า Penetration Rate (minute) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205



รูปที่ 4.15 (e) ค่า Screwconveyor Speed (Rev / minute) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205



รูปที่ 4.15 (f) ค่า Push Pressure (Bar) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205



รูปที่ 4.15 (g) ค่า Articulate Pressure (Bar) ที่ Ring No. 192 – Ring No. 1205

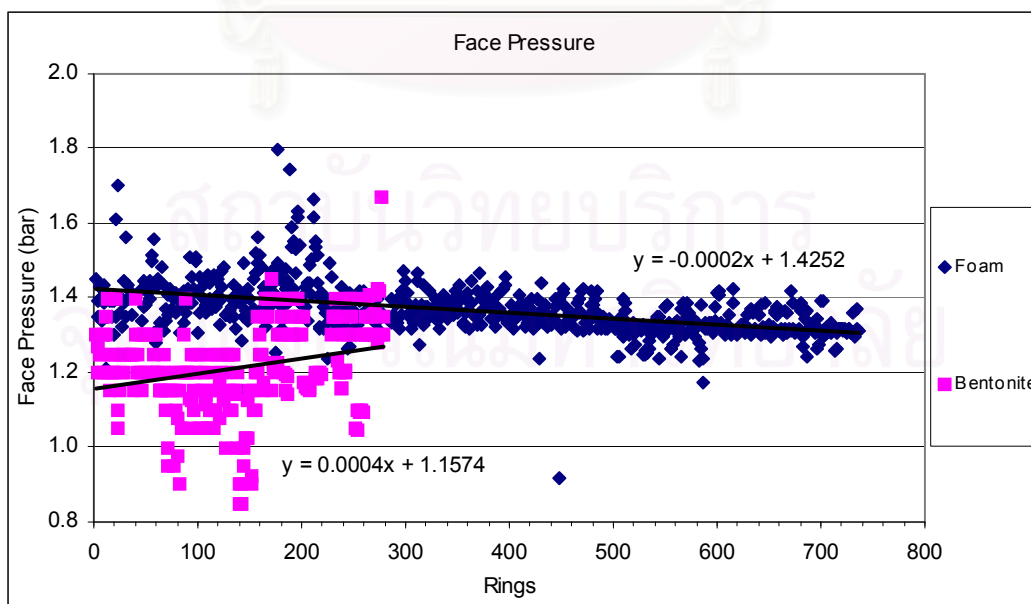
โดยปัจจัยกระทบ ที่จะทำการศึกษา แบ่งออกเป็น 4 อย่างคือ

- การใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม ในการขุดเจาะอุโมงค์
- การใช้ โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม ในการขุดเจาะอุโมงค์
- การขุดเจาะอุโมงค์ในทางตรง
- การขุดเจาะอุโมงค์ในทางโค้ง

โดยช่วงแรกที่ทำกรขุดเจาะอุโมงค์ ทางโครงการได้ใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม ซึ่งเกิดปัญหาทางด้าน ค่า Ground Surface Settlement จึงเปลี่ยน มา ใช้ โฟมแทน โดย เริ่มใช้ โฟมที่ Station ประมาณ 0+570 (Ring No. 470) เป็นต้นไป ส่วนการขุดเจาะอุโมงค์ ในทางตรง และ ในทาง โค้งจะมีสลับกัน ไปเรื่อยๆ ตลอดเส้นทางขุดเจาะ

4.2.1 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ Face Pressure โดยเปรียบเทียบ ช่วงที่ใช้โฟม กับ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม

ค่า Face Pressure ถือว่าเป็น ตัวแปร ที่สำคัญมากในการขุดเจาะอุโมงค์ ด้วยวิธี EPB เนื่องจากมีผลต่อค่า Ground Surface Settlement โดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปจะต้องพยายามรักษาค่า Face Pressure ให้เท่ากับ ค่า At Rest Pressure โดยค่า Face Pressure ที่แนะนำในชั้นทราย ของโครงการนี้ ที่ค่าประมาณ 1.5 bar ในดินแข็งประมาณ 1.0 bar และ Acceptance Criteria of Face Pressure = ± 0.2 bar โดยเมื่อนำค่า Face Pressure ตั้งแต่ Ring No. 192 – Ring No. 1205 มาพล็อตกราฟ โดยแบ่ง ปัจจัย กระทบ ออกเป็น 2 อย่าง คือ ช่วงที่ใช้ โฟม กับ ช่วง ที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.16

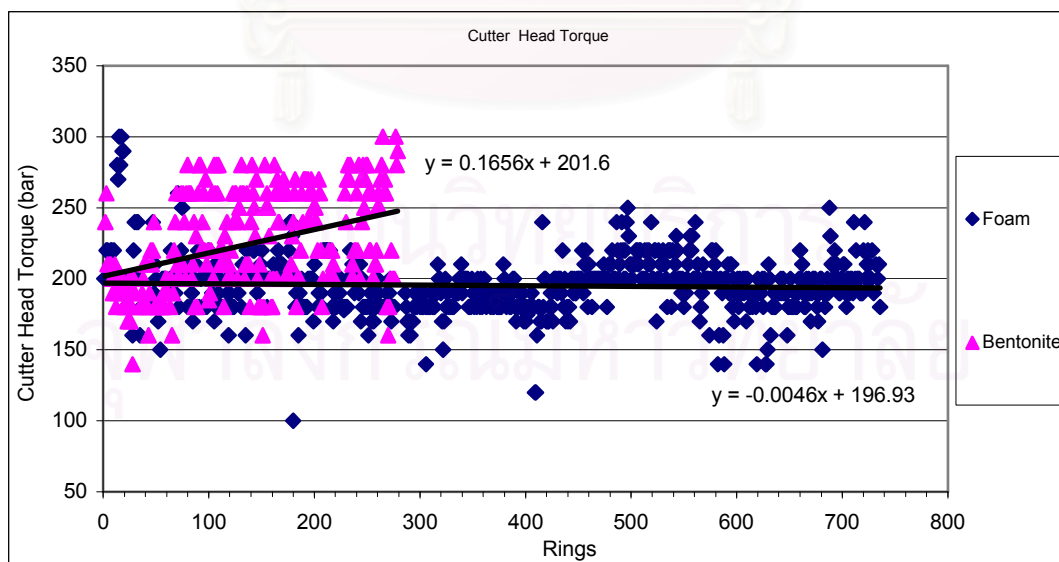


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบ ค่า Face Pressure (bar) ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าช่วงที่มีการใช้ โฟม เป็นสารผสมเพิ่มค่า Face pressure จะมีค่าที่คองที่ มากกว่า เบนโทไนท์ มีการกระจายตัวของ Face pressure น้อยกว่า โดย โฟมจะมีการกระจายตัวของ Face pressure ตั้งแต่ 1.3 – 1.5 bar แต่ เบนโทไนท์ จะมีการกระจายตัวของ Face Pressure ค่อนข้างมาก ตั้งแต่ 0.9 - 1.4 bar แสดงถึงว่า การควบคุม Face pressure สามารถ ทำได้ดีกว่าการใช้ เบนโทไนท์มาก ซึ่งจากผลการทดสอบหาค่า Compressibility ที่ทำได้ทำไว้ จะเห็นว่า ค่า Compressibility ของ ทราย ผสม โฟม จะมีค่า Compressibility ที่สูงกว่าทรายปกติ และ ทรายผสม เบนโทไนท์ มาก ซึ่งแสดงถึงว่า ดินใน Soil Chamber ที่ผสมกับ โฟม จะมีความ นุ่ม มีสภาพคล้าย เาะนวนม สามารถ รับ และ กระจายแรงดัน จาก Push Pressure ไปสู่ Face Pressure ได้ดีกว่า ทำให้ ดินนุ่มและมีความยืดหยุ่น ใน การทำงาน สูงกว่า สามารถกระจายแรงดันได้ นุ่มนวล (Smooth) กว่า และทำให้ ค่า Pressure ใน Soil Chamber จะมีความเสถียร (Consistency) มากกว่า ซึ่งการที่ สามารถควบคุม Face pressure ได้ดี จะส่งผลที่ดีต่อค่า Ground surface Settlement ด้วย

4.2.2 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ Cutter Head Torque โดยเปรียบเทียบ ช่วงที่ ใช้โฟม กับ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสาร ผสมเพิ่ม

ค่า Cutter Head Torque เป็นตัวแปรหนึ่งที่ แสดงถึงสภาพดินหน้าหัวเจาะ ถ้าดินหน้าหัว เจาะมีความ แน่น หรือ เหนียว มาก จะทำให้ ค่า Torque สูง ซึ่ง สามารถลดค่า Torque ได้ โดยการ ใช้สารผสมเพิ่ม ทำให้ดินหน้าหัวเจาะ ลื่นขึ้น หรือ มี Void Ratio เพิ่ม ขึ้น ซึ่งเมื่อนำข้อมูล Ring ต่างๆ มาพล็อต โดยแยกเป็น ช่วงที่ใช้ โฟม กับ ช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.17

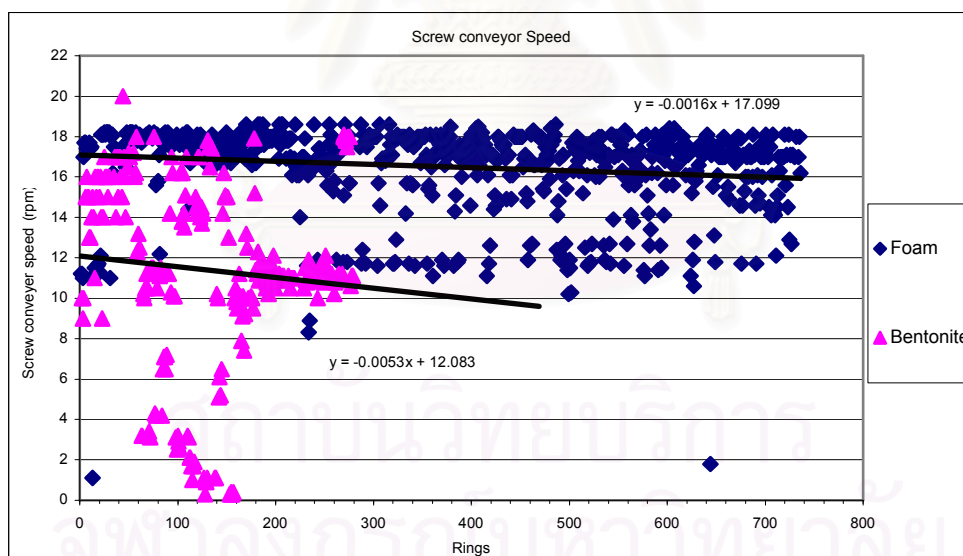


รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบ ค่า Cutter Head Torque(bar) ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับ ช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่า ค่า Cutter Head Torque ช่วงที่ใช้โฟมเป็นสารผสมเพิ่ม จะมีค่าต่ำกว่า ช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ คือ มีค่า ประมาณ 140 – 220 bar เฉลี่ยอยู่ที่ 200 bar ในขณะที่ เบนโทไนท์ มีค่าประมาณ 180 – 280 bar เฉลี่ยอยู่ที่ 240 bar จะเห็นว่า โฟมมีส่วนช่วย ในการลด Cutter Head Torque ลงได้มากซึ่ง ตรงกับผลการทดลอง Power Consumption Test ที่พลังงานที่ใช้ปั้นดินของทรายผสม กับ โฟม มีค่า น้อยกว่า ทราย ผสมกับเบนโทไนท์ มาก น่าจะมีสาเหตุมาจาก โฟม ทำให้ Void Ratio ของดิน เพิ่มขึ้นมาก และ ทำให้แรงยึดเหนี่ยว ระหว่าง เม็ดดิน ลดลง

4.2.3 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ Screw Conveyor Speed โดยเปรียบเทียบ ช่วงที่ ใช้โฟม กับ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสาร ผสมเพิ่ม

ค่า Screw Conveyor Speed คือความเร็วรอบของ สายพานลำเลียงดินที่ใช้ ลำเลียงดินออกจาก Soil Chamber โดยทั่วไป แล้วจะสัมพันธ์ กับปริมาณ ดินชุดที่เข้ามาทางด้านหน้าหัวเจาะ คือ ปริมาณดินออกจากหัวเจาะ ต้องเท่ากับ ปริมาณดินเข้าสู่หัวเจาะ และเมื่อนำข้อมูลที่ Ring No.ต่าง ๆ มา พล็อตกราฟ โดยแยกเป็นช่วงใช้โฟม กับ ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบ ค่า Screw Conveyor Speed (Round/Minute , rpm) ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม

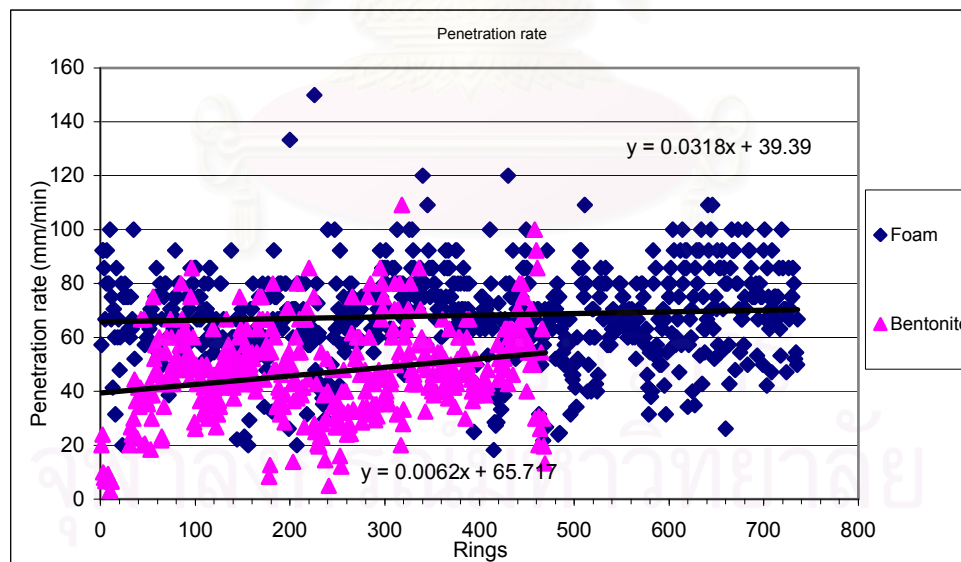
จากรูป ที่ 4.18 จะเห็นว่าช่วงที่ใช้โฟมเป็นสารผสมเพิ่ม ค่า Screwconveyor Speed จะสูง และคงที่ กว่าช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ เนื่องมาจาก ดินที่ ผสม กับ โฟม จะมีค่า Water content น้อย เพราะว่ามีส่วนประกอบหลัก กว่า 90 % ของ โฟมคือ อากาศ มีน้ำเพียง 10 % ทำให้ดินมีความเหนียว

เหมาะสมกว่า โดย โฟมจะทำการเรียงอนุภาคเม็ดดินใหม่ ให้กระจายออกจากกัน และ เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน โดย มี โฟมเป็นตัวยึด ทำให้ดิน ไม่เหนียวจนเกินไป และ ไม่ละเอียดเกินไป สามารถลำเลียง ผ่าน Screw Conveyor ได้ รวดเร็ว และต่อเนื่อง ส่วน ดินที่ผสมกับ เบนโทไนท์ จะมีสภาพค่อนข้างละเอียด เพราะส่วนประกอบหลัก กว่า 90 % ของเบนโทไนท์ คือ น้ำ ทำให้การลำเลียง ดินออกจาก หัวเจาะ ด้วย Screw Conveyor ทำได้ลำบาก เพราะดินจะไม่มี ความหนืดเพียงพอ

4.2.4 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ Penetration Rate โดยเปรียบเทียบ ช่วงที่ใช้โฟม กับ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม

ค่า Penetration Rate คือ อัตราการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ มีหน่วยเป็น mm/minute โดยทั่วไปสามารถคำนวณได้จาก เวลาที่ใช้ในการขับเคลื่อนหัวเจาะ รวม กับ การติดตั้ง Segment 1 วง ทหารด้วยความกว้างของ Segment วงนั้น ค่า Penetration Rate นี้ แสดงถึง ประสิทธิภาพในการขุดเจาะอุโมงค์ โดยทั่วไปถ้าไม่มีปัญหาอะไรแล้ว Segment 1 วง (1200 mm) ควรใช้เวลาขุดเจาะ ไม่เกิน 20 นาที ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับ ความสามารถของผู้ควบคุมหัวเจาะ (Shield Operator) ด้วย โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบ ค่า Penetration Rate ช่วงที่ใช้โฟม กับ ช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่

4.19



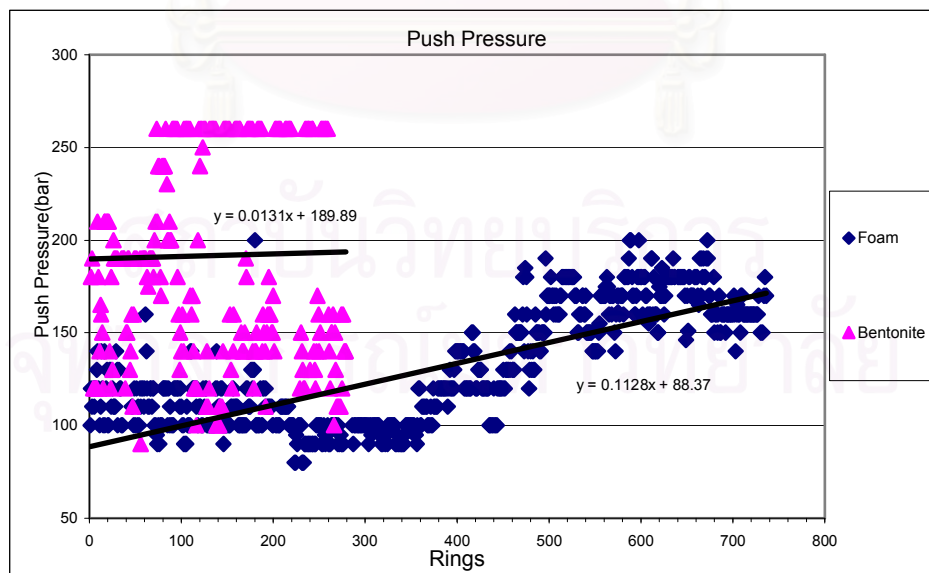
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบ ค่า Penetration Rate (mm/Minute)ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าช่วงที่มีการใช้ โฟมเป็นสารผสมเพิ่ม ค่า Penetration Rate โดยเฉลี่ย จะสูงกว่า ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ โดยช่วงที่ใช้โฟมจะมีค่า Penetration Rate ประมาณ 30 – 100

mm/min เฉลี่ยประมาณ 70 mm/min นั้นคือ Segment 1 วงกว้าง 1200 mm ใช้เวลาขับเคลื่อนหัวเจาะประมาณ 17 นาที ในขณะที่ ช่วงใช้เบนโทไนท์ที่มีค่า Penetration Rate ประมาณ 10 – 80 mm/min เฉลี่ยประมาณ 40 mm/min จะใช้เวลาขับเคลื่อนหัวเจาะ ต่อ Segment 1 วง ประมาณ 30 นาที ซึ่งเวลาในการขุดเจาะที่นานกว่า นี้ จะทำให้ดินที่อยู่ เหนือหัวเจาะ บริเวณ Tail Void ที่เกิดจากการ Over Cutting นั้น เกิดการทรุดตัวลงมาได้ ซึ่ง โดยทั่วไป บริเวณท้ายหัวเจาะจะทำการ อม Segment ที่เพิ่งติดตั้งไว้ 1 วง ยาวประมาณ 1.2 m ซึ่ง Segment วงนี้จะยังไม่สามารถทำการ Grout ปูนได้ต้องรอนกว่า หัวเจาะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า แล้ว Segment วงนั้นพ่น ท้ายหัวเจาะ (Shield Tail) ออกไปเสียก่อน จึงจะทำการ Grout ปูนได้ เพราะฉะนั้นการที่ ค่า Penetration Rate ต่ำนี้ แสดงว่าหัวเจาะเคลื่อนตัวไปข้างหน้าได้ช้า การ Grout ปูน บริเวณท้ายหัวเจาะก็จะทำได้ช้า ทำให้ดินบริเวณ ท้ายหัวเจาะ มีเวลาในการทรุดตัวมากขึ้น ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อค่าการทรุดตัวที่ผิวดิน

4.2.5 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ Push Pressure โดยเปรียบเทียบ ช่วงที่ ใช้โฟม กับ ช่วงที่ ใช้ เบนโทไนท์ เป็นสาร ผสมเพิ่ม

ค่า Push Pressure คือแรงดันรวมของ Thrust Jack แต่ละตัว รวมกันแล้วหารด้วยพื้นที่หน้าตัดหัวเจาะ ค่า Push Pressure โดยทั่วไปแล้วจะสัมพันธ์ กับ สภาพดินที่อยู่ บริเวณด้านหน้า และ รอบๆ หัวเจาะ ว่ามีความแน่น และ แรงเสียดทานมากแค่ไหน ซึ่งเมื่อนำข้อมูล โดยแยกเป็นกรณีที่ใช้ โฟม และ ใช้ เบนโทไนท์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.20

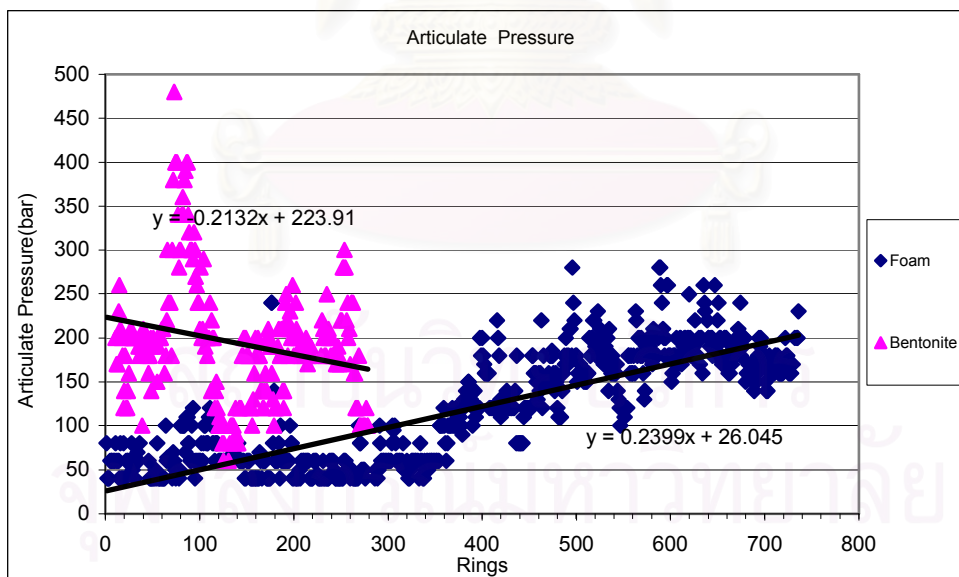


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบ ค่า Push Pressure ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับ ช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าช่วงที่ใช้ โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม ค่า Push Pressure จะต่ำกว่าช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ ช่วงที่ใช้ โฟมค่า Push pressure จะอยู่ระหว่าง 80 –200 bar ส่วนช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ ค่า Push pressure จะอยู่ระหว่าง 90 – 260 bar โดยมีจุดที่น่าสังเกตคือช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ ถึงแม้ว่าค่า Push pressure จะสูง แต่ค่าFace pressureที่เกิดขึ้นกับค่า ตรงกันข้ามกับ ช่วงที่ใช้ โฟมที่ค่า Push pressure ต่ำ แต่ค่า Face pressureที่เกิดขึ้น สูงกว่าช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ แสดงถึงว่า การใช้ โฟม ทำให้ดินใน Soil chamber สามารถ กระจายแรงดัน จาก Thurst Jack ผ่าน Soil Chamber ไปสู่ Cutting Face ได้ดีกว่า โดยสูญเสียพลังงานที่ใช้ (Push pressure) น้อยกว่า

4.2.6 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อ ค่า Articulate Pressureโดยเปรียบเทียบ ช่วงที่ ใช้โฟม กับ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสาร ผสมเพิ่ม

ค่า Articulate Pressure คือแรงดันที่ใช้ในการ บังคับทิศทางหัวเจาะ ถ้าขับเคลื่อนในทางตรงจะมีวิธีการทำงานคล้าย Thurst Jack แต่ถ้าขับเคลื่อนในทางโค้ง จะมีระยะยึดตัวของ Articulate Jack แต่ละตัวไม่เท่ากัน ค่า Articulate Pressure โดยทั่วไปแล้วจะสัมพันธ์ กับ Push Pressure โดยตรง ซึ่งเมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบช่วงที่ใช้โฟม กับ ใช้ เบนโทไนท์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.21

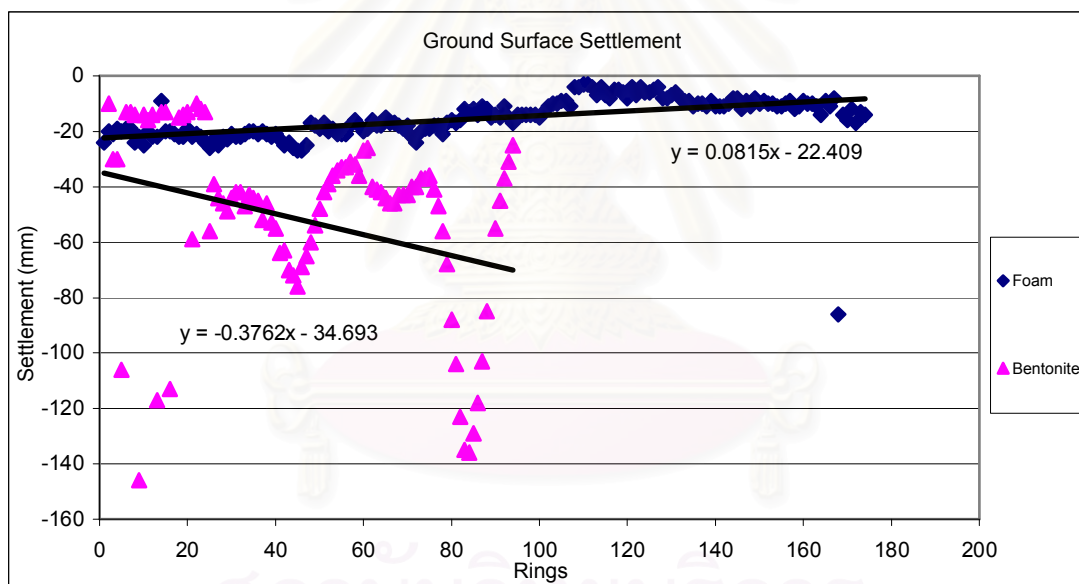


รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบ ค่า Articulate pressure ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม

จาก รูปที่ 4.21 จะเห็นว่า ค่า Articulate pressure จะมีแนวโน้มคล้ายกับค่า Push pressure คือช่วงที่ใช้ โฟม จะต่ำกว่าช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ ด้วยเหตุผลเดียวกันกับค่า Push pressure คือ ช่วงที่ใช้โฟมการส่งผ่าน pressure ผ่าน Soil chamber มีประสิทธิภาพมากกว่า สามารถควบคุมค่า Face pressure ตามที่ต้องการได้ง่ายกว่า จึงไม่จำเป็นต้องใช้ค่า Articulate pressure และ Push pressure ที่สูงนัก

4.2.7 การศึกษาปัจจัยกระทบ ที่มีต่อค่า Ground Surface Settlement โดยเปรียบเทียบ ช่วงที่ ใช้ โฟม กับ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสาร ผสมเพิ่ม

สาเหตุสำคัญที่ต้องมีการเปลี่ยน การใช้ผสมเพิ่ม จาก เบนโทไนท์ มาเป็น ใช้ โฟม แทน ก็คือ ค่า Ground Surface Settlement เพราะช่วงแรกที่มีการใช้ เบนโทไนท์ มีค่าทรุดตัวที่ผิวดินสูงถึง 140 mm จึงต้องเปลี่ยนมาใช้ โฟม แทน ซึ่ง เมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันจึง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบ ค่า Ground Surface Settlement ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงที่ใช้ โฟม กับ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าช่วงที่มีการใช้โฟม เป็นสารผสมเพิ่มมีค่า Ground Surface Settlement น้อยกว่าช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ มาก ช่วงที่ใช้โฟมมี ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินไม่เกิน 20 mm. ส่วนช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ มีค่าการทรุดตัวตั้งแต่ 30 – 140 mm. ซึ่งค่าการทรุดตัวที่สูงมากนี้เอง เป็นสาเหตุให้มีการเปลี่ยนสารผสมเพิ่มจาก เบนโทไนท์ มาเป็น โฟม ซึ่งก็ใช้ได้ผลดี ค่าการทรุดตัวลดลงมาก สาเหตุ หลักๆ น่าจะมาจาก 2 อย่างคือ

1) ค่า Face pressure ของช่วงที่ใช้โฟม สามารถควบคุมได้ดีกว่า ทำให้ได้ค่า Face pressure ตามที่ต้องการ ทำให้ทำงานง่าย และต่อเนื่อง เวลาที่ใช้ในการขุดเจาะต่อ Segment1 วงก็น้อยลง ทำให้เกิดการทรุดตัวน้อย และ ที่สำคัญคือ ค่า Face pressure ที่สม่ำเสมอนี้ ทำให้ดินถูกรบกวน (Disturb) น้อยกว่า ทำให้ค่า Modulus ของดินเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ ซึ่งค่า Face pressure จะขึ้นๆ ลงๆ ตลอดเวลา ทำให้ดินถูกรบกวนมาก ทำให้เกิดการทรุดตัวที่ผิวดินมากนั่นเอง

2) ค่า Penetration Rate ช่วงที่ใช้โฟม ค่า Penetration Rate จะสูงกว่า ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ มาก โดย ช่วงที่ใช้โฟม จะใช้เวลาในการขุด ประมาณ 17 นาทีต่อ 1 วง ขณะที่ ช่วงที่ใช้เบนโทไนท์ จะใช้เวลาในการขุดเจาะประมาณ 30 นาที ต่อ วง เลยทีเดียว ระยะ เวลาคอนกรีต ที่นานนี้ ทำให้ดินบริเวณ ท้ายหัวเจาะ (Shield Tail) ที่ยังไม่ได้ทำการ Grout ปูน เกิดการทรุดตัวลงมาได้ ทำให้เกิด Ground Surface Settlement ที่สูง



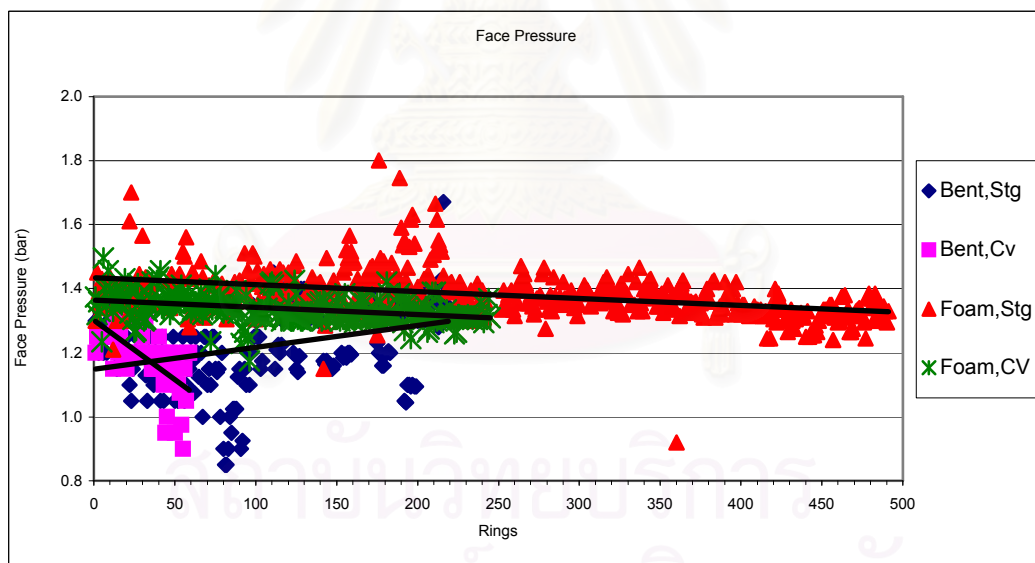
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.8 การศึกษาปัจจัยกระทบต่อหัวเจาะช่วงที่อุโมงค์อยู่ในทางตรง และช่วงอุโมงค์เข้าโค้ง

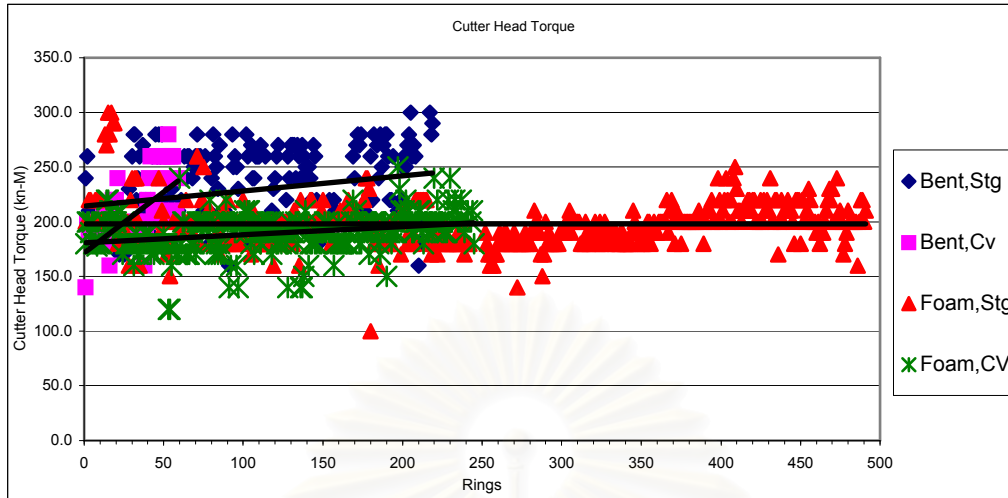
เมื่อนำข้อมูล TBM Record มาศึกษา โดยเปรียบเทียบช่วงที่อุโมงค์ขุดเจาะใน ทางตรง (Straight Route) และ อุโมงค์ ขุดเจาะในทาง โค้ง (Curve Route) และ เพื่อให้เห็นผลชัดเจนต้อง แยกการใช้สารผสมเพิ่มระหว่าง โฟม และ เบนโทไนท์ ด้วย โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ

- 1) ใช้ เบนโทไนท์ และ ขุดเจาะอุโมงค์ ในทางตรง (Bent,Stg)
- 2) ใช้ เบนโทไนท์ และ ขุดเจาะอุโมงค์ ในทางโค้ง (Bent,Cv)
- 3) ใช้โฟม และ ขุดเจาะอุโมงค์ ในทางตรง (Foam,Stg)
- 4) ใช้โฟม และ ขุดเจาะอุโมงค์ ในทางโค้ง (Foam,Cv)

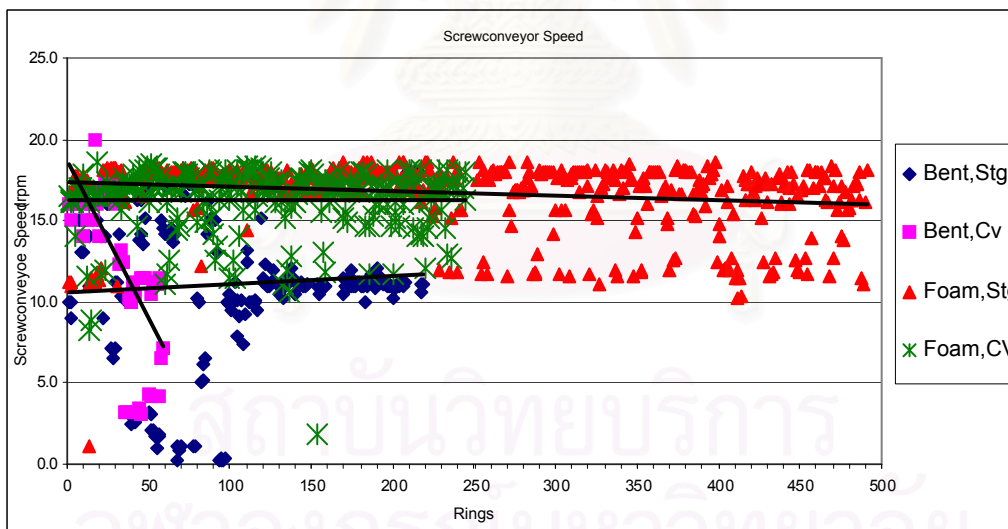
โดยจะเปรียบเทียบค่า TBM Record ทุกกรณีตั้งแต่ Face Pressure , Cutter Head Torque, Screwconveyor Speed , Penetration Rate, Push Pressure , Articulate Pressure , Ground Surface Settlement ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.23 – รูปที่ 4.29



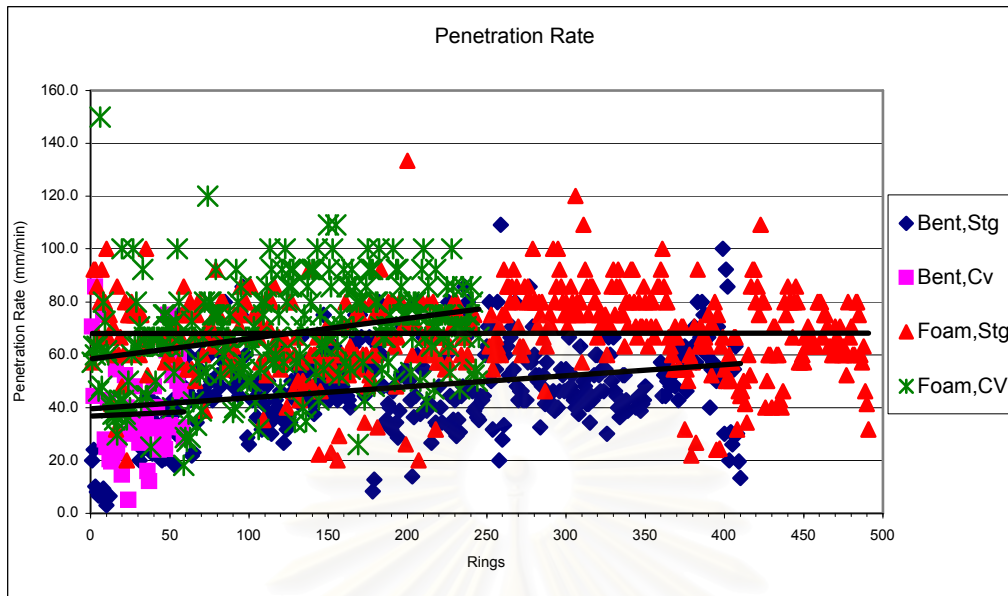
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบ ค่า Face Pressure ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง(Stg) และ ช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv)



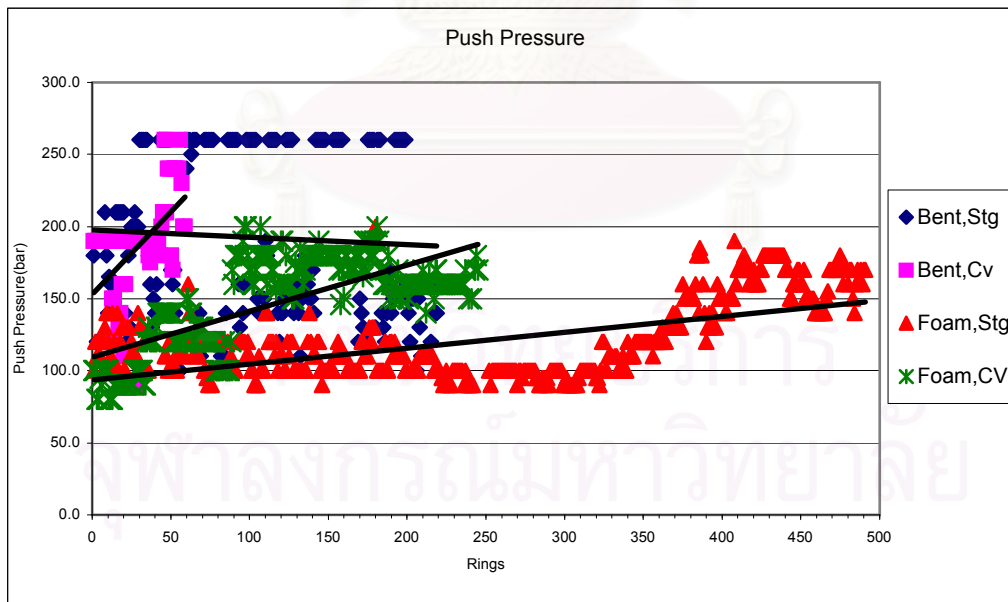
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบ ค่า Cutter Head Torque ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง(Stg) และ ช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv)



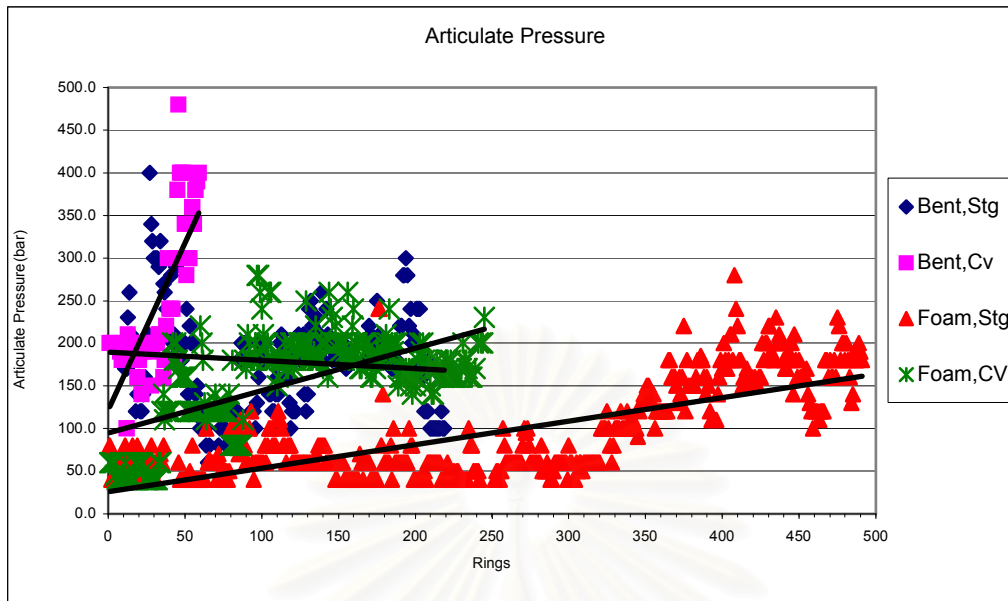
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบ ค่า Screwconveyor Speed ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง (Stg) และ ช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv)



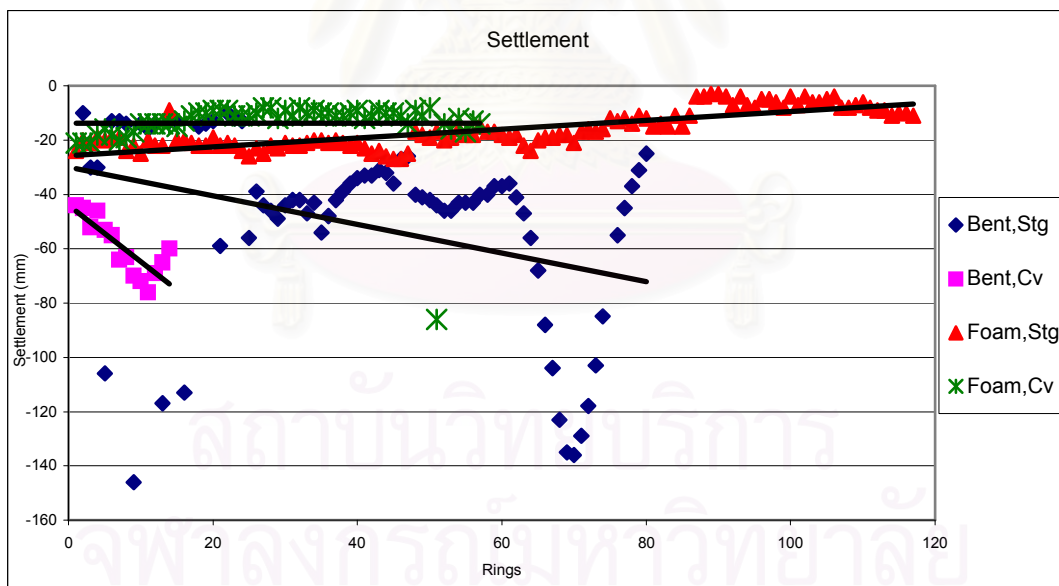
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบ ค่า Penetration Rate ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง(Stg) และ ช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv)



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบ ค่า Push Pressure ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง(Stg) และ ช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง(Cv)



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบ ค่า Articulate Pressure ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง (Stg) และ ช่วงที่อุโมงค์เข้าโค้ง(Cv)



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบ ค่า Ground Surface Settlement ที่ Ring ต่างๆ ของช่วงอุโมงค์อยู่ในทางตรง(Stg) และ ช่วงที่อุโมงค์เข้าโค้ง(Cv)

จาก รูปที่ 4.23 - 4.29 จะเห็นว่า การเปรียบเทียบค่าควบคุมหัวเจาะ ต่างๆ ทั้งค่า Face Pressure , Cutter Head Torque, Screwconveyor Speed , Penetration Rate, Push Pressure , Articulate Pressure และ Ground Surface Settlement กรณีหัวเจาะอยู่ในทางตรง และ หัวเจาะอยู่ในทางโค้ง จะไม่เห็นแนวโน้มความแตกต่างที่ชัดเจน ซึ่ง การเปรียบเทียบต้องเปรียบเทียบ ในช่วงที่ใช้ สารผสมเพิ่มอย่างเดียวกัน คือช่วงที่ใช้ โฟม ใน ทางตรงเปรียบเทียบกับ กับช่วงที่ใช้โฟมในทางโค้ง และช่วง ใช้เบนโทไนท์ในทางตรง เปรียบเทียบกับ ช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ ในทางโค้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าควบคุมหัวเจาะ (TBM Record) ไม่ว่าจะขุดเจาะในทางตรง หรือ ทาง โค้ง ถ้าใช้สารผสมเพิ่มอย่างเดียวกัน ค่าควบคุมหัวเจาะ จะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเข้าโค้งของหัวเจาะไม่มีความสัมพันธ์กับค่า ควบคุมหัวเจาะที่ชัดเจน โดยปัจจัยกระทบหลักที่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน จะเป็นการใช้ สารผสมเพิ่มที่ต่างชนิดกัน มากกว่า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การวิเคราะห์ Ground Surface Settlement โดยใช้ Finite Element Method (Plaxis)

การวิเคราะห์หา Ground Surface Settlement ใช้โปรแกรม PLAXIS 7.2 ซึ่งพิจารณาลักษณะปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ (Plain Strain) และใช้แบบจำลองดินของ Mohr Coulomb โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมดินใน ชั้นดินเหนียว จะทำการวิเคราะห์โดยวิธีหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) และอาศัยหลักการ $\sigma = 0$ Concept ส่วนใน ชั้นทรายจะทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis)

การวิเคราะห์โดยใช้ FEM ทำโดย การวิเคราะห์ กลับ(Back Analysis) จากข้อมูล Ground Surface Settlement ที่ได้จากในสนามจริง วิเคราะห์กลับเพื่อหาค่า เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ในแต่ละกรณี แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน โดยแยกหัวข้อที่จะศึกษาออกเป็น 2 อย่างคือ

- 1) เปรียบเทียบค่า เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ของช่วงที่มีการใช้ โฟม กับ ช่วงที่มีการใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม
- 2) เปรียบเทียบ ค่า เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ของช่วงที่อุโมงค์ เข้าโค้ง กับ ช่วงที่อุโมงค์อยู่ในทางตรง

4.3.1 การเลือกใช้แบบจำลองดิน

แบบจำลองดิน ในปัจจุบันนี้มีมากมายหลายแบบด้วยกัน ซึ่งมีความแตกต่าง ในการทำนายพฤติกรรมของดิน แบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงส่วนมากต้องการ Parameter ที่ใช้ในการคำนวณมาก เช่นกัน แบบจำลองที่นิยมใช้ในวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิศวกรรมปฐพีสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

4.3.1.1. Elastic model คือแบบจำลองดินที่จำลองให้ดินเป็นวัสดุแบบยืดหยุ่นอย่างเดียวนั้นไม่มีจุดคลาก (Yield Point) เกิดขึ้นในมวลดิน

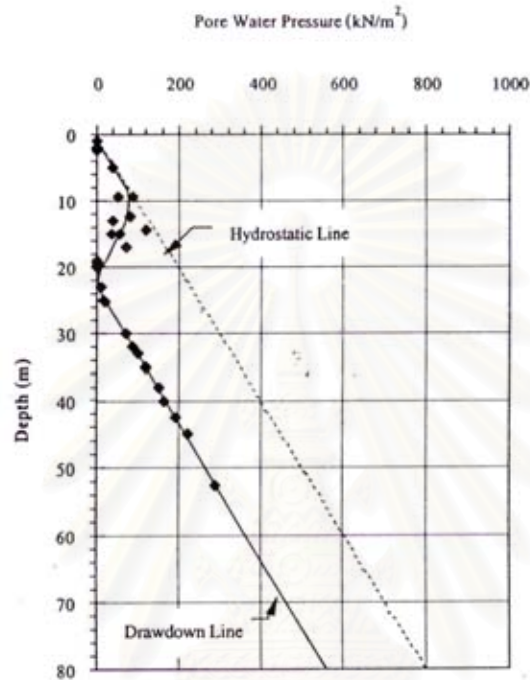
4.3.1.2. Plastic model คือแบบจำลองดินที่จำลองดินให้เป็นวัสดุแบบพลาสติกอย่างเดียวนั้น เช่น Rigidly Perfectly Plastic model (RPP)

4.3.1.3. Elasto-plastic Model คือแบบจำลองดินที่จำลองดินให้เป็นทั้งวัสดุแบบยืดหยุ่นและแบบพลาสติก ซึ่งจำแนกออกเป็น 2 แบบดังนี้

แบบจำลองที่จำลองให้ดินเป็นวัสดุแบบยืดหยุ่น ในช่วงที่ความเครียดไม่เกินจุดคลาก และจำลองให้ดินเป็นวัสดุแบบพลาสติกเมื่อความเครียดเกินจุดคลากไปแล้ว เช่น แบบจำลอง Elastic-Perfectly Plastic Model (Mohr Coulomb Model) เป็นแบบจำลองดินที่มีความซับซ้อนไม่มากนัก และ ในที่นี้ใช้การวิเคราะห์โดยเลือกแบบจำลองดินเป็น Mohr Coulomb Model

4.3.2 ระดับน้ำใต้ดิน

ระดับน้ำใต้ดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบ Piezometric Level โดยแรงดันน้ำจะเริ่มจากศูนย์ที่ระดับความลึกประมาณ 23 เมตรจากผิวดิน หลังจากนั้นแรงดันน้ำจะเพิ่มแบบ Hydrostatic ดังแสดงโดยเส้น Drawdown Line ในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะแรงดันน้ำในดินกรุงเทพฯ

4.3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับดิน ได้แก่

- กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Undrain Shear Strength , S_u)
- สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต (K_0)
- ค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำของดิน (E_u)
- หน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_d) และหน่วยน้ำหนักรวม (γ_t)
- ค่า Cohesion , C และ Friction angle ของดิน
- ค่า Poission ratio , ν ของดิน

พารามิเตอร์ ที่เกี่ยวกับโครงสร้างใต้ดิน

- น้ำหนักของอุโมงค์ , W
- ค่าสติเฟนสของผนังอุโมงค์, EA และ ลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์
- ค่าความแข็งเชิงคด (Flexural rigidity , EI)
- ค่า Poission ratio , ν ของคอนกรีต

4.3.3.1) กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Undrain Shear Strength , S_u)

กำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพ ไม่ระบายน้ำ (S_u) จะมีผลในการวิเคราะห์การทรุดตัวที่ผิวดิน โดยค่า S_u ต่ำ จะก่อให้เกิดการทรุดตัวที่ผิวดินสูง ดังนั้นการเลือกใช้ค่า S_u จึงเป็นสิ่งสำคัญ ในการวิเคราะห์ปัญหา การทรุดตัว เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงที่สุด

Bishop และ Skemton (1954) ได้ให้ค่าจำกัดความของกำลังรับแรงเฉือน แบบไม่ระบายน้ำ โดยพิจารณาจากการทดสอบ แบบ Undrained Test ว่าดินมีกำลังเฉือนสูงสุดเท่ากับ

$$S_u = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{2}$$

โดยค่า S_u ที่นำมาใช้ ในช่วงระดับความลึก ไม่เกิน 16 เมตร สามารถหาได้โดยตรงจาก Boring Log แต่ที่ระดับความลึกมากกว่านั้น สามารถหาได้โดยการแปลงมาจากค่า N_{Field}

การทดสอบทะลุทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)

เป็นการทดสอบหาค่า S_u จากค่า N โดยวิธีประมาณ (Empirical) ในดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) และค่า N จากการทดสอบ เพื่อใช้หาค่า มุมต้านทานแรงเฉือน (Friction angle, ϕ) ของดินทราย โดยใช้ความสัมพันธ์ ของ Peck Hanson และ Thornburn(1973)

โดยในดินเหนียวกรุงเทพฯชั้นแรก วีระนันท์ (2526) ได้ให้ค่าความสัมพันธ์ ระหว่าง N_{Field} ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ต้องปรับแก้ กับ S_u ดังนี้

$$S_u = 0.685 N_{Field} \text{ สำหรับดินเหนียวชนิด CH}$$

$$S_u = 0.520 N_{Field} \text{ สำหรับดินเหนียวชนิด CL}$$

4.3.3.2) การหามุมต้านทานแรงเฉือนประสิทธิผลของชั้นทราย

การหามุมต้านทานแรงเฉือนประสิทธิผลของชั้นทราย ทำได้โดยหาจากค่า N โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ ที่เสนอโดย Peck Hanson และ Thornburn โดยค่า N ที่จะนำไปใช้ต้องทำการปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งธรรมชาติ (σ'_{vo}) ในตำแหน่งที่ทำการทดสอบดังนี้

$$N' = C_N \cdot N_{Field}$$

โดยที่

C_N เป็นตัวปรับแก้ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบ กับผลการทดสอบ SPT ภายใต้อหน่วยแรงกดดินมาตรฐาน $\sigma'_{vo} = 1 \text{ t/m}^2$

N_{Field} เป็นค่า N ที่ได้จากสนาม

N' เป็นค่า N ที่ปรับแก้แล้ว

4.3.3.3) สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต

สำหรับดินเม็ดหยาบ การวิเคราะห์ใน Short Term จะใช้ Effective Stress Analysis เนื่องจากสามารถ ระบายน้ำได้ โดยหาค่า K_0 ได้ดังนี้

$$K_0 = 1 - \sin \phi'$$

โดยที่ ϕ' เป็นมุมต้านทานแรงเฉือนประสิทธิผล (Friction Angle) ของดินทราย

ในการวิเคราะห์แบบ Short Term หรือ Total Stress analysis ค่า K_0 ที่ใช้จะเป็นค่า K_0 (Total) คือ อัตราส่วนหน่วยแรงรวมด้านข้างต่อหน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง ซึ่งไม่จำเป็นต้องทราบค่าแรงดันน้ำ ในการวิเคราะห์ ค่า K_0 ในดินกรุงเทพฯ ค่า K_0 ของดินเหนียวอ่อน เท่ากับ 0.65 และของดินเหนียวแข็งเท่ากับ 0.5 ส่วนค่า K_{0Total} ในดินกรุงเทพฯ สำหรับดินเหนียวอ่อน และ ดินเหนียวแข็งเท่ากับ 0.75 และ 0.65 ตามลำดับ

4.3.3.4) ค่าโมดูลัสของดิน (Soil Modulus)

ในการวิเคราะห์แบบ Short Term โดยใช้ Total Stress Analysis จะใช้ค่าโมดูลัส ของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Eu) โดยที่ค่า Eu จะมีผลต่อค่าโมดูลัสแรงเฉือนของดิน (Shear Modulus , G) ตามทฤษฎีอีลาสติก (Elastic Theory) ดังนี้

$$G = \frac{Eu}{2(1+V)}$$

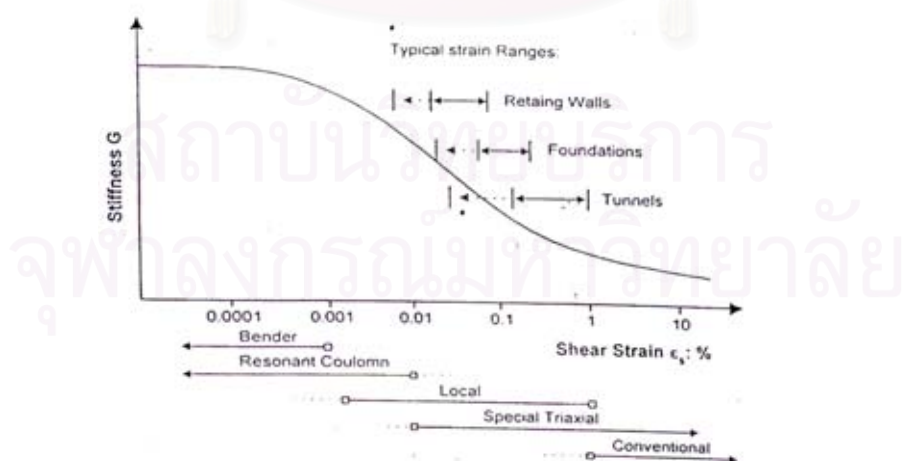
โดย G คือ โมดูลัสแรงเฉือนของดิน

Eu คือ โมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำ

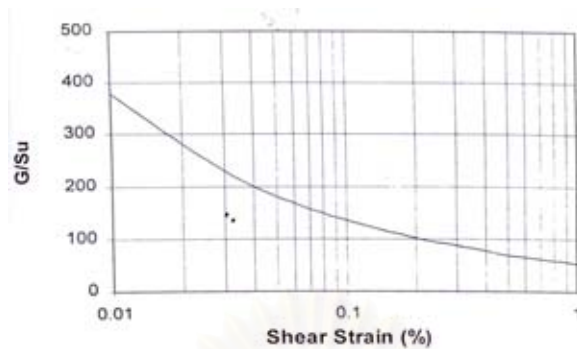
V คือ อัตราส่วนปัวซองของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ $V = 0.5$

Mair (1993) ได้ทำการวิจัยพบว่าค่าโมดูลัสแรงเฉือน (G) จะสัมพันธ์ กับ Shear Strain (γ) ของดินซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะงานก่อสร้าง โดยในงานอุโมงค์ ค่า γ จะอยู่ระหว่าง 0.1 – 1.0 % ดังรูปที่ 4.31

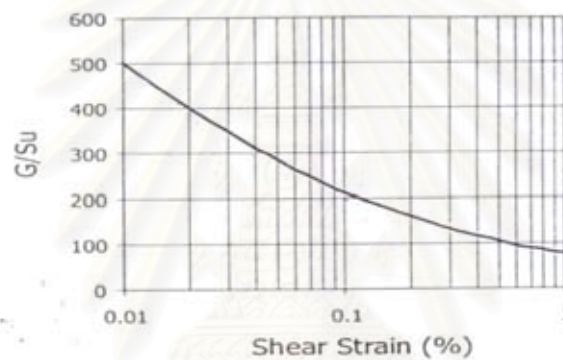
ในการทดสอบ Pressuremeter ของดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) และดินเหนียวแข็งชั้นแรก (First Stiff Clay) ในดินกรุงเทพฯ จำนวน 6 หลุมได้ค่าความสัมพันธ์ ระหว่าง G/ Su กับ Shear Strain ดังรูปที่ 4.32 (a) และ 4.32(b) โดยพบว่าที่ค่า $\gamma = 0.1 - 1.0 \%$ จะได้ค่า G/Su ของดินเหนียวอ่อน อยู่ในช่วง 60 –125 และสำหรับดินเหนียวแข็งชั้นแรก เท่ากับ 85-200 (Teparaksa,1999) ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่าง G กับ Eu จาก สมการ จะได้ค่า Eu/ Su ของดินเหนียวอ่อนอยู่ในช่วง 180 – 375 และของดินเหนียว แข็งอยู่ในช่วง 255 – 600



รูปที่ 4.31 แสดงค่า Stiffness ของดินกับระดับการเสียรูป (Mair,1993)



รูปที่ 4.32 (a) แสดงผลการทดสอบ Pressuremeter test ของดิน Bangkok Soft Clay (Teparaksa, 1999)



รูปที่ 4.32 (b) แสดงผลการทดสอบ Pressuremeter test ของดิน Bangkok Stiff Clay (Teparaksa, 1999)

ในงานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ชินวุฒิ (2543) ได้วิเคราะห์ การทรุดตัว โดยโปรแกรม Finite Element ทำการวิเคราะห์กลับ (Back Analysis) หาค่า E_u / S_u ในดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็งชั้นแรก และเสนอค่า ดังนี้

ดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) $E_u / S_u = 240$

ดินเหนียวแข็งชั้นแรก (First Stiff Clay) $E_u / S_u = 480$

4.3.3.5) น้ำหนักของอุโมงค์

การหาน้ำหนักของอุโมงค์ จะพิจารณาอุโมงค์แบบเนื้อเดียวกันทั้งวง (Homogenous Lining) ไม่คิดถึงรอยต่อระหว่างแต่ละชิ้นส่วน และพิจารณาอุโมงค์ แบบ Plane Strain คิดน้ำหนักต่อเมตร โดยหาค่าได้ดังนี้

$$W_{\text{lining}} = \gamma_c \cdot (\pi \cdot (D_o^2 - D_i^2) / 4 \cdot b)$$

โดย

$$W_{\text{lining}} = \text{น้ำหนักของ อุโมงค์ต่อเมตร (kN)}$$

$$\gamma_c = \text{หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (kN/m}^3\text{)}$$

$$D_o, D_i = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของอุโมงค์}$$

$$b = \text{ความลึกของอุโมงค์} = 1 \text{ เมตร}$$

4.3.1.6) ลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์

สมบัติทางกายภาพของอุโมงค์จะมีผลอย่างมากกับความสามารถในการรับแรง พฤติกรรมการเคลื่อนตัวและเสีรูปร่าง ของอุโมงค์ โดยชิ้นส่วน (Segment) ที่ประกอบเป็นวงจะพิจารณาเป็น โครงสร้างแบบ Beam Structure ที่มีพฤติกรรมแบบ Linear Elastic Material เนื่องจากเกิดการเสีรูปร่างน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดอุโมงค์ และพิจารณาอุโมงค์แบบ Plane Strain ซึ่งหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

โมดูลัสของคอนกรีต

$$E_c = 15210 \cdot (f'_c)^{0.5}$$

Moment of Inertia

$$I = 1 / 12 \cdot b h^3$$

พื้นที่หน้าตัด

$$A = b \cdot (D_o - D_i)$$

โดยที่

$$E_c \text{ คือ ค่าโมดูลัสของคอนกรีต (kg / cm}^2\text{)}$$

$$f'_c \text{ คือ กำลังอัดของคอนกรีต (ksc)}$$

I	คือ Moment of Inertia (m^3)
b	คือ ความกว้างของผนังอุโมงค์ (m)
h	คือความหนาของผนังอุโมงค์ (m)
A	คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)
Do	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ (m)
Di	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของอุโมงค์ (m)

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลทางกายภาพของอุโมงค์

Parameter,Unit	Value
γ_c (t/m^2)	2.4
E_c (kN/m^2)	2.5E+07
Weight($kN/m/m$)	53.3
$A(m^2/m)$	0.185
$I(m^4/m)$	5.28E-04
$EA(kN/m)$	4.6E+07
$EI(kN\cdot m^2/m)$	1.32E+04
ν	0.2

4.3.4 การวิเคราะห์ Ground Surface Settlement ด้วย โปรแกรม Plaxis

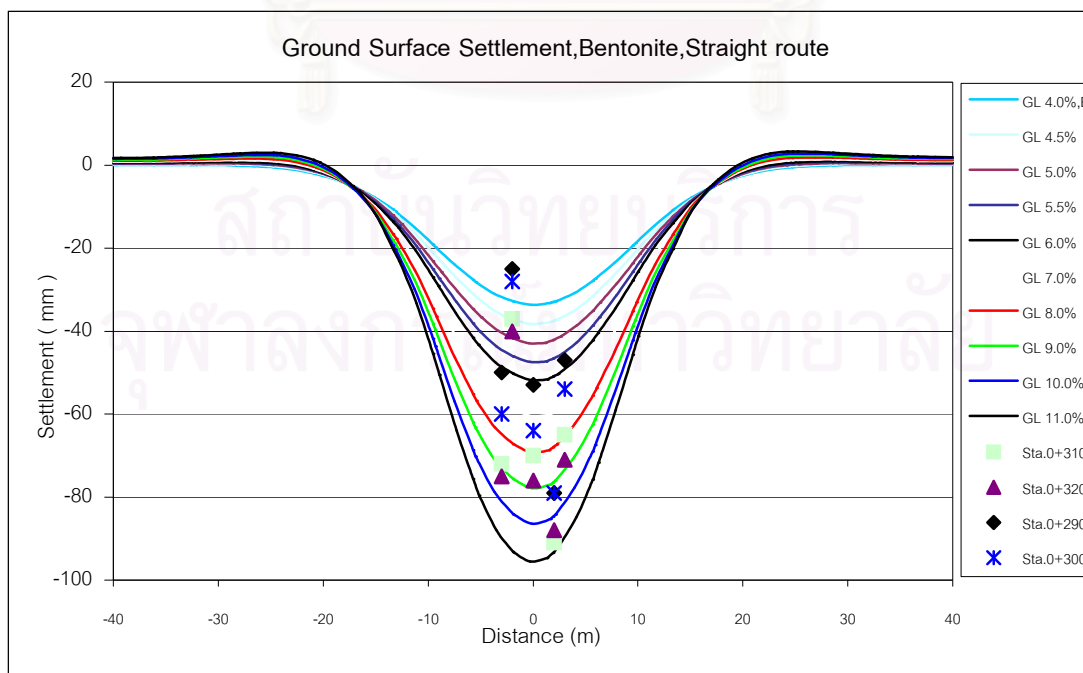
การวิเคราะห์ Ground Surface Settlement จะทำการวิเคราะห์ 4 กรณี โดยแต่ละกรณี จะทำการเลือก Station มา 4-5 Station แล้วทำการ Trial ค่า เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ในโปรแกรม Plaxis แล้วนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงที่ได้จากสนาม จะได้ช่วงของ เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ของแต่ละกรณี ซึ่งเงื่อนไขต่างๆ และ Station ที่เลือกใช้ แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงลักษณะเส้นทางอุโมงค์ การใช้สารผสมเพิ่ม และ Station ที่เลือกใช้นำมาวิเคราะห์ FEM

Item	Conditioning Agent	Tunnel Route	FEM Back Analysis
			Station
1	Bentonite	Straight	0+290 , 0+300 , 0+310 , 0+320
2	Bentonite	Curve	0+260 , 0+325 , 0+430 , 0+500 , 0+515
3	Foam	Straight	0+860 , 1+080 , 1+290 , 1+350 , 1+435
4	Foam	Curve	0+655 , 0+820 , 0+980 , 1+120 , 1+210

4.3.4.1) การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ในกรณี จุดเจาะอุโมงค์ในทางตรง และ ใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม

เมื่อนำข้อมูล Grind Surface Settlement ของ Station 0+290 , Sta 0+300 , Sta 0+310 และ Sta 0+320 มาพล็อตกราฟ ร่วมกับกราฟ ที่ได้จากการ Trial ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรม Plaxis ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.33

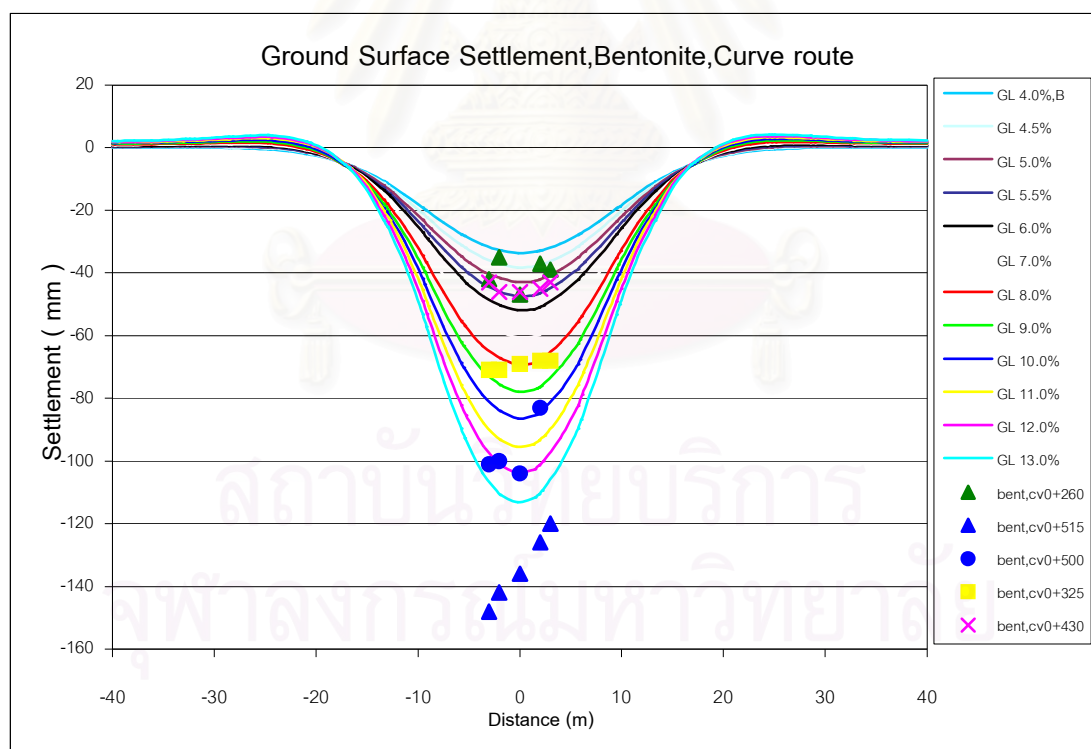


รูปที่ 4.33 แสดงค่า Ground Surface Settlement และ ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground loss ที่วิเคราะห์หาคกลับ จากโปรแกรม Plaxis โดย ชุดอุโมงค์ ใน ทางตรง และใช้ เบนโทไนท์ เป็น สารผสมเพิ่ม

จากรูปที่ 4.33 จะเห็นว่า เมื่อทำการ Back Analysis ค่า Ground Surface settlement ที่ได้ จากสนามที่ Station ต่างๆ เปรียบเทียบกับ เปอร์เซนต์ Ground Loss ที่ได้จากโปรแกรม Plaxis พบว่ากรณีชุดเจาะอุโมงค์ ในทางตรง และมีการใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม จะได้ค่า เปอร์เซนต์ Ground Loss ตั้งแต่ 4.0 % - 11.0 %

4.3.4.2) การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ในกรณี ชุดเจาะอุโมงค์ในทาง โค้ง และ ใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม

เมื่อนำข้อมูล Griund Surface Settlement ของ Station 0+260 , Sta 0+325 , Sta 0+430 , Sta 0+500 และ Sta 0+515 มาพล็อตกราฟ ร่วมกับกราฟ ที่ได้จากการ Trial ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรม Plaxis ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.34

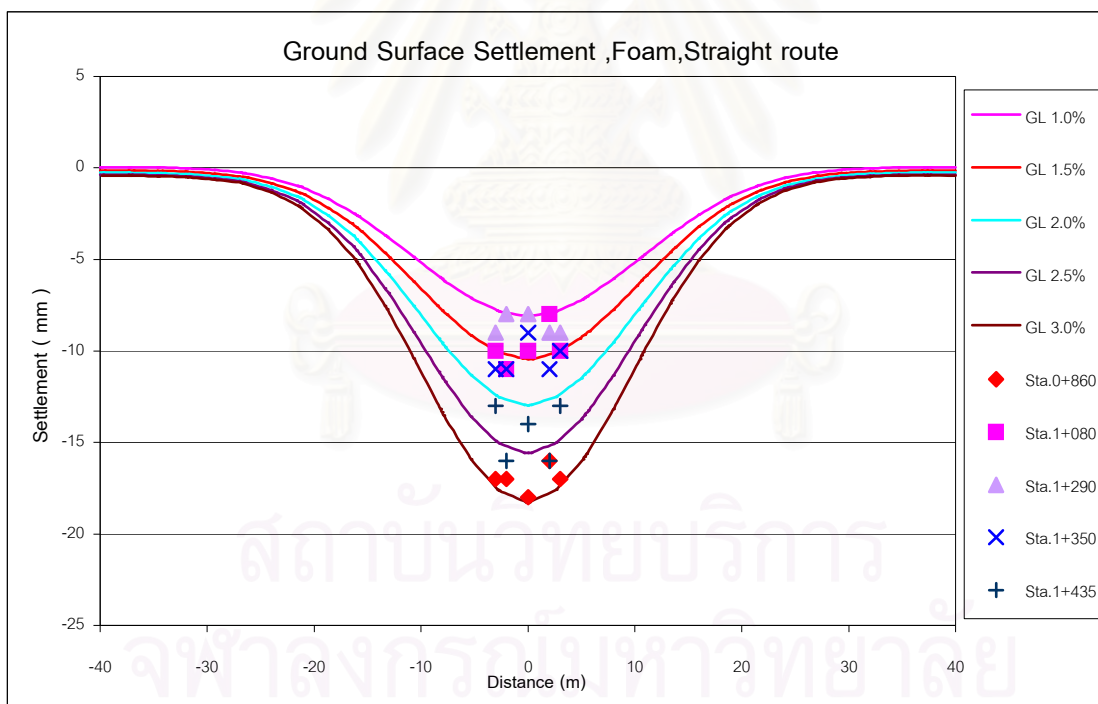


รูปที่ 4.34 แสดงค่า Ground Surface Settlement และ ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground loss ที่วิเคราะห์หาคกลับ จากโปรแกรม Plaxis โดย ชุดอุโมงค์ ใน ทางโค้ง และใช้ เบนโทไนท์ เป็น สารผสมเพิ่ม

จากรูปที่ 4.34 จะเห็นว่า เมื่อทำการ Back Analysis ค่า Ground Surface settlement ที่ได้ จากสนามที่ Station ต่างๆ เปรียบเทียบกับ เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ที่ได้จากโปรแกรม Plaxis พบว่ากรณีจุดเจาะอุโมงค์ ในทาง โค้ง และมีการใช้ เบนโทไนท์ เป็นสารผสมเพิ่ม จะได้ค่า เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ตั้งแต่ 4.0 % - 13.0 % ยกเว้นที่ Station 0+515 ที่ โปรแกรม Plaxis ไม่สามารถวิเคราะห์ หากค่าเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ได้ เนื่องจาก โปรแกรมวิเคราะห์ ว่าดินมีการ Collapse ไปก่อนที่ ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground Loss = 13.0 %

4.3.4.2) การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ในกรณี จุดเจาะอุโมงค์ในทางตรง และ ใช้ โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม

เมื่อนำข้อมูล Ground Surface Settlement ของ Station 0+860 , Sta1+080 , Sta 1+290 , Sta 1+350 , Sta 1+435 มาพล็อตกราฟ ร่วมกับกราฟ ที่ได้จากการ Trial ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรม Plaxis ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.35

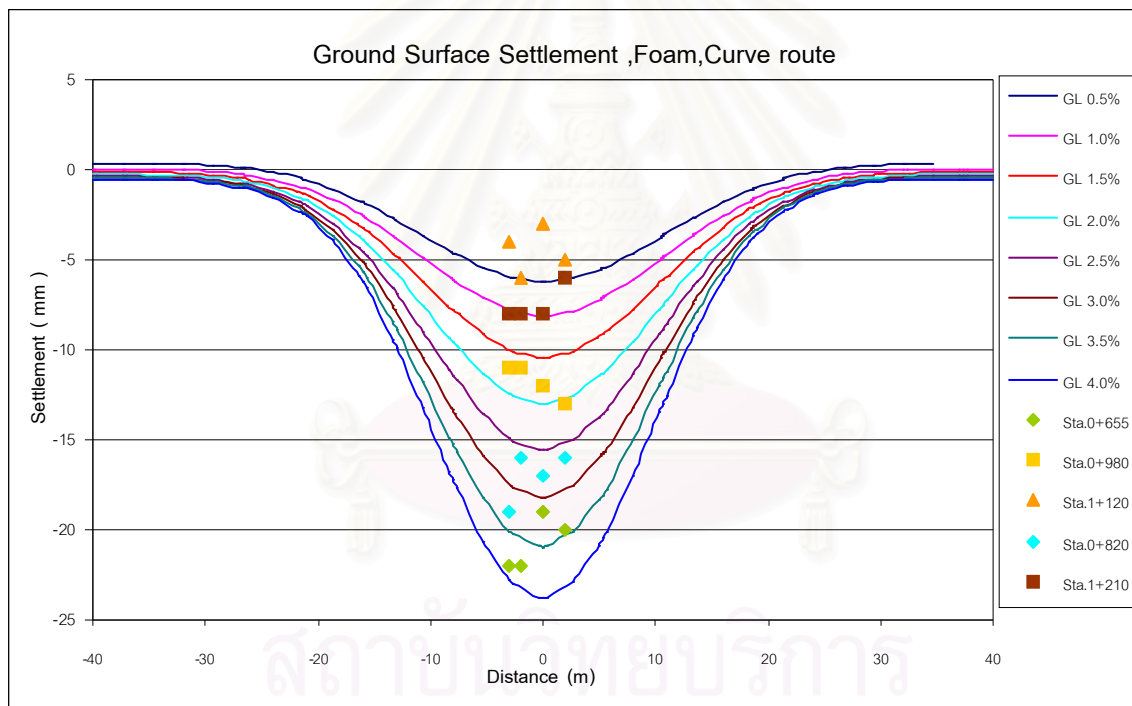


รูปที่ 4. 35 แสดงค่า Ground Surface Settlement และ ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground loss ที่วิเคราะห์กลับ จากโปรแกรม Plaxis โดย จุดอุโมงค์ ใน ทางตรง และใช้ โฟม เป็น สารผสมเพิ่ม

จากรูปที่ 4.35 จะเห็นว่า เมื่อทำการ Back Analysis ค่า Ground Surface settlement ที่ได้ จากสนามที่ Station ต่างๆ เปรียบเทียบกับ เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ที่ได้จากโปรแกรม Plaxis พบว่ากรณีจุดเจาะอุโมงค์ ในทางตรง และมีการใช้ โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ตั้งแต่ 1.0 % - 3.0 %

4.3.4.3) การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ในกรณี จุดเจาะอุโมงค์ในทาง โค้ง และ ใช้ โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม

เมื่อนำข้อมูล Ground Surface Settlement ของ Station 0+655 , Sta 0+820 , Sta 0+980 , Sta 1+120 , Sta 1+210 มาพล็อตกราฟ ร่วมกับกราฟ ที่ได้จากการ Trial ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรม Plaxis ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4. 36 แสดงค่า Ground Surface Settlement และ ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground loss ที่วิเคราะห์กลับ จากโปรแกรม Plaxis โดย จุดอุโมงค์ ใน ทางโค้ง และใช้ โฟม เป็น สารผสมเพิ่ม

จากรูปที่ 4.36 จะเห็นว่า เมื่อทำการ Back Analysis ค่า Ground Surface settlement ที่ได้จากสนามที่ Station ต่างๆ เปรียบเทียบกับ เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ที่ได้จากโปรแกรม Plaxis พบว่ากรณีขุดเจาะอุโมงค์ ในทาง โค้ง และมีการใช้ โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ตั้งแต่ 0.5 % - 4.0 %

จากรูปที่ 4.33 – 4.36 ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ Ground Loss ที่ได้จากการ Back Analysis โดย Plaxis ดังนี้

- กรณี ใช้เบนโทไนท์ , ขุดเจาะอุโมงค์ในทางตรง GL = 4.0 – 11.0 %
- กรณี ใช้เบนโทไนท์ , ขุดเจาะอุโมงค์ในทางโค้ง GL = 4.0 – 12.0 %
- กรณี ใช้โฟม , ขุดเจาะอุโมงค์ในทางตรง GL. = 1.0 – 3.0 %
- กรณี ใช้โฟม , ขุดเจาะอุโมงค์ในทางโค้ง GL = 0.5 - 4.0 %

ผลการวิเคราะห์พบว่า การขุดเจาะอุโมงค์ใน ช่วงทางตรง และ ช่วงทางโค้ง ไม่มีผล ต่อ การทรุดตัวที่ผิวดิน และ เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ที่ชัดเจนนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบ การใช้สารผสมเพิ่มระหว่าง โฟม กับ เบนโทไนท์ พบว่า ค่า Ground Surface Settlement และ เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ต่างกันอย่างเห็นได้ชัด สาเหตุที่สำคัญที่ทำให้ค่า Ground Surface Settlement และ เปอร์เซ็นต์ Ground Loss ต่างกัน คือ การใช้โฟมเป็นสารผสมเพิ่ม จะสามารถควบคุม Face Pressure ได้ดีกว่า และ มีค่า Penetration Rate ที่สูงกว่า ทำให้ใช้เวลาในการขุดเจาะน้อยกว่า เกิดการทรุดตัวบริเวณ ท้ายหัวเจาะ (Shield Tail) น้อยกว่า ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.2.7

บทที่ 5

สรุปผลการวิเคราะห์ และ ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ, จากการวิเคราะห์ข้อมูลการขุดเจาะอุโมงค์ ด้วยระบบแรงดันดินสมดุลในสนาม และข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดย FEM สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การเพิ่มปริมาณโฟม ทำให้ ค่า Compressibility ของ ทรายผสมโฟม เพิ่มขึ้น ขณะที่ การเพิ่มปริมาณเบนโทไนท์ ทำให้ค่า Compressibility ของ ทรายผสมเบนโทไนท์ ลดลง

การเพิ่มปริมาณโฟม ทำให้ ค่าพลังงานในการผสมดินลดลง โดยมีปริมาณน้ำในดินที่พอเหมาะ(10%) ขณะที่ การเพิ่มปริมาณเบนโทไนท์ ทำให้ ค่าพลังงานในการผสมดินเพิ่มขึ้น และมีค่าปริมาณน้ำในดินสูง ซึ่งทำให้ยากต่อการนำทรายออกจากหัวเจาะ

การเพิ่มปริมาณโฟม และ เบนโทไนท์ ไม่มีผลต่อค่ามุมเสียดทานภายในของดิน

5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการขุดเจาะอุโมงค์

ผลการวิจัยพบว่า การใช้โฟมเป็นสารผสมเพิ่ม ทำให้ประสิทธิภาพในการขุดเจาะอุโมงค์ สูงกว่า การใช้เบนโทไนท์ ในทุกๆด้าน ดังนี้

การใช้โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม ทำให้ค่า Face Pressure สม่ำเสมอมากกว่า การใช้เบนโทไนท์

การใช้โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม ทำให้ค่า Cutter head torque ต่ำกว่า การใช้เบนโทไนท์

การใช้โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม ทำให้ค่า Screw conveyor speed สูงกว่า การใช้เบนโทไนท์

การใช้โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม ทำให้ค่า Penetration rate สูงกว่า การใช้เบนโทไนท์

การใช้โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม ทำให้ค่า Push pressure และ Articulate pressure ต่ำกว่า การใช้เบนโทไนท์

การใช้โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม ทำให้ค่า Ground surface settlement ต่ำกว่า การใช้เบนโทไนท์

การเปรียบเทียบค่า TBM Record ทุกค่า ในช่วงอุโมงค์ขุดเจาะทางตรง และขุดเจาะทางโค้ง มีค่าไม่แตกต่างกัน

5.3 ผลการวิเคราะห์ห้โดย Finite Element Method

ผลการวิจัยพบว่า ค่าอัตราส่วน Ground loss ช่วงที่ใช้โฟม เป็นสารผสมเพิ่ม มีค่าต่ำกว่า ช่วงที่ใช้ เบนโทไนท์ โดย

- ค่าอัตราส่วน Ground loss กรณีใช้ เบนโทไนท์ ,จุดเจาะอุโมงค์ทางตรง = 4.0 - 11.0 %
- ค่าอัตราส่วน Ground loss กรณีใช้ เบนโทไนท์,จุดเจาะอุโมงค์ทางโค้ง = 4.0 - 13.0 %
- ค่าอัตราส่วน Ground loss กรณีใช้ โฟม,จุดเจาะอุโมงค์ทางตรง = 1.0 - 3.0 %
- ค่าอัตราส่วน Ground loss กรณีใช้ โฟม,จุดเจาะอุโมงค์ทางโค้ง = 0.5 - 4.0 %

จากผลการวิจัยทั้ง 3 หัวข้อ พบว่าการผสม โฟม ทำให้ดินทราย มีคุณสมบัติ ที่เหมาะสม ต่อ งานจุดเจาะอุโมงค์ด้วยระบบแรงดันดินสมดุล มากกว่า การผสมกับเบนโทไนท์ และยังมีค่า Ground surface settlement ที่ต่ำกว่า

5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1) งานวิจัยนี้ทำการทดลอง กับตัวอย่าง ทราย เท่านั้น ควรมีการทำวิจัย เพิ่มเติม กับตัวอย่าง ดินเหนียว โดยเฉพาะ Stiff Clay ซึ่งนับว่ายังเป็นดินที่มีปัญหา ในงานจุดเจาะอุโมงค์
- 2) งานวิจัยนี้ทำการทดลอง กับตัวอย่าง ทราย ผสมกับ โฟม หรือ เบนโทไนท์ เท่านั้น ควร มีการนำสารผสมเพิ่มอย่างอื่นมาผสม เช่น โพลีเมอร์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กীরดี เมืองแสน. พฤติกรรมของหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุลในการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินในกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2544.
- ชลธิชา บุญส่ง. การเสียรูปและเคลื่อนตัวของอุโมงค์ที่ก่อสร้างด้วยวิธีแรงดันดินสมดุลในดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2544.
- ชินวุฒิ ชาญฉายา. การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของชั้นดินกรุงเทพฯเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน โดยวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2543.
- วีระนันท์ ปิตุปรกรณ์. การคาดคะเนการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยสแตนด์การ์ด เพนเทรชันเทสต์ในชั้นดินกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2526.
- อภิชาติ สระมูล และ มิชิทะกะ สุกิโมโต้. การพัฒนารูปแบบของแรงดันดินที่กระทำต่อหัวเจาะอุโมงค์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5 , มีนาคม พ.ศ. 2542 , หน้า GTE ~ 74 – GTE ~ 79.
- อภิชาติ สระมูล และ มิชิทะกะ สุกิโมโต้. ลักษณะการทำงานของหัวเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6 , พฤษภาคม พ.ศ. 2543 , หน้า GTE ~ 97 – GTE ~ 102 .

ภาษาอังกฤษ

- Bishop, A.W.(1954). The Use of Pore Pressure Coefficients in Practice. Geotechnique, Vol. 4: 148-152
- Bjerrum,L.(1972).Embankment of Soft Ground.State of Art Report,Proc.ASCE Special Conf.On Performance of Earth and Earth-Supported Structures.(n.p.):Lafayette.

- Broms B.B. and Bennermark H.(1967).Stability of Clay at Vertical Openings.Journal of Geotechnical Engineering Division,ASCE,SM 1 .
- Clough and Schmidt.(1981)Design and Performance of Excavations and Tunnels.Soft Clay Engineering,Elsivier Scientific Publishing Company.
- EFNARC.(2001).Specification and Guidelines for the use of specialist products for Soft Ground Tunnelling :1-29.
- Fujita K.(1994).Soft Ground Tunnelling and Buried Structures.XIII ICSMFE,1994.New Delhi,India:89-108.
- Herrenknecht ,Martin. Micro tunnelling with Herrenknecht Machine. Micro tunnelling with Micromachine:1-13
- Herrenknecht ,Martin . and Rehm ,Ulrich.(2001).. Earth Pressure Balance Shield Technology.:1-20.
- Houlsby, T and Psomas, S. Properties of foam/sand mixture. Soil conditioning for Tunnelling and Pipe jacking: 1-11
- Kishio ,T.,Ohta, H.,Nakai, N.,Hashimoto, T.,Hayakawa, K.(1995).Reducing Ground Settlement Cause by Shield Tunnelling in Soft Clay.Underground Construction in Soft ground,Balkema,Rotterdam:257-260.
- Komine ,H.,Tanaka ,Y.,Nishi, K.(1995)Factor affecting Settlements above Driven Tunnels. Underground Construction in Soft ground,Balkema,Rotterdam:225-228.
- Lee,K.M.,Rowe,R.K. and Lo,K.Y.(1992).Subsidence owing to tunnelling.I:Estimating the gap parameter.Can.Geotech.29:929-940.
- Mair,R.J.,Taylor,R.N. and Bracegirdle,A.(1993).Subsurface settlement profiles above tunnels in clays.Geotechnique 43,No.2:315-320.
- Matsushita, Y.,Iwazaki ,Y.,Hashimoto, T.,Imanishi,H.(1995)Behavior of Subway tunnel Driven by Large Slurry Shield. Underground Construction in Soft ground,Balkema,Rotterdam:253-256.
- Merritt ,A.S., Borghi, F.X. and Mair, R.J. (2003): Conditioning of clay soils for earth pressure balance tunnelling machines. Underground Construction 2003.
- Milligan,G.W.E.(2000). Lubrication and soil conditioning in Tunnelling,Pipe jacking and Microtunnelling. Lubrication and soil conditioning State of the art review 1 :1-46.
- O'Reilly,M.P. and New,B.M.(1982).Settlement above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction.Tunnelling'82.Institute of Mining and Metallurgy:173-181.

- Peck,R.B.(1969).Deep excavations and tunnelling in soft ground.Proc.of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.State of Art Volume:225-290.
- Peck ,R.B.et al .(1969).Some Design Consideration in Selection of Underground Support System.U.S.Department of Transportation(NTIS PB 190443).
- Psomas,Sotiris.(2001).Properties of Foam/Sand Mixture for tunneling application.Thesis of Master degree of Engineering Science of University of Oxford.:1-147.
- Sramoon,A. and Sugimoto,M.(1999).A study on earth pressure acting on EPB Shield.Civil and Environmental Engineering Conference New Frontiers and Challenges, Bangkok ,Thailand:II 93-98.
- Schmidt ,B.(1974).Prediction of Settlement due to Tunnelling in Soil :Three Case Histories.Rapid Excavation and Tunnelling Conference.Sanfrancisco,California.June:1179-1199.
- Schmidt,B.(1989).Consolidation Settlement due to Soft Ground Tunnelling:797-800.
- Teparaksa,W.(1999a).Geotechnical aspects on the design and construction of the MRTA subway in Bangkok.Journal No.24, Society of Professional Engineers in Thailand.,Nov'98-Nov'99.
- Teparaksa,W.(1999b).Principal and application of instrumentation for the first MRTA subway project in Bangkok.Proc.of 5th International Conference on Field Measurement in Geomechanics:411-416.
- Tetsushi ,S.(1986)Face Stabilization Control of Earth Pressure Type Shield.Symposium on Computer Aided Design and Monitoring in Geotechnical Engineering,AIT,Bangkok, Thailand:698-726.
- Wassmer ,Louis .(2001).Tunnel Boring Machine(TBM) application in Soft ground condition.IMA Meeting 2001:1-32.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชนารัตน์ ชนกิจเลิศสกุล เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ.2522 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปี การศึกษา 2544 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย