

พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ



นาย ทยานันท์ บุญยรักษ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0900-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BEHAVIOR OF POLYMER SLURRY FOR WET-PROCESS BORED PILE CONSTRUCTION IN
BANGKOK SUBSOILS

Mr. Thayanan Boonyarak

สถาบันวิทยบริการ

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 2001

ISBN 974-03-0900-3

นายชยานันท์ บุญยรักษ์ : พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ. (BEHAVIOR OF POLYMER SLURRY FOR WET-PROCESS BORED PILE CONSTRUCTION IN BANGKOK SUBSOILS) อ.ที่ปรึกษา: ผศ. ดร.วันชัย เทพรักษ์, 125 หน้า. ISBN 974-03-0900-3.

ปัจจุบันการใช้สารละลายโพลีเมอร์ (Polymer Slurry) เพื่อเป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะสามารถแทนที่การใช้งานสารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Slurry) ได้ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่า คือไม่เกิดการสูญเสียแรงเสียดทานในชั้นทราย, ประหยัดเครื่องมือและพลังงานในการก่อสร้าง และมีความยุ่งยากในการก่อสร้างน้อยกว่า อย่างไรก็ตามสารละลายโพลีเมอร์มีพฤติกรรมต่างออกไปจากสารละลายเบนโทไนท์ ทำให้ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้าง, ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเสาเข็มและมาตรฐานการใช้สารรักษาเสถียรภาพ ต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้มีความเหมาะสมในการทำงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์โดยการสร้างแบบจำลองการไหลของสารละลายผ่านชั้นทรายและรวบรวมข้อมูลสนามจากการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ การทดสอบแบบจำลองประกอบด้วย พฤติกรรมการไหลผ่านชั้นทรายของสารละลาย, การเปลี่ยนแปลงกำลังที่ผิวหน้าของทราย และแรงเสียดทานระหว่างทรายเป็นผิวสัมผัส ในส่วนข้อมูลสนาม ประกอบด้วย ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ และผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเบนโทไนท์จะทำให้ (1) ปริมาณการไหลของสารละลายผ่านชั้นทรายลดลง (2) ระยะเวลาการเกิดเยื่อที่บนน้ำเริ่มต้น (Time for Initial Cake Formation, T_c) ลดลง และ (3) ความหนาของเยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake) เพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้สารละลายโพลีเมอร์พบว่า อัตราการไหลของสารละลายจะไม่ลดลงตามระยะเวลา ผลกระทบต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเสาเข็มพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) ของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์, ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) ของเสาเข็มที่ใช้โพลีเมอร์มีค่าสูงกว่าค่าจากเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ประมาณ 80% เนื่องจากความหนาของเยื่อที่บนน้ำที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา...2544....

4270353321: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: POLYMER SLURRY / BENTONITE SLURRY / BORED PILE / FILTRATION

THAYANAN BOONYARAK : BEHAVIOR OF POLYMER SLURRY FOR
WET-PROCESS BORED PILE CONSTRUCTION IN BANGKOK SUBSOILS.

THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF.WANCHAI TEPARAKSA, D.Eng., 125 pp.

ISBN 974-03-0900-3.

Polymer slurry has been adopted to replace the bentonite slurry as the hole stabilizing slurry for wet-process bored pile construction in Bangkok subsoils. This is because polymer slurry increases the unit skin friction in sand layer, requires less construction equipment as well as power consumption, and simplifies the construction method.

This research aims to study the behavior of polymer slurry for wet-process bored pile construction in Bangkok subsoil by means of model testing and field investigating. The models of slurry filtration through sand layer, as well as the friction between interface of sand and cement mortar were tested. Data of field investigation from construction sites, method of construction and pile capacity was collected and analyzed.

The results show that, in case of increasing ratio of bentonite, (1) the filtrate volume through sand layer decreases, (2) time for initial cake formation (T_c) decreases and (3) thickness of filter cake increases. On the other hand, in case of using pure polymer slurry, the filtration rate of slurry remains steady. The adhesion factors (α) for estimating unit skin friction in clay layers of bored pile using polymer slurry are in the same range as those of bored pile using bentonite slurry. While the friction factors (β) for estimating unit skin friction in sand layer of bored piles using polymer slurry show a significant increase of about 80% compared with those of the piles drilled with bentonite slurry. This is because very thin filter cake thickness is formed, when polymer slurry is applied into the borehole.

Department.....Civil Engineering..... Student's signature.....

Field of study.....Civil Engineering..... Advisor's signature.....

Academic year...2001...

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอริ์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ” ผู้เขียนขอแสดงความขอบพระคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏานันท์ ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้เขียนเป็นอย่างดี

คุณณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และคุณชาญชัย ททรัพย์มณีวงศ์ จากบริษัท SEAFCO จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการสร้างแบบจำลอง, ข้อมูลในสถานที่ ก่อสร้าง และคำแนะนำที่มีประโยชน์อย่างมากในการทำการวิทยานิพนธ์

บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เสมอ

เพื่อนๆทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้ลุล่วงไปด้วยดี

ธยานันท์ บุญยรักษ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง.....	ณ
สัญลักษณ์.....	ด
บทที่	
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพฯ ฯ	5
2.1.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ ฯ.....	5
2.1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ ฯ.....	7
2.1.1.1 ชั้นทราย.....	7
2.1.2.2 ชั้นดินเหนียว	12
2.2 ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก	14
2.2.1 เสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Slurry) เป็นสารรักษาเสถียรภาพ.....	14
2.2.2 เสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ (Polymer Slurry) เป็น สารรักษาเสถียรภาพ.....	15
2.2.3 เสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม (Base Grouted Pile)	18
2.3 พฤติกรรมของสารรักษาเสถียรภาพ	22

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.3.1	พฤติกรรมของเบนโทไนท์..... 22
2.3.2	พฤติกรรมของโพลีเมอร์..... 25
2.3.3	การลดลงของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มเนื่องจากเยื่อที่บวม..... 27
2.3.4	การใช้สารละลายโพลีเมอร์ในอดีตที่ผ่านมา..... 30
2.4	เครื่องมือวัดในเสาเข็มเจาะ..... 30
2.4.1	เกจวัดความเครียด (Vibrating Wire Strain Gauge)..... 31
2.4.2	เครื่องมือวัดการหดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer)..... 32
2.5	การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว..... 33
2.5.1	วิธีสถิตศาสตร์ (Static Method)..... 33
2.5.1.1	แรงเสียดทาน..... 34
2.5.1.1.1	แรงเสียดทานในชั้นทราย..... 34
2.5.1.1.2	แรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว..... 36
2.5.1.2	แรงต้านที่ปลายเข็ม..... 37
2.5.1.2.1	แรงต้านที่ปลายเสาเข็มในชั้นทราย..... 38
2.5.1.2.2	แรงต้านที่ปลายเสาเข็มในชั้นดินเหนียว..... 39
2.5.2	การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Load Testing of Piles)..... 40
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย..... 43
3.1	การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลจากสถานที่ก่อสร้าง..... 43
3.1.1	ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด..... 43
3.1.2	ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะโดยใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพ..... 46
3.2	การทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ..... 46
3.2.1	แบบจำลองการไหลผ่านในชั้นทราย..... 46
3.2.2	การทดสอบแรงเสียดทาน..... 49

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2.3	คุณสมบัติของทรายที่นำมาใช้ในแบบจำลองการไหลผ่านของ สารละลาย 50
3.3	การหาค่าพารามิเตอร์ของดินที่เกี่ยวข้องกับกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม 51
3.3.1	ค่า β ในชั้นทรายจากการทดสอบเสาเข็ม 51
3.3.2	ค่า α ในชั้นดินเหนียวจากการทดสอบเสาเข็ม..... 53
3.3.3	ค่า β ในทรายจากการทดสอบแรงเสียดทานในห้องปฏิบัติการ..... 54
3.3.4	ค่าแรงดันที่ปลายเข็มในชั้นทราย (N_q^*) 54
บทที่ 4	ผลการทดสอบ, การวิเคราะห์ผลและ อภิปรายผลการวิจัย 56
4.1	ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ 56
4.1.1	คุณสมบัติของทรายที่นำมาทดสอบ..... 56
4.1.1.1	ชนิดของทรายจากการจำแนกโดยวิธียูนิไฟด์..... 57
4.1.1.2	ค่ามุมต้านทานภายในของทราย (ϕ')..... 58
4.1.1.3	ความหนาแน่นสูงสุดและต่ำสุดของทราย 58
4.1.1.4	ค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านในชั้นทราย 59
4.1.2	คุณสมบัติของสารละลาย..... 59
4.1.2.1	ความหนาแน่นของสารละลาย 60
4.1.2.2	ความหนืดของสารละลายโดยวิธีกรวยมาร์ช 60
4.1.2.3	ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย..... 60
4.1.2.4	ปริมาณทรายในสารละลาย 63
4.1.3	ผลการทดสอบการไหลผ่านชั้นทรายของสารละลาย..... 63
4.1.4	การเปลี่ยนแปลงทางด้านกำลังของทรายโดยเครื่องมือ พีนีโตรมิเตอร์แบบพกพา 67
4.1.4.1	ชนิดของทราย 68
4.1.4.2	สัดส่วนและความเข้มข้นของสารละลาย..... 69
4.1.5	การทดสอบแรงเสียดทานของตัวอย่างทรายที่ผ่านการไหลของ สารละลาย 72
4.2	ข้อมูลจากสถานที่ก่อสร้าง 75

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2.1	75
4.2.1.1	75
4.2.1.2	77
4.2.2	78
4.2.2.1	79
4.2.2.2	80
4.2.2.3	81
4.2.3	83
4.2.3.1	83
4.2.3.2	84
4.2.3.3	85
4.2.3.4	86
4.2.3.5	86
4.3	87
4.3.1	88
4.3.2	88
4.3.3	89
4.3.3.1	90
4.3.3.2	91

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3.4 การเกิดเยื่อที่บับน้ำ (Filter Cake) ของตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และในผนังของเสาเข็มในหลุมเจาะ	92
4.3.4.1 การเกิดเยื่อที่บับน้ำ (Filter Cake) ในห้องปฏิบัติการ	92
4.3.4.2 การเกิดเยื่อที่บับน้ำ (Filter Cake) ในหลุมเจาะ	93
4.4 ข้อกำหนดที่เหมาะสมสำหรับสารรักษาเสถียรภาพในหลุมเจาะ	94
4.4.1 ความหนาแน่นของสารละลาย	95
4.4.2 ความหนืดของสารละลายแบบกรวยมาร์ช (Marsh Funnel)	97
4.4.3 ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย	98
4.4.4 ปริมาณทรายแขวนลอยในสารละลาย	99
4.4.5 การทดสอบการซึมผ่านกับตัวอย่างดินในหลุมเจาะ	100
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	102
5.1 ปริมาณการสูญเสียของสารละลายในระยะเวลาการก่อสร้าง	102
5.2 ประสิทธิภาพของการใช้งานของสารละลายโพลีเมอร์เปรียบเทียบกับ สารละลายเบนโทไนท์	102
5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม	103
5.3.1 ค่า α ของเสาเข็มที่สร้างโดยสารละลายโพลีเมอร์	103
5.3.2 ค่า β ของเสาเข็มที่สร้างโดยสารละลายโพลีเมอร์	104
5.3.3 ค่า N_q^* ของเสาเข็มที่สร้างโดยสารละลายโพลีเมอร์	104
5.4 ข้อกำหนดในการก่อสร้างเกี่ยวกับสารรักษาเสถียรภาพ	104
5.5 ข้อเสนอแนะในการทดสอบ	105
รายการอ้างอิง	104
ภาคผนวก	107
ประวัติผู้เขียน	148

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2-1 สภาพชั้นดินทั่วไปในกรุงเทพฯ (ว.ส.ท.2520)	5
รูปที่ 2-2 แรงดันน้ำใต้ดินในกรุงเทพฯ (วัดเมื่อปี พ.ศ. 2542)	9
รูปที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งของ SPT กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ ระบายน้ำของชั้นดินกรุงเทพฯ (แมนสรวง, มนัสพล และณัฐพล, 2540)	13
รูปที่ 2-4 ถังผสม (Recirculation Pump) ใช้ผสมสารละลาย.....	17
รูปที่ 2-5 ถังเก็บสารละลายเพื่อนำสู่หลุมเจาะ	17
รูปที่ 2-6 ปลอกเหล็ก (Casing) ป้องกันในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	17
รูปที่ 2-7 สว่านเจาะดิน (Drilling Auger)	17
รูปที่ 2-8 การเติมสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะลงไป	17
รูปที่ 2-9 หัวขุดเจาะแบบถัง (Drilling Bucket)	17
รูปที่ 2-10 อุปกรณ์ตรวจสอบสภาพหลุมเจาะ (Borehole Monitor)	18
รูปที่ 2-11 การเก็บตะกอนจากหลุมเจาะ.....	18
รูปที่ 2-12 การลงเหล็กเสริม.....	18
รูปที่ 2-13 ท่อเท (Tremie Pipe) ใช้ในการเทคอนกรีตได้น้ำ.....	18
รูปที่ 2-14 ถังพักตะกอน (Sediment Tank).....	18
รูปที่ 2-15 เสาค้ำที่เสร็จสมบูรณ์	18
รูปที่ 2-16 ท่อฉีดน้ำปูน (Tube-a-Manchette).....	20
รูปที่ 2-17 ระบบการอัดน้ำปูนแบบแผ่นราบ (Flat Plate)	20
รูปที่ 2-18 ลักษณะของผงเบนโทไนท์.....	22
รูปที่ 2-19 เบนโทไนท์เมื่อผสมน้ำ (ส่วนผสม 5%โดยน้ำหนัก).....	22
รูปที่ 2-20 วงน้ำ (Double Layer) ของอนุภาคดินเหนียว	23
รูปที่ 2-21 การเกิดเยื่อที่บุน้ำในชั้นทรายเมื่อใช้สารละลายเบนโทไนท์	24
รูปที่ 2-22 ความแข็งของเยื่อที่บุน้ำ	24
รูปที่ 2-23 เม็ดดินที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายเบนโทไนท์.....	25
รูปที่ 2-24 ลักษณะของโพลีเมอร์ผง	26
รูปที่ 2-25 โพลีเมอร์เมื่อผสมน้ำ	26
รูปที่ 2-26 พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในหลุมเจาะ	26

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2-27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับการเคลื่อนตัวของแรงดันเซลล์ต่างๆ ของเสาเข็มจำลอง (Farmer and Goldberg, 1969)	28
รูปที่ 2-28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงของเสาเข็มจริงที่ทิ้งไว้ในเบนโทไนท์ใน เวลาต่างๆ กัน (Cernak, 1976).....	29
รูปที่ 2-29 เจจวัดความเครียด (VWSG)	32
รูปที่ 2-30 การติดตั้ง VWSG.....	32
รูปที่ 2-31 Rod Extensometer	33
รูปที่ 2-32 การติดตั้ง Rod Extensometer.....	33
รูปที่ 2-33 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ ϕ' ของชั้นทรายกรุงเทพฯ (ชาญชัย 2542).....	35
รูปที่ 2-34 ความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ S_u ของดินเหนียวกรุงเทพฯ (ชาญชัย 2542).....	37
รูปที่ 2-35 ความสัมพันธ์ระหว่าง N_{q^*} กับ ϕ' ของชั้นทรายกรุงเทพฯ (ชาญชัย 2542).....	39
รูปที่ 2-36 สถานที่ทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม	40
รูปที่ 2-37 การทดสอบแบบรับแรงกดโดยใช้เสาเข็มสมอเป็นตัวต้านน้ำหนัก	40
รูปที่ 2-38 วิธีหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของ Mazurkiewicz (1972).....	42
รูปที่ 2-39 วิธีหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของ Butler & Hoy (1977)	42
รูปที่ 3-1 อุปกรณ์เก็บข้อมูลจากเสาเข็ม (Data Logger)	44
รูปที่ 3-2 คอมพิวเตอร์ใช้ประมวลผลการทดสอบเสาเข็ม.....	44
รูปที่ 3-3 การติดตั้ง VWSG ที่ชั้นดินที่มีการเปลี่ยนแปลง	45
รูปที่ 3-4 แบบจำลองการไหลผ่านชั้นทราย.....	48
รูปที่ 3-5 ปริมาตรสารละลายที่ไหลผ่านทราย	48
รูปที่ 3-6 อุปกรณ์พีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา และ ทอร์เวน	48
รูปที่ 3-7 การทดสอบกำลังของพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา.....	48
รูปที่ 3-8 การเก็บตัวอย่างผิวสัมผัสของทรายกับสารละลายเพื่อทดสอบหา แรงเสียดทาน.....	49
รูปที่ 3-9 ตัวอย่างทรายหลังการทดสอบการไหลผ่านของสารละลาย.....	49
รูปที่ 3-10 แผ่นมอร์ทาร์ที่ใช้ทดสอบแรงเสียดทาน.....	50
รูปที่ 3-11 การเตรียมตัวอย่างทดสอบแรงเสียดทาน.....	50
รูปที่ 3-12 กล่องดินตัวอย่างขึ้นบน (Upper Shear Box) และผิวมอร์ทาร์.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3-13 เครื่องมือทดสอบแรงเสียดทาน.....	50
รูปที่ 3-14 ค่า f_s ที่ใช้คำนวณค่า β ในชั้นทราย.....	52
รูปที่ 3-15 ค่า f_s ที่ใช้คำนวณค่า α ในชั้นดินเหนียว.....	53
รูปที่ 3-16 ค่า q_c ที่ใช้คำนวณค่า N_q^* ในชั้นทราย	55
รูปที่ 4-1 ตัวอย่างทรายหยาบ	57
รูปที่ 4-2 ตัวอย่างทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1	57
รูปที่ 4-3 ตัวอย่างทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 2	57
รูปที่ 4-4 ตัวอย่างทรายที่ตกตะกอนในถังพักตะกอน	57
รูปที่ 4-5 ขนาดคละ (Grain Size Distribution) ของทรายที่ใช้ในการวิจัย.....	58
รูปที่ 4-6 ตาชั่งสารละลาย (Mud Balance).....	60
รูปที่ 4-7 กรวยมาร์ช (Marsh Funnel)	60
รูปที่ 4-8 อุปกรณ์วัดความเป็นกรด-เบสของสารละลาย (pH Meter).....	61
รูปที่ 4-9 ระยะเวลาการเกิดเยื่อที่บู่ที่บ่น้ำเริ่มต้น.....	64
รูปที่ 4-10 ตัวอย่างการไหลผ่านชั้นทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1 ของสารละลายที่มี ส่วนผสมต่างๆกัน	65
รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ของการไหลผ่านชั้นทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1 ที่เวลา 60 นาที เมื่อใช้อัตราส่วนของสารละลายต่างๆกัน.....	66
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ของการไหลผ่านชั้นทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 2 ที่เวลา 60 นาที เมื่อใช้อัตราส่วนของสารละลายต่างๆกัน.....	66
รูปที่ 4-13 ทรายที่ส่วนผิวหน้าที่สัมผัสกับสารละลาย.....	67
รูปที่ 4-14 ทรายในส่วนที่ห่างจากผิวหน้าที่สัมผัสสารละลาย	67
รูปที่ 4-15 การทดสอบทรายชนิดต่างๆ โดยพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพาที่อัตราส่วนของ สารละลายต่างๆ.....	68
รูปที่ 4-16 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1 โดย พีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา	71
รูปที่ 4-17 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 2 โดย พีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา	71
รูปที่ 4-18 การทดสอบแรงเสียดทานของทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1	72

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4-19 การทดสอบแรงเสียดทานของทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 2	73
รูปที่ 4-20 เยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake) และเจลโพลีเมอร์ (Gel) ที่ผิวหน้าของ ตัวอย่างทราย.....	74
รูปที่ 4-21 สายวัดความลึกของหลุมเจาะ	76
รูปที่ 4-22 การวัดความลึกของหลุมเจาะเทียบกับเวลาของการตกตะกอน	76
รูปที่ 4-23 การตกตะกอนของทรายในหลุมเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 m ความลึกประมาณ 45 m.....	77
รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน (S_u) ของดินเหนียวกรุงเทพฯ กับค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานของดินเหนียว (α).....	79
รูปที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมต้านทานภายใน (ϕ') ของชั้นทรายกรุงเทพฯ กับ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานของทราย (β)	81
รูปที่ 4-26 การวัดขนาดของหลุมเจาะโดยเครื่องตรวจสอบสภาพหลุมเจาะ.....	84
รูปที่ 4-27 ข้อมูลความหนาของผนังหลุมเจาะ	84
รูปที่ 4-28 ถังเก็บตะกอน (Cleaning Bucket).....	86
รูปที่ 4-29 เครื่องกรองทราย (Desander).....	86
รูปที่ 4-30 ถังผสม (Recirculation Pump)	88
รูปที่ 4-31 การผสมสารละลายรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ	88
รูปที่ 4-32 เครื่องปั่นไฟฟ้าขนาด 1000 cm ³	89
รูปที่ 4-33 สารละลายผสมระหว่างเบนโทไนท์กับโพลีเมอร์	89
รูปที่ 4-34 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของเบนโทไนท์ กับ การสูญเสียสารละลาย (Hutchinson et al, 1975).....	98
รูปที่ 4-35 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของสารละลายที่ผสมกับผงโพลีเมอร์กับ ความหนืดแบบกรวยมาร์ช (Majano and O'Neil, 1993).....	99
รูปที่ 4-36 การหาปริมาณทรายในสารละลาย.....	100
รูปที่ 4-37 ปริมาณทรายในสารละลาย.....	100

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของทรายที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	59
ตารางที่ 4-2 คุณสมบัติของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ	62
ตารางที่ 4-3 อัตราส่วนระหว่างมุม δ/ϕ' ของทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1 และ 2	74
ตารางที่ 4-4 แสดงจำนวนเสาเข็มทดสอบที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์และมีการติดตั้ง อุปกรณ์วัด	78
ตารางที่ 4-5 ราคาในการก่อสร้างของสารละลายโพลีเมอร์และสารละลายเบนโทไนท์.....	87
ตารางที่ 4-6 ข้อกำหนดที่เสนอในการใช้สารละลายโพลีเมอร์	95
ตารางที่ 5-1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสารละลายทั้งสองประเภท	103



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

α	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเหนียว (Adhesion Factor)
β	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของทราย (Friction Factor)
δ	=	มุมเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็ม
ϵ	=	ความเครียด (Strain)
ϕ'	=	มุมต้านทานภายในของดิน (Angle of Internal Resistance)
γ_t	=	หน่วยน้ำหนักรวมของดิน (Total Unit Weight)
γ_d	=	หน่วยน้ำหนักแห้งของดิน (Dry Unit Weight)
λ	=	ค่าปรับแก้สำหรับการทดสอบไพบัตในสนาม (Field Vane Test)
σ'_{vi}	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง
A_g	=	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาเข็ม
A_s	=	พื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กเสริมรับแรงอัด
C_N	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง
C_u	=	สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของดิน (Uniformity Coefficient of the Soil)
D_r	=	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density)
E_c	=	อีลาสติกโมดูลัสของคอนกรีต
E_s	=	อีลาสติกโมดูลัสของเหล็กเสริม
f_s	=	หน่วยแรงเสียดทาน
K_0	=	สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาพนิ่ง (At-rest Earth Pressure)
k_h	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของทรายในแนวราบ
k_v	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของทรายในแนวตั้ง
K_s	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างระหว่างดินกับเสาเข็ม
LL	=	ขีดจำกัดเหลว
N	=	ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value)
N_c^*	=	สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว
N_q^*	=	สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานปลายเสาเข็ม
N_F	=	ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน โดยยังไม่ทำการปรับแก้
OCR	=	อัตราส่วนอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidated Ratio)
PI	=	พิกัดพลาสติก

สัญลักษณ์ (ต่อ)

- PL = ซีดจำกัดพลาสติก
- q_E = หน่วยแรงกำลังรับแรงแบกทาน
- Q_{ult} = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของฐานราก
- S_u = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว
- T_c = เวลาการเกิดเยื่อที่บับน้ำเริ่มต้น (Time of Initial Filter Cake Formation)
- U = แรงดันน้ำใต้ดิน
- W_n = ความชื้นในมวลดิน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการก่อสร้างเสาเข็มเพื่อเป็นฐานรากอาคารในกทม. และต่างจังหวัดได้เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก การสร้างเสาเข็มที่มีขนาดใหญ่และขุดลงไปได้ลึกจะทำให้ฐานรากเสาเข็มรับน้ำหนักได้สูงและเกิดการทรุดตัวน้อย วิธีการที่ใช้กันอยู่คือการสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกซึ่งทำการเจาะจนถึงระดับที่หลุมเจาะไม่สามารถรักษาเสถียรภาพด้วยตัวเองได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใส่สารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะลงไป

ในอดีตการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกจะใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ เนื่องจากมีการผลิตและนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก นอกจากนี้ยังไม่มีสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะประเภทอื่นที่มีความเหมาะสมกว่าในขณะนั้น อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายเบนโทไนท์จะก่อให้เกิดปัญหาหลายๆด้านเกี่ยวกับด้านการรับกำลังของเสาเข็มและด้านการก่อสร้าง

การใช้สารละลายเบนโทไนท์จะทำให้เกิดเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake) ในชั้นทรายและถ้าเยื่อที่บดน้ำมีความหนามากและความแข็งของเยื่อที่บดน้ำมีค่าสูงกว่าแรงครูดของคอนกรีตขณะเทเสาเข็มได้น้ำ (Tremie Method) จะทำให้มีเยื่อที่บดน้ำบางส่วนเหลืออยู่ ดังนั้นผิวของคอนกรีตจะไม่สัมผัสกับทรายเป็นผลให้กำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นทรายมีค่าลดลง ซึ่งการสูญเสียของกำลังรับแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับความหนาของเยื่อที่บดน้ำและปัจจัยอื่นๆ

สำหรับการใช้โพลีเมอร์นั้น จะไม่มีเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake) เกิดขึ้นเนื่องจากพฤติกรรมการรักษาเสถียรภาพระหว่างเม็ดดินในหลุมเจาะของโพลีเมอร์จะแตกต่างกับเบนโทไนท์ นอกจากนี้จะมีโครงสร้างของโพลีเมอร์เข้าไปในช่องว่างของทรายส่งผลให้ทรายมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้นชั่วคราวด้วย ดังนั้นกำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพมีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงกว่าเสาเข็มที่เจาะโดยใช้สารละลายเบนโทไนท์

วิธีการกำจัดตะกอนของหลุมเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์จะแตกต่างออกไปจากวิธีการที่ใช้กับสารละลายโพลีเมอร์ด้วย เนื่องจากสารละลายเบนโทไนท์จะทำให้ทรายละเอียดหรือ

ทรายแป้ง (Silt) แขนวนลอยอยู่ในเบนโทไนท์ เมื่อจะเทคอนกรีตจำเป็นที่จะต้องไล่ตะกอนก้นหลุมขึ้นมาโดยใช้เครื่องเป่าลม (Air Lift) และเมื่อจะนำกลับมาใช้ก็ครั้งจำเป็นที่จะต้องนำสารละลายเบนโทไนท์ไปผ่านเครื่องกรองทราย (Desander) ก่อน แต่ก็จะมีตะกอนบางส่วนไม่สามารถแยกออกมาได้ ทำให้คุณสมบัติของเบนโทไนท์เสียไปเมื่อผ่านการนำมาแล้วหลายครั้งและคุณสมบัติของเบนโทไนท์ไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ก็จำเป็นที่จะต้องทิ้งสารละลายเบนโทไนท์ส่วนนั้นไป แต่การใช้สารละลายโพลีเมอร์ในการขุดเจาะไม่จำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องกรองทราย เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์จะจับตัวกับทรายละเอียดหรือทรายแป้งจนมีขนาดใหญ่พอที่จะตกตะกอนลงก้นหลุม การเก็บตะกอนจะใช้เพียงถังเก็บตะกอน (Cleaning Bucket) ก่อนนำเหล็กเสริมลงซึ่งมีขั้นตอนที่สะดวกและประหยัดกว่าการใช้เครื่องเป่าลม (Air Lift) เพื่อไล่ตะกอนขึ้นในหลุมที่เจาะเมื่อใช้สารละลายเบนโทไนท์ ส่วนสารละลายโพลีเมอร์ที่สูบลกลับมาถึงพักจะมีปริมาณทรายต่ำมากจนไม่ต้องผ่านเครื่องกรองทรายเมื่อนำสารละลายโพลีเมอร์มาใช้ใหม่ก็เพียงแค่ตรวจสอบคุณสมบัติและทำการปรับแต่งคุณภาพสารละลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการทำงาน ดังนั้นการใช้สารละลายโพลีเมอร์จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการใช้เครื่องกรองทรายและเครื่องเป่าลมไปได้

ดินที่ถูกขุดขึ้นมาโดยใช้เบนโทไนท์ในการเจาะซึ่งผสมกับสารละลายเบนโทไนท์จะมีลักษณะเหลวยากต่อการขนย้ายและทำให้สถานที่ก่อสร้างและถนนสกปรก ไม่สะดวกในการทำงาน สำหรับดินที่ถูกขุดขึ้นมาโดยใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพจะมีลักษณะคล้ายดินที่เปียกน้ำทำให้การขนย้ายสามารถทำได้สะดวก เนื่องจากสภาพดินไม่เหลวมากและจะไม่ทำให้ถนนสกปรก ไม่เป็นปัญหาในการทำความสะอาด

ปัญหาด้านอื่นๆในการใช้สารละลายเบนโทไนท์คือ จำเป็นที่จะต้องใช้เบนโทไนท์ในปริมาณที่มากกว่าโพลีเมอร์ประมาณ 40-50 เท่าในการผสม เพื่อรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ ทำให้จำเป็นที่จะต้องใช้น้ำในการจัดเก็บและค่าใช้จ่ายในการขนย้ายมากกว่าการใช้สารละลายโพลีเมอร์ นอกจากนี้ในขั้นตอนการผสมเบนโทไนท์เมื่อผสมเสร็จแล้ว จำเป็นที่จะต้องทิ้งไว้ 1 วัน เพื่อให้เกิดการดูดน้ำเต็มก่อนที่จะใส่ลงหลุมได้ ในขณะที่เมื่อผสมโพลีเมอร์เสร็จแล้วก็สามารถใส่ลงหลุมได้เลย ทำให้ง่ายต่อการวางแผนงานและทำงานได้สะดวกยิ่งขึ้น

แต่เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์ยังเป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะที่ค่อนข้างใหม่สำหรับผู้รับเหมาในประเทศไทยจึงยังไม่มีนำมาใช้งานในระดับที่แพร่หลายมากนักและพฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในหลุมเจาะยังแตกต่างออกไปจากสารละลายเบนโทไนท์ที่ใช้

กันมานานแล้วอีกด้วย ในการทำงานจำเป็นที่จะต้องผสมเบนโทไนท์จำนวนหนึ่งกับโพลีเมอร์เพื่อจะก่อให้เกิดเยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake) บางส่วนเนื่องจากการใช้สารละลายโพลีเมอร์เพียงอย่างเดียวจะเกิดการซีมหายไปในชั้นทรายในปริมาณมาก ทำให้ไม่เกิดความคุ้มค่าในการใช้งาน ในการทำงานอัตราส่วนการผสมระหว่างโพลีเมอร์กับเบนโทไนท์จะยึดตามคำแนะนำของผู้ผลิตและทำการปรับแก้อัตราส่วนเพื่อความเหมาะสมในแต่ละสถานที่ก่อสร้าง อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดเยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake), การไหลของสารละลายผ่านชั้นทราย และการตกตะกอนของทราย เมื่อใช้วัสดุทั้งสองประเภทรวมกันอย่างละเอียด อีกทั้งยังไม่มีมีการตรวจสอบว่าวิธีการขุดเจาะและเกณฑ์การตรวจสอบงานในปัจจุบันมีความเหมาะสมเพียงใด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษากฎการของการใช้วัสดุทั้งสองประเภทนี้ รวมทั้งหาอัตราส่วนและวิธีการก่อสร้างที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์และสารละลายเบนโทไนท์ในส่วนต่างๆดังนี้

1. ศึกษาพฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ทางด้านกายภาพ และทางด้านวิศวกรรม
2. ศึกษาขั้นตอนการทำงานและความเหมาะสมของวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์
3. หาค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการออกแบบเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ
4. หามาตรฐานควบคุมคุณสมบัติของสารละลายโพลีเมอร์ที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์สามารถนำไปใช้ได้ในงานก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินหลายๆประเภทและสามารถนำไปใช้กับชั้นดินหลายลักษณะ การศึกษาพฤติกรรมของโพลีเมอร์จำเป็นต้องมีการจำกัดขอบเขตเพื่อให้ผลการวิจัยมีความสอดคล้องกับการใช้งานในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ

1. แบบจำลองที่ใช้ทดสอบใช้เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake), การไหลของสารละลายผ่านชั้นทราย และแรงเสียดทานระหว่างทรายกับผิวคอนกรีต โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2. ทรายนี้นำมาใช้เป็นทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1 และ 2 โดยตัวอย่างทรายจะเก็บขณะนำดินขึ้นจากหลุมเจาะโดยใช้ถังเจาะ (Drilling Bucket)
3. ตัวแปรต่างๆที่ใช้วิเคราะห์ ได้แก่ การเกิดเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake), การไหลของสารละลายผ่านชั้นทราย และพารามิเตอร์กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม
4. ข้อมูลในสนามที่ใช้วิเคราะห์ ได้แก่ ข้อมูลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม, ขั้นตอนการก่อสร้าง, ความหนาของตะกอนก้นหลุมต่อเวลาขณะที่ปล่อยให้เกิดการตกตะกอน และคุณสมบัติของสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษาพฤติกรรมของโพลีเมอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างประโยชน์ในทางวิศวกรรมดังนี้

1. เข้าใจถึงพฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์และสารละลายเบนโทไนท์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก โดยเฉพาะการเกิดเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake), การไหลผ่านชั้นทราย และการตกตะกอนของทรายในสารละลายโพลีเมอร์
2. ได้ค่าพารามิเตอร์กำลังรับน้ำหนักสำหรับเสาเข็มเจาะที่ทำการเจาะโดยใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ
3. ได้แนวทางเพื่อนำไปประยุกต์ในการออกแบบและสร้างข้อกำหนดของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานสารละลายโพลีเมอร์

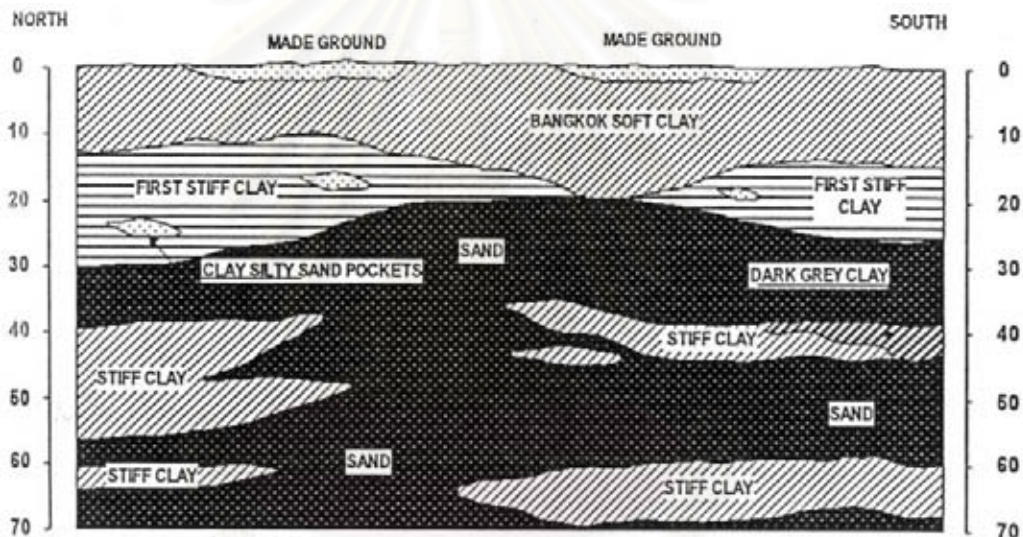
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพฯ ฯ

ชั้นดินกรุงเทพฯ ฯ มีลักษณะเป็นชั้น ๆ ซึ่งเกิดจากการตกตะกอน ประกอบด้วยตะกอนปากแม่น้ำและตะกอนทะเล (Alluvial Soil and Marine Deposit) ตัวเมืองกรุงเทพฯ ฯ ตั้งอยู่บนห่างจากอ่าวไทยประมาณ 20 กิโลเมตร ระยะจากเหนือถึงใต้และจากตะวันออกถึงตะวันตกประมาณ 250 และ 200 กิโลเมตรตามลำดับ พื้นที่รวมประมาณ 53,400 ตารางกิโลเมตร (ว.ส.ท.2520)



รูปที่ 2-1 สภาพชั้นดินทั่วไปในกรุงเทพฯ ฯ (ว.ส.ท.2520)

2.1.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ ฯ

ในอดีตที่ผ่านมาได้เคยมีการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของชั้นดินกรุงเทพฯ ฯ เอาไว้มากมาย ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละชั้นดินดังแสดงในรูป 2-1 ดังนี้

1. ดินชั้นบน (Top Soil or Weathered Bangkok Clay) มีความหนาของชั้นดินประมาณ 1-2 เมตร ดินมีลักษณะเป็นดินเหนียวสีเทาและน้ำตาล มีความแข็งระดับปานกลางเนื่อง

จากดินชั้นนี้ถูกแปรสภาพมากโดยกระบวนการเสื่อมสลาย (Aging) บริเวณพื้นที่ใกล้ปากอ่าวไทยจะไม่ค่อยพบดินลักษณะนี้

2. ชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงแข็งปานกลาง (Very Soft to Medium Stiff Marine Clay) ความหนาของดินชั้นนี้ประมาณ 10-15 เมตร ลักษณะเป็นดินเหนียวสีเทาเข้มหรือสีเทาปนเขียวเนื่องจากเป็นดินที่เกิดจากการตกตะกอนในทะเล ดินประเภทนี้จะมีความไวตัว (Sensitivity) สูง และมีค่าประมาณความชื้นในมวลดินสูง อยู่ใกล้กับความชื้นที่ขีดเหลว (Liquid Limit, LL) และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ประมาณ 10-20 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
3. ชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (Stiff to Very Stiff Clay) ชั้นดินนี้หนาประมาณ 5-15 เมตร มีลักษณะเป็นดินเหนียวสีเทาหรือน้ำตาล ความหนาของดินจะน้อยในบริเวณส่วนกลางของกรุงเทพฯ ค่าปริมาณความชื้นในมวลดินจะมีค่าประมาณ 20-30% และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ประมาณ 100-150 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
4. ชั้นทรายชั้นแรก (First Silty Sand Layer) จะพบที่ความลึกประมาณ 20 เมตรขึ้นไป ความหนาของชั้นทรายอยู่ระหว่าง 5-15 เมตร ทรายในชั้นนี้เป็นทรายเม็ดละเอียดอาจพบดินเหนียวหรือทรายแป้ง (Silt) ปนอยู่บ้าง ทรายชั้นนี้มีค่ามุมต้านทานภายใน (ϕ') ประมาณ 32° - 35°
5. ชั้นดินเหนียวมากถึงดินเหนียวแข็งดินดาน (Very Stiff to Hard Clay) ชั้นดินจะอยู่ถัดจากทรายชั้นแรก บางพื้นที่ในกรุงเทพฯ อาจไม่พบดินชั้นนี้ อัตราส่วนการอัดแน่นเกินตัว (OCR) ของดินในชั้นนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับหนึ่ง คือ ใกล้เคียงสภาพอัดแน่นปกติ (Slightly Overconsolidated or Normally Consolidated Clay) และมีค่า S_u มากกว่า 200 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
6. ชั้นทรายชั้นที่สอง (Second Sand Layer) ตามปกติจะพบทรายชั้นนี้มีความลึกมากกว่า 40 เมตรลงไป อาจพบดินเหนียวหรือทรายแป้ง (Silt) ผสมอยู่ด้วย สภาพของทรายในชั้นนี้มีสภาพแน่นมาก และมีค่ามุมต้านทานภายใน (ϕ') ประมาณ 33° - 36°

2.1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ ฯ

ในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม จำเป็นต้องมีการหาพารามิเตอร์ของชั้นดินต่าง ๆ ในชั้นทรายค่าที่ต้องการพิจารณาคือ ค่ามุมต้านทานภายใน (Angle of Internal Resistance, ϕ') และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Stress) สำหรับดินเหนียวค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการคือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u)

ค่าต่าง ๆ ข้างต้นบางค่าสามารถหาได้จากการทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หรือได้จากการเก็บข้อมูลในสนาม ในกรณีที่ไม่สามารถวัดค่าคุณสมบัติของดินได้โดยตรงก็สามารถหาพารามิเตอร์ด้วยความสัมพันธ์แบบสูตรสำเร็จ (Empirical) ซึ่งไม่มีรากฐานมาจากทฤษฎี และใช้ได้เฉพาะบางพื้นที่เท่านั้น สำหรับดินกรุงเทพฯ ฯ ได้เคยมีการวิจัยและหาค่าต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละชั้นดินดังนี้

2.1.2.1 ชั้นทราย

เนื่องจากในกรุงเทพฯ ฯ มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้มาก ทำให้ค่าแรงดันน้ำในมวลดินที่ระดับความลึกมากกว่า 10 เมตร มีการเปลี่ยนแปลงไป ผลกระทบนี้จะทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (σ'_{vt}) มีค่าเพิ่มขึ้น

พารามิเตอร์ที่จะต้องพิจารณาในชั้นทราย มีดังนี้

- ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Stress, σ'_{vt})
- การคำนวณค่า σ'_{vt} จะต้องทราบลักษณะดิน คือ ความลึกของแต่ละชั้นดิน, หน่วยน้ำหนักรวมของมวลดิน (Total Unit weight of Soil), และค่าแรงดันน้ำในมวลดิน ณ จุดที่พิจารณา (Pore Water Pressure at a Particular Depth) ซึ่งหาได้โดยการวัดในสนามหรือใช้ความสัมพันธ์แบบสูตรสำเร็จ (Empirical) ที่เคยศึกษามา

ค่าแรงดันน้ำในมวลดินสำหรับดินในกรุงเทพฯ ฯ จะต้องพิจารณาผลของการสูบน้ำใต้ดินด้วย ซึ่งผลกระทบนี้จะทำให้แรงดันน้ำในมวลดินมีค่าต่ำกว่าแรงดันน้ำสถิตย (Hydrostatic Pore Water Pressure) ที่ความลึกมากกว่า 10 เมตร ซึ่ง NG (1983) ได้เสนอความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1 นี้

$$U = 0.747 (D-15), D \geq 15 \quad (2.1)$$

เมื่อ

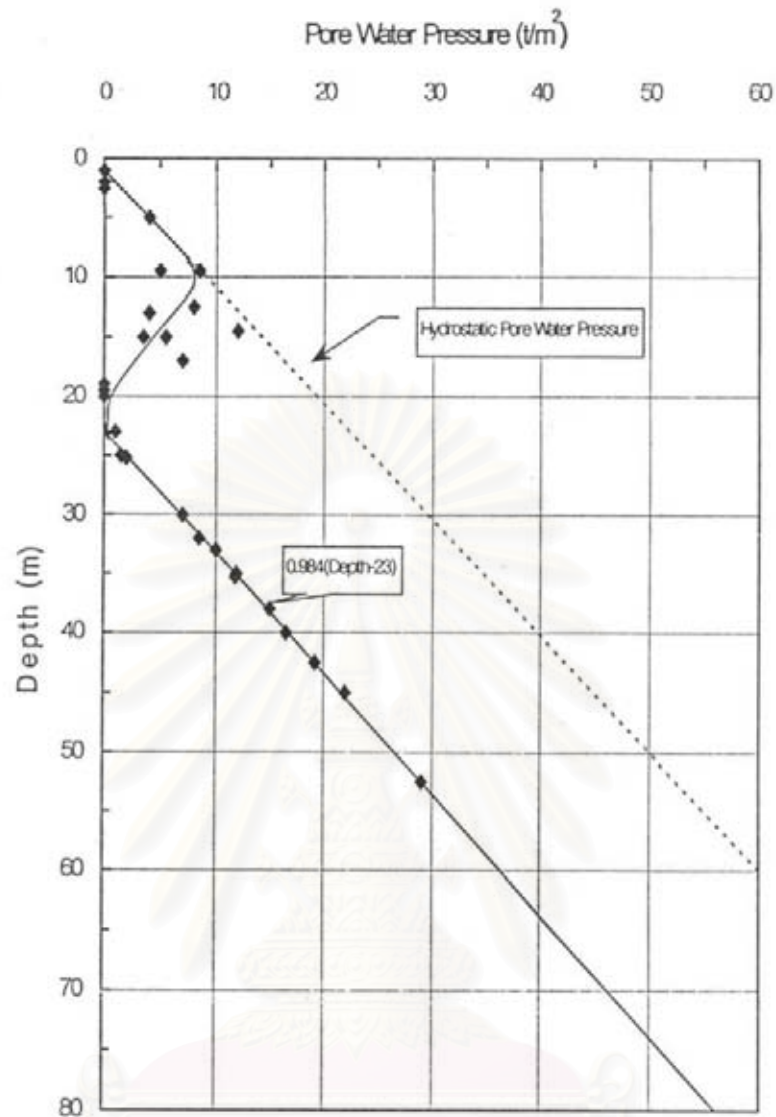
U = แรงแดันน้ำใต้ดิน (ตันต่อตารางเมตร)

D = ความลึก (เมตร)

จากข้อมูลการวัดแรงแดันน้ำใต้ดินของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินรถไฟฟ้ามหานครในปี พ.ศ. 2542 และผลการขุดดินเพื่อก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินระหว่างปี พ.ศ. 2542-2544 (วันชัย 2544, Teparaksa, 1999, 2000) พบว่าผลของการสูบน้ำใต้ดินในกรุงเทพฯ ทำให้ค่าแรงแดันน้ำใต้ดินเปลี่ยนไปจาก NG (1983) ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงแดันน้ำใต้ดินในสมการที่ 2.2 ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 2-2

$$U = 0.984 (D-23), D \geq 23 \quad (2.2)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-2 แรงดันน้ำใต้ดินในกรุงเทพฯ (วัดเมื่อปี พ.ศ. 2542)

- ค่ามุมต้านทานภายใน (Angle of Internal Resistance, ϕ') ในชั้นทรายจะมีความสัมพันธ์กับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress, σ'_{v1}) การหาค่ามุม ϕ' สามารถหาได้ในห้องปฏิบัติการโดยการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear) หรือการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ (Consolidated Drained Triaxial Test, CD) แต่ความถูกต้องของผลทดสอบจะขึ้นอยู่กับสภาพของตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบ ตามปกติตัวอย่างทรายที่ถูกเก็บขึ้นมาจะอยู่ในสภาพถูกรบกวน (Disturbed Sample) ทำให้ตัวอย่างที่นำไปทดสอบต่างจากสภาพในธรรมชาติ จึงเป็นการยากที่จะสรุปว่าค่ามุมต้านทานภายใน (ϕ') ที่ได้จากห้องปฏิบัติการมีค่าใกล้เคียงกับในธรรมชาติหรือไม่

การทดสอบในสนามเพื่อหาค่ามุมต้านทานภายใน (ϕ') ทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์แบบ สูตรสำเร็จ (Empirical) ซึ่งได้มีผู้เสนอไว้มากมาย เช่น ในดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand, SC) วีระนันท์ (2526) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมต้านทานภายใน (ϕ') กับจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) ซึ่งหาได้จากการวิเคราะห์หาค่ากลับจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ ๗ คือ

$$\phi' = 12.041 N^{0.162} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$N = \text{จำนวนครั้งต่อฟุตของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT) โดยไม่ต้องทำการปรับแก้}$$

Peck, Hanson & Thornburn (1974) ได้เสนอความสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับทรายละเอียดที่มีทรายแป้ง (Silt) ปนอยู่ได้บ้างแต่ไม่มีดินเหนียวปนอยู่ สำหรับทรายชั้นที่หนึ่งและสอง ในกรุงเทพฯ ๗ ก็มีลักษณะเป็นทรายละเอียดปนทรายแป้ง (Silty Sand, SM) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ Thanudkleung (1987) ยังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมต้านทานภายใน (ϕ') กับค่า $N_{corrected}$ ที่ได้มีความใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ของ Peck, Hanson & Thornburn (1974) ค่า $N_{corrected}$ เป็นค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) ที่ทำการปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress, σ'_{vi}) ซึ่ง Peck, Hanson & Thornburn (1974) ได้เสนอไว้ดังนี้

$$N_{corrected} = C_N \cdot N \quad (2.4)$$

$$C_N = 0.77 \log \left(\frac{1915}{\sigma'_{vi}} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$N = \text{ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) หน่วยเป็น (ครั้งต่อฟุต)}$$

$$C_N = \text{ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง}$$

$$\sigma'_{vi} = \text{หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress, } \sigma'_{vi} \text{) มีหน่วยเป็น (kN/m}^2\text{)}$$

โดยความสัมพันธ์ของ Peck , Hanson & Thornburn (1974) สามารถใช้ในการคำนวณสมการของ Wolf (1989) เพื่อหาค่ามุมต้านทานภายใน (ϕ') คือ

$$\phi' = 27.1 + 0.3 N_{\text{corrected}} - 0.00054 N_{\text{corrected}}^2 \quad (2.6)$$

ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) สามารถนำไปหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทราย (Relative Density) ได้ เนื่องจากค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) จะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress, σ'_{vi}) ของดินและประวัติของแรงในดิน (Stress History) โดย Marcuson and Bieganousky (1977) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) กับค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density) ของทรายไว้ดังนี้

$$D_r = 11.7 + 0.76(222N_f + 1600 - 53\sigma'_{vi} - 50C_u^2)^{0.5} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$D_r = \text{ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density) มีหน่วยเป็น \%}$$

$$N_f = \text{ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) โดยยังไม่ทำการปรับแก้ มีหน่วยเป็น (ครั้ง/ฟุต)}$$

$$\sigma'_{vi} = \text{หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress, } \sigma'_{vi} \text{) มีหน่วยเป็น (lb/in}^2\text{)}$$

$$C_u = \text{สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของดิน (Uniformity Coefficient of the Soil)}$$

2.1.2.2 ดินเหนียว

ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (S_u) สามารถหาได้จากทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบในสนาม สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการค่า S_u จะได้จากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดแรง (Unconfined Compression Test, UC) หรือโดยการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Unconsolidated Undrained Triaxial Test, UU) แต่ตัวอย่างดินที่จะนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการจะต้องอยู่ในสภาพไม่ถูกรบกวน (Undisturbed Sample) เพื่อที่จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับสภาพในธรรมชาติ การทดสอบในสนามสามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ได้จากการทดสอบใบพัดในสนาม (Field Vane Test, FV) ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง หรือจากความสัมพันธ์แบบสูตรสำเร็จ (Empirical) ระหว่างค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ในชั้นดินเหนียวแข็ง S_u ที่ได้จากการทดสอบใบพัดในสนาม (FV) จะมีค่าสูงเกินไปจึงต้องทำการปรับแก้เสนอโดย Bjerrum (1972) โดยสมการ

$$S_{u(\text{correct})} = \lambda S_{u(\text{FV})} \quad (2.8)$$

$$\lambda = 1.7 - 0.54 \log(\text{PI})$$

เมื่อ

λ = ค่าปรับแก้สำหรับการทดสอบใบพัดในสนาม (Field Vane Test, FV)

PI = พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, %)

สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ชั้นแรก วีระนันท์ (2526) ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) กับ ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับดินเหนียวแต่ละประเภทดังนี้

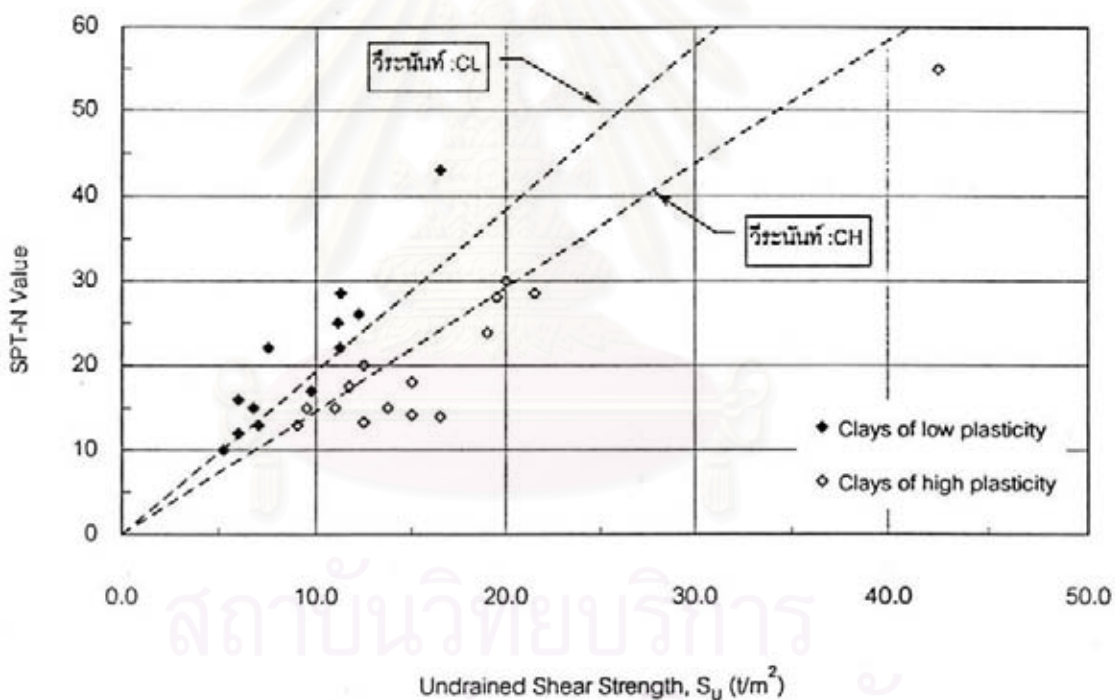
$$S_{u(\text{CH})} = 0.685 \text{ N} \text{ สำหรับดินเหนียวแบบ CH (T/m}^2\text{)} \quad (2.9)$$

$$S_{u(\text{CL})} = 0.520 \text{ N} \text{ สำหรับดินเหนียวแบบ CL (T/m}^2\text{)} \quad (2.10)$$

เมื่อ

N = ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) ที่ยังไม่ทำการปรับแก้และควรมีค่ามากกว่า 8 (หน่วยเป็นครั้งต่อฟุต)

ซึ่งการจำแนกประเภทของดินเหนียวต้องใช้ระบบจำแนกดินแบบยูนิไฟด์ (Unified Soil Classification) นอกจากนี้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) กับค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ของแมนสรวง, มนัสพลและ ณัฐพล (2540) พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลวิจัยของวีระนนท์ ซึ่งความสัมพันธ์นี้ได้แสดงในรูป 2-3



รูปที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งของ SPT กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของชั้นดินกรุงเทพฯ (แมนสรวง, มนัสพล และณัฐพล, 2540)

2.2 ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก

เสาเข็มเจาะระบบเปียกจัดเป็นเสาเข็มที่ไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างการก่อสร้างเสาเข็ม (Non-Displacement Pile) ในการก่อสร้างจำเป็นต้องมีระบบรักษาเสถียรภาพของดินด้านข้างของหลุมเจาะโดยในชั้นดินเหนียวอ่อนจะใช้ปลอกเหล็ก (Casing) เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวด้านข้างในดินเหนียวอ่อน และใช้สารรักษาเสถียรภาพ (Drilling Slurry) ประเภทเบนโทไนท์หรือโพลีเมอร์ เมื่อทำการขุดเจาะถึงชั้นทราย ซึ่งการใช้สารรักษาเสถียรภาพแต่ละประเภทนั้นก็จะทำให้ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างแตกต่างกันออกไปด้วยและในบางสถานที่ก่อสร้าง ก็ยังมีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็ม (Base Grouting) อีกด้วย รายละเอียดของขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างมีดังนี้

2.2.1 เสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Slurry) เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ

สารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ผนังของหลุมเจาะพังหรือ เกิดการเคลื่อนตัวมากเกินไป โดยทั่วไปความลึกที่จะก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกจะมีปลายเสาเข็มหยั่งลงในทรายชั้นที่หนึ่งหรือชั้นที่สองและมีขนาดตั้งแต่ 0.80 - 1.50 เมตร เนื่องจากสารละลายเบนโทไนท์จะมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าน้ำ ทำให้แรงดันของสารละลายเพียงพอที่จะป้องกันการเคลื่อนตัวของดินเหนียว สำหรับในชั้นทรายสารละลายเบนโทไนท์จะเกิดพฤติกรรมเยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake) ทำให้ผิวหน้าของทรายไม่หลุดร่วงลงไปหลุมเจาะและตัวเยื่อที่บนน้ำยังทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายแรงดันจากสารละลายไปที่ผนังเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวด้านข้างของทรายอีกด้วย

ขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขปสำหรับเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์มีดังนี้

1. ผสมเบนโทไนท์แล้วสูบขึ้นไปในถังเก็บ ปล่อยให้เบนโทไนท์ดูดน้ำให้เต็มที่ (Fully Hydrated) ประมาณ 24 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำมาใช้งานได้ ซึ่งอัตราส่วนการผสมของผงเบนโทไนท์กับน้ำที่เหมาะสมในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะอยู่ที่ประมาณ 3-6 % โดยน้ำหนัก

2. ทำการลงปลอกเหล็ก (Casing) เพื่อป้องกัน การเคลื่อนตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน ตามปกติปลอกเหล็กที่ใช้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จะยาวประมาณ 15 เมตร การติดตั้งปลอกเหล็กจะใช้ค้อนสั่น (Vibro Hammer) เป็นตัวดันลง
3. เจาะดินในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลางโดยใช้สว่าน (Auger) เป็นหัวเจาะจนถึงความลึกก่อนถึงชั้นทรายเนื่องจากการเจาะโดยใช้สว่านจะสามารถทำงานได้สะดวกและรวดเร็วกว่าการใช้หัวเจาะแบบถัง
4. เมื่อเจาะถึงความลึกในชั้นทรายเปลี่ยนหัวเจาะเป็นแบบถัง (Drilling Bucket) แล้วเติมสารละลายเบนโทไนท์ลงในหลุมเจาะ แล้วทำการเจาะจนถึงระดับที่ต้องการ
5. ทำความสะอาดกันหลุมโดยใช้เครื่องเป่าลม (Air Lift) เนื่องจากเม็ดดินขนาดเล็กในหลุมเจาะจะแขวนลอยอยู่ในสารละลายเบนโทไนท์ เครื่องเป่าลมจะไล่เม็ดดินเหล่านั้นขึ้น
6. ลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีตใต้น้ำผ่านท่อเท (Tremie Pipe)
7. สูบสารละลายเบนโทไนท์ไปที่ถังพัก ทำกระบวนการกรองทราย (Desanding) และปรับแต่งคุณสมบัติ เพื่อที่จะนำกลับมาใช้อีก
8. ทำการถอนปลอกเหล็กออก

2.2.2 เสาค้ำเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ (Polymer Slurry) เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ

เนื่องสารละลายโพลีเมอร์มีพฤติกรรมแตกต่างไปจากสารละลายเบนโทไนท์ ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างก็จะแตกต่างออกไปบ้าง ในการก่อสร้างเสาค้ำจะมีการเติมสารละลายเบนโทไนท์ลงไปจำนวนเล็กน้อย เพื่อลดการซึมผ่านที่สูงเกินไปในชั้นทราย และยังช่วยเพิ่มค่าความหนาแน่นอีกเล็กน้อยในสารละลายเพื่อให้แรงดันในสารละลายสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมส่วนใหญ่จะถูกควบคุมโดยสารละลายโพลีเมอร์

เม็ดดินขนาดเล็กจะไม่แขวนลอยอยู่ในสารละลายโพลีเมอร์เนื่องจาก ความหนาแน่นของ สารละลายมีค่าสูงกว่าน้ำเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 1.01 g/cm^3), สารละลายไม่มีกำลังรับแรง เชื้อน และสารละลายโพลีเมอร์ยังมีความสามารถในการทำให้เม็ดดินขนาดเล็กรวมตัวกันจนมีน้ำ หนักมากพอที่จะตกตะกอนได้ ดังนั้นวิธีการเก็บตะกอนก้นหลุมก็จะแตกต่างจากการใช้สารละลาย เบนโทไนด์ออกไป

ขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขปสำหรับเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ มีดังนี้

1. ผสมเบนโทไนด์ (อัตราส่วนขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นดิน) จากนั้นจึงผสมโพลีเมอร์ตามลง ไปโดยใช้ถังผสม (Recirculation Pump) ดังรูป 2-4 เนื่องจากปริมาณของเบนโทไนด์ที่ ผสมมีน้อยจึงไม่จำเป็นที่จะต้องทิ้งไว้เพื่อให้เบนโทไนด์ดูดน้ำ เมื่อสูบเก็บในถังเก็บสาร ละลายดังรูปที่ 2-5 อาจใช้เวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้โพลีเมอร์ละลายเต็มที่และ เบนโทไนด์ดูดน้ำก่อนนำมาใช้งาน
2. ทำการลงปลอกเหล็ก ซึ่งลักษณะของปลอกเหล็กแสดงในรูปที่ 2-6 และขั้นตอนเหมือน กับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนด์
3. เจาะดินโดยใช้สว่าน (Drilling Auger) ดังรูปที่ 2-7 จนถึงระดับก่อนถึงชั้นทราย
4. เติมสารละลายโพลีเมอร์ลงในหลุมเจาะดังแสดงในรูปที่ 2-8 เปลี่ยนหัวเจาะเป็นแบบถัง (Drilling Bucket) ดังรูปที่ 2-9 แล้วเจาะถึงระดับที่ต้องการ
5. เมื่อเจาะถึงระดับที่ต้องการให้รอเวลาเพื่อให้เกิดการตกตะกอนในหลุมเจาะเต็มที่ ซึ่ง ระยะเวลาจะขึ้นกับลักษณะชั้นดิน ความลึกของหลุมเจาะและปัจจัยอื่นๆ ทำการตรวจ สอบสภาพหลุมเจาะโดยเครื่องมือตรวจสอบหลุมเจาะ (Borehole Monitor) ดังแสดงใน รูปที่ 2-10 จากนั้นจึงใช้ถังเก็บตะกอน (Cleaning Bucket) เก็บตะกอนก้นหลุมดังแสดง ในรูปที่ 2-11
6. ลงเหล็กเสริมดังรูปที่ 2-12 และเทคอนกรีตผ่านท่อเทโดยใช้ท่อเท (Tremie Pipe) ดัง แสดงในรูปที่ 2-13

7. สูบสารละลายไปไว้ที่ถังพักสารละลาย (Sediment Tank) ในรูปที่ 2-14 ได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการกรองทราย แล้วจึงทำการปรับแต่งคุณสมบัติเพื่อที่จะนำกลับมาใช้อีก
8. ทำการถอนปลอกเหล็กออกและได้เสาเข็มที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 2-15



รูปที่ 2-4 ถังผสม (Recirculation Pump) ใช้ผสมสารละลาย



รูปที่ 2-5 ถังเก็บสารละลายเพื่อนำสู่หลุมเจาะ



รูปที่ 2-6 ปลอกเหล็ก (Casing) ป้องกันในชั้นดินเหนียวอ่อน



รูปที่ 2-7 สว่านเจาะดิน (Drilling Auger)



รูปที่ 2-8 เติมสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะลงไปเมื่อขุดเข้าใกล้ชั้นทรายชั้นแรก



รูปที่ 2-9 หัวขุดเจาะแบบถัง (Drilling Bucket)



รูปที่ 2-10 อุปกรณ์ตรวจสอบสภาพหลุมเจาะ (Borehole Monitor)



รูปที่ 2-11 การเก็บตะกอนจากหลุมเจาะ



รูปที่ 2-12 การลงเหล็กเสริม



รูปที่ 2-13 ท่อเท (Tremie Pipe) ใช้ในการเทคอนกรีตใต้น้ำ



รูปที่ 2-14 ถังพักตะกอน (Sediment Tank)



รูปที่ 2-15 เสาค้ำที่เสร็จสมบูรณ์

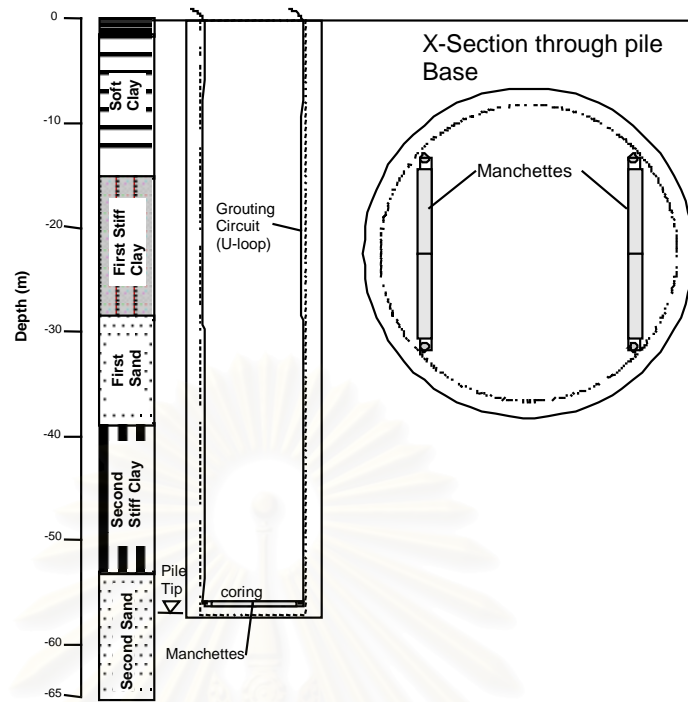
2.2.3 เสาค้ำที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาค้ำ (Base Grouted Pile)

การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาค้ำ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกำลังต้านทานที่ปลายเสาค้ำ (End Bearing) และลดการทรุดตัวของเสาค้ำเนื่องจากปัญหาตะกอนก้นหลุม (Soft Base)

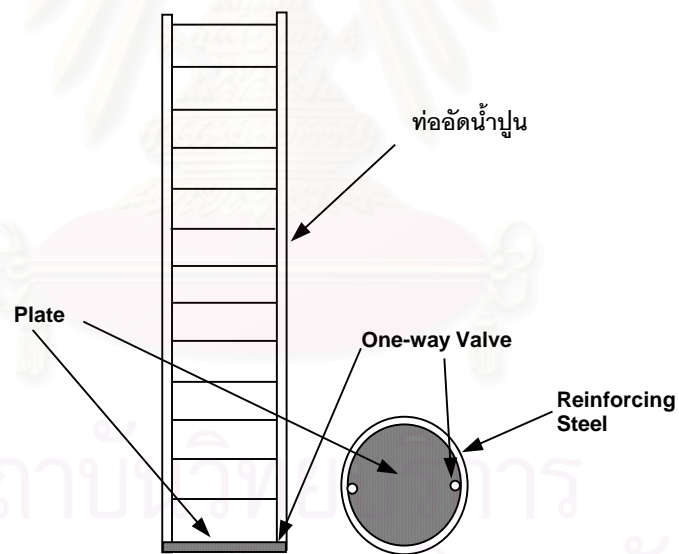
เนื่องจากขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างทั้งโดยการใส่สารละลายเบนโทไนท์และสารละลายโพล์ลิเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพอาจทำให้เกิดตะกอนตกค้างที่ก้นหลุม ในกรณีของการใช้

เบนโทไนท์นั้น เม็ดดินส่วนใหญ่จะแขวนลอยอยู่ในสารละลาย การไล่ตะกอนขึ้นจะใช้เครื่องเป่าลม (Air Lift) ซึ่งถ้าควบคุมการก่อสร้างไม่ดีหรือปริมาณตะกอนมีมากเกินไปก็อาจทำให้มีตะกอนก้นหลุม ตกค้างอยู่มาก สำหรับการใส่สารละลายโพลีเมอร์เม็ดดินส่วนใหญ่จะตกตะกอนภายในระยะเวลาหนึ่งจากนั้นจะใช้ถังเก็บตะกอนเก็บขึ้นมาก่อนทำการลงเหล็กเสริม ถ้าไม่ปล่อยระยะเวลาให้เกิดการตกตะกอนเต็มที่ แล้วทำการลงเหล็กเสริมหรือใช้ระยะเวลาในการลงเหล็กเสริมนานเกินไปอาจทำให้เกิดตะกอนตกค้างที่ก้นหลุมได้

วิธีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่ใช้อยู่ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะมีอยู่ 2 ระบบได้แก่ ระบบท่ออยู่ (U-Tube หรือ Tube-a-Manchette) และระบบแผ่นราบ (Flat Plate) โดยระบบท่ออยู่ (Tube-a-Manchette) จะประกอบไปด้วยท่อซึ่งจะยึดกับโครงเหล็กเสริมของเสาเข็มโดยท่อนี้จะต่อกับท่ออัดน้ำปูน (Grout หรือ Manchette) ที่วางอยู่ที่ปลายหรือก้นของหลุมเจาะและท่อนี้จะต่อกับแกนท่ออัดน้ำปูน (Manchette) ทั้ง 2 ข้างเป็นรูปตัวยู (U) ดังแสดงในรูปที่ 2-16 อีกระบบของการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มคือระบบแผ่นราบ (Flat Plate) จะทำการติดตั้งแผ่นราบ (Flat Plate) ที่ปลายเสาเข็มและติดตั้งแม่แรง (Flat Jack) หรือท่อทางเดียว (One Way Valve) ที่แผ่น (Plate) และต่อท่อขึ้นมาโดยยึดติดกับโครงเหล็กดังแสดงในรูป 2-17 ตามปกติน้ำปูนที่ใช้อัดฉีดจะมีอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ประมาณ 0.50-0.55 โดยควบคุมความดันในการอัดฉีดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 2000 ถึง 4000 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร หรือ 20-40 บาร์ ซึ่งค่าที่จะเลือกจะใช้จะขึ้นกับสภาพของดิน (ในชั้นดินกรุงเทพฯจะเป็นทรายชั้นที่ 2) กำลังที่ต้องการและระยะเวลาที่การอัดฉีดจะแทรกไปในชั้นดินได้



รูปที่ 2-16 ท่อฉีดน้ำปูน (Tube-a-Manchette)



รูปที่ 2-17 ระบบการอัดน้ำปูนแบบแผ่นราบ (Flat Plate)

โดยทั่วไปการอัดฉีดน้ำปูนจะกระทำภายหลังจากการเทคอนกรีตในหลุมเจาะเสร็จประมาณ 24 ชั่วโมง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการล้างท่ออัดฉีดด้วยน้ำจนสะอาด (Water Flushing) จะกระทำประมาณ 6 ชม.หลังจากเทคอนกรีตแล้วเพื่อล้างท่อซึ่งอาจจะอุดตันได้

2. ฉัดน้ำด้วยแรงดันสูงเพื่อเปิดคอนกรีตที่ปลายเสาเข็ม (หลังจากคอนกรีตมีอายุประมาณ 24 ชั่วโมง)
3. ฉัดฉีดปูนลงไปปลายเสาเข็ม
4. ทำความสะอาดท่อด้วยน้ำสะอาดเพื่อทำการฉัดฉีดน้ำปูนในรอบต่อไป
5. ทำการฉัดฉีดโดยใช้น้ำปูนเป็นตัวเปิดคอนกรีตที่ปลายเสาเข็มและทำการฉัดฉีด
6. ทำความสะอาดท่อด้วยน้ำและทำการฉัดฉีดเหมือนขั้นตอนที่ 5 จนได้จำนวนรอบครบตามที่ออกแบบไว้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 พฤติกรรมของสารรักษาเสถียรภาพ

2.3.1 พฤติกรรมของเบนโทไนท์

ในขั้นตอนของการสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกเมื่อเจาะจนถึงระดับที่มีน้ำใต้ดินซึมเข้ามาหรือว่าหลุมเจาะไม่สามารถรักษาสภาพด้วยตัวเองได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใส่สารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะลงไปเพื่อป้องกันหลุมพัง หลายสิบปีที่ผ่านมาสารละลายเบนโทไนท์ถูกใช้งานเป็นสารรักษาเสถียรภาพในงานขุดเจาะเสาเข็มและก่อสร้างกำแพงกันดิน เนื่องจากเบนโทไนท์เป็นสารประเภทสารประกอบดินเหนียว (Clay Mineral) ซึ่งบรรจุขายในเชิงพาณิชย์เพื่อการใช้งานอยู่ในรูปของผงสีน้ำตาลละเอียดที่สามารถขยายตัวได้มากเมื่อผสมกับน้ำโดยจะมีคุณสมบัติเป็นสารประเภทคอลลอยด์ รูปที่ 2-18 และ 2-19 แสดงตัวอย่างของเบนโทไนท์ผงและเมื่อผสมกับน้ำตามลำดับ และคุณสมบัติของเบนโทไนท์ที่สามารถที่จะปรับปรุงจนอยู่ในช่วงที่ต้องการได้โดยเลือกอัตราส่วนของเบนโทไนท์ ซึ่งสามารถเลือกใช้กับงานเจาะเสาเข็มหรือการก่อสร้างกำแพงกันดินก็ได้ พฤติกรรมของเบนโทไนท์ในหลุมเจาะสามารถอธิบายได้ดังนี้



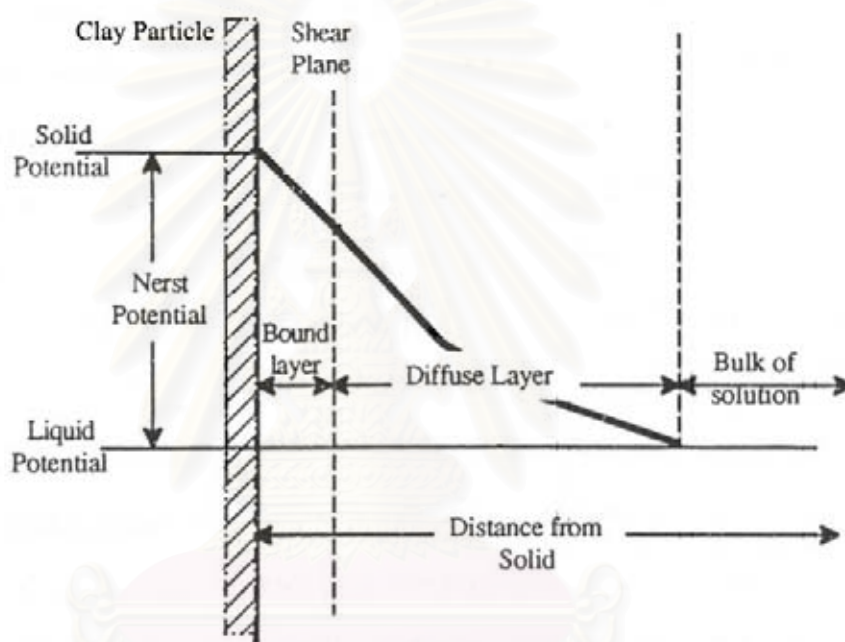
รูปที่ 2-18 ลักษณะของผงเบนโทไนท์



รูปที่ 2-19 เบนโทไนท์เมื่อผสมน้ำ (ส่วนผสม 5% โดยน้ำหนัก)

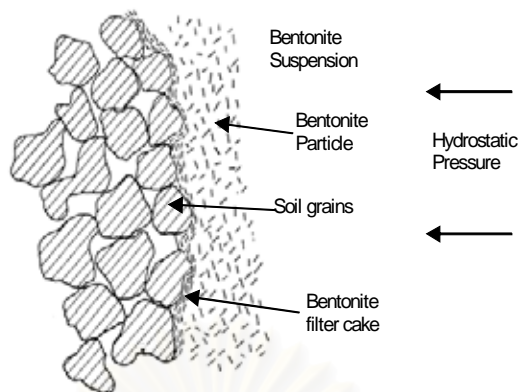
เบนโทไนท์ที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยจัดอยู่ในประเภทเบนโทไนท์ที่เติมโซเดียม (Sodium-activated Bentonite) ซึ่งสามารถผลิตขึ้นเองได้ในประเทศ ผงเบนโทไนท์ประกอบไปด้วยอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) ที่เรียกว่าไซเดียมมอนท์มอริลโลไนท์ (Na-Montmorillonite) ซึ่งมีขนาดที่เล็กมาก ($\approx 10 \text{ \AA}$) เมื่อผสมผงเบนโทไนท์ลงในน้ำจะเกิดการดูดน้ำ (Hydrated) เนื่องจากประจุบวกในน้ำจะถูกดึงดูดด้วยประจุลบที่ผิว (Face) ของอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) เรียกว่าวงน้ำ (Double Layer หรือ Diffuse Layer) วงน้ำนี้จะป็นระยะที่อนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) สามารถดูดน้ำได้ทำให้ขนาดของอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle)

สามารถขยายออกได้ดังแสดงในรูปที่ 2-20 สำหรับเบนโทไนท์ที่ดูดน้ำแล้ว (Hydrated Na-Montmorillonite) นั้นวงน้ำ (Double Layer) จะมีขนาดใหญ่มากทำให้มีการขยายตัวได้อย่างมาก ตามปกติในการก่อสร้างจะผสมผงเบนโทไนท์ในอัตราส่วน 3-6% กับน้ำโดยน้ำหนัก และทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการดูดน้ำเต็มที่ (Fully Hydrated) ประมาณ 24 ชั่วโมง เมื่อใส่สารละลายเบนโทไนท์ลงในหลุมเจาะจะทำให้เกิดแรงดันต้านการพังของหลุมเจาะได้ ส่วนดินเม็ดละเอียดจําพวกทรายละเอียด, ทรายแป้ง (Silt) จะแขวนลอยผสมอยู่กับสารละลายเบนโทไนท์ เนื่องจากสารละลายมีกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength)

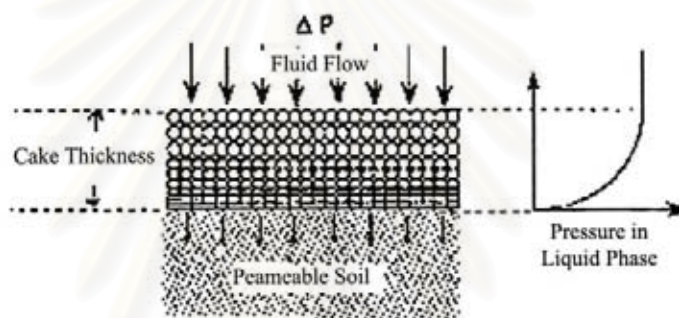


รูปที่ 2-20 วงน้ำ (Double Layer) ของอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle)

ในชั้นดินที่มีค่าการซึมผ่านสูงเช่นชั้นทราย สารละลายเบนโทไนท์จะเกิดพฤติกรรมที่เรียกว่า การเกิดเยื่อที่บ้น้ำ (Filter Cake Formation) ดังแสดงในรูปที่ 2-21 ซึ่งเยื่อที่บ้น้ำจะเกิดขึ้นเมื่อของเหลวในสารละลายซึมผ่านดิน และทิ้งให้ส่วนที่เป็นของแข็งในสารละลายสะสมตัวเป็นแผ่นขึ้น และจะทำให้ส่วนที่เป็นของเหลวซึมผ่านดินได้น้อยลง ทำให้แรงดันจากสารละลายเบนโทไนท์ถ่ายผ่านเยื่อที่บ้น้ำ (Filter Cake) ไปที่ดินได้ ซึ่งความแข็งแรงของเยื่อที่บ้น้ำจะขึ้นอยู่กักระยะห่างจากผิวหน้าของทรายเป็นดังแสดงในรูปที่ 2-22 ความหนาและความแข็งแรงของเยื่อที่บ้น้ำนี้อาจขึ้นกับปัจจัยหลายๆอย่างเช่น ความแตกต่างของความดันระหว่างสารละลายกับน้ำในดิน, ชนิดและปริมาณของแข็งในสารละลายที่ใช้, ค่าการซึมผ่านในดินและเยื่อที่บ้น้ำ (Filter Cake), ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับดิน



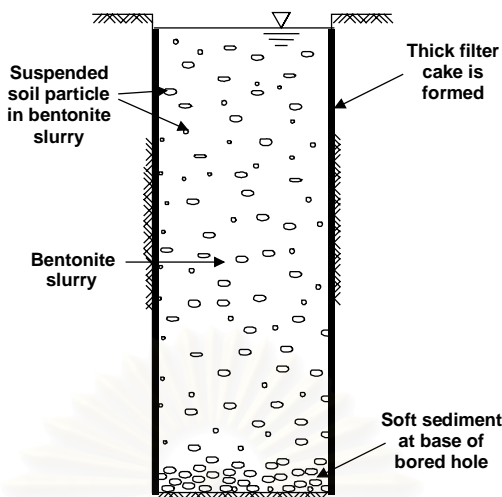
รูปที่ 2-21 การเกิดเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake) ในชั้นทรายเมื่อใช้สารละลายเบนโทไนท์



รูปที่ 2-22 ความแข็งของเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake)

เมื่อสารละลายเบนโทไนท์ถูกทิ้งไว้โดยไม่ถูกรบกวนเป็นเวลานานจะเกิดปรากฏการณ์คืนกำลัง (Thixotropy) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ของอนุภาคดินเหนียว (Clay Mineral) เนื่องจากเมื่อสารละลายเบนโทไนท์ถูกรบกวนจากการผสมและการเคลื่อนที่ขึ้นลงของก้านเจาะจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) ถูกทำลาย และเมื่อทิ้งไว้โดยไม่มีการรบกวนอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) จะสร้างแรงยึดเหนี่ยวขึ้นมาใหม่เพื่อกลับสู่สภาพสมดุลอีกครั้ง ทำให้เบนโทไนท์มีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น นั่นคือจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อทิ้งไว้ในหลุมเจาะนานๆ

เนื่องจากสารละลายเบนโทไนท์จะทำให้ทรายแขวนลอยดังแสดงในรูปที่ 2-23 ปริมาณทรายในเบนโทไนท์จะมีผลต่อคุณสมบัติอื่นๆของสารละลายเบนโทไนท์อีกด้วย เช่น ทำให้ความหนาแน่นของสารละลายเพิ่มขึ้น, เพิ่มความหนาของเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake) ที่เกิดขึ้น, ทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง



รูปที่ 2-23 เม็ดดินที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายเบนโทไนท์

2.3.2 พฤติกรรมของโพลีเมอร์

เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาสารละลายโพลีเมอร์เริ่มมีบทบาทในการเป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ (Drilling Slurry) ในการทำเสาเข็มเจาะระบบเปียก เนื่องจากการใช้สารละลายโพลีเมอร์สามารถแก้ไขปัญหที่เกิดจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์ได้หลายด้าน เช่น ลดปัญหาการสูญเสียกำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มเนื่องจากเยื่อหุ้มที่บวม (Filter Cake), ไม่ทำให้สถานที่ก่อสร้างสกปรก และทำให้การทำงานสะดวกยิ่งขึ้น สารละลายโพลีเมอร์ที่ใช้ในงานขุดเจาะมี 2 ประเภทคือ

- โพลีเมอร์ธรรมชาติ (Organic Polymer)
- โพลีเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymer)

สำหรับการใช้งานเสาเข็มนั้นจะนิยมใช้โพลีเมอร์สังเคราะห์ประเภทพีเอชพีเอ (Partially Hydrolyzed Polyacrylamide, PHPA) มากกว่าโพลีเมอร์ธรรมชาติเนื่องจากโพลีเมอร์ธรรมชาติไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้งและยังอาจเกิดการเน่าเสียได้หากทิ้งไว้เป็นระยะเวลานาน ลักษณะของโพลีเมอร์จะอยู่ใน 2 รูปแบบคือ แบบผงซึ่งแสดงในรูปที่ 2-24 และแบบเหลว การใช้งานโพลีเมอร์แบบเหลวสามารถใช้งานได้สะดวกกว่า แต่เนื่องจากราคาต่อหน่วยของโพลีเมอร์แบบเหลวแพงกว่าแบบผงมาก ทำให้โพลีเมอร์ชนิดผงเป็นที่นิยมมากกว่าโพลีเมอร์แบบผงมีลักษณะเป็นผงสีขาว สามารถละลายในน้ำได้ดี โดยมีความสามารถในการละลายน้ำที่ 1% โดยน้ำหนัก รูปที่ 2-25 แสดงลักษณะของโพลีเมอร์เมื่อผสมกับน้ำ

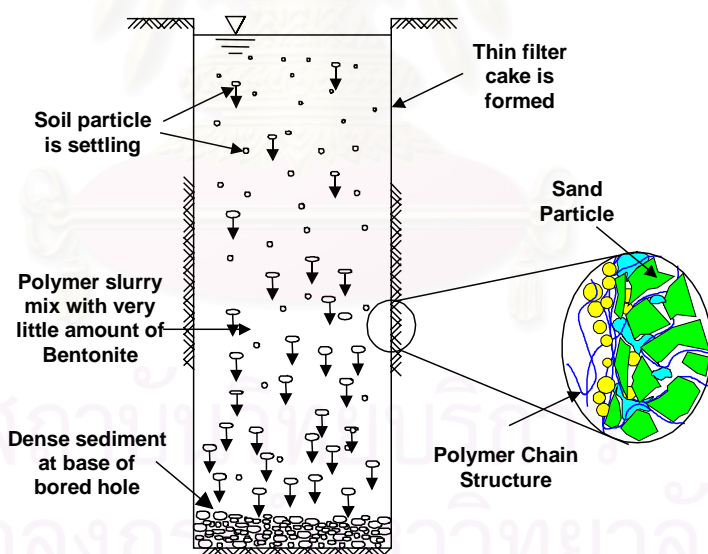


รูปที่ 2-24 ลักษณะของโพลีเมอร์ผง



รูปที่ 2-25 โพลีเมอร์เมื่อผสมน้ำ

พฤติกรรมของโพลีเมอร์จะแตกต่างจากเบนโทไนท์คือ เมื่อผสมกับน้ำโพลีเมอร์สามารถผสมน้ำได้ทันทีโดยไม่ต้องรอให้โพลีเมอร์ดูดน้ำ (Fully Hydrated) เหมือนกับเบนโทไนท์และเมื่อสารละลายโพลีเมอร์อยู่ในหลุมเจาะจะทำให้ดินเม็ดละเอียดพวกทรายละเอียดหรือทรายแป้งจับตัวรวมกันทำให้เกิดการตกตะกอนลงสู่ก้นหลุมซึ่งแสดงในรูปที่ 2-26



รูปที่ 2-26 พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในหลุมเจาะ

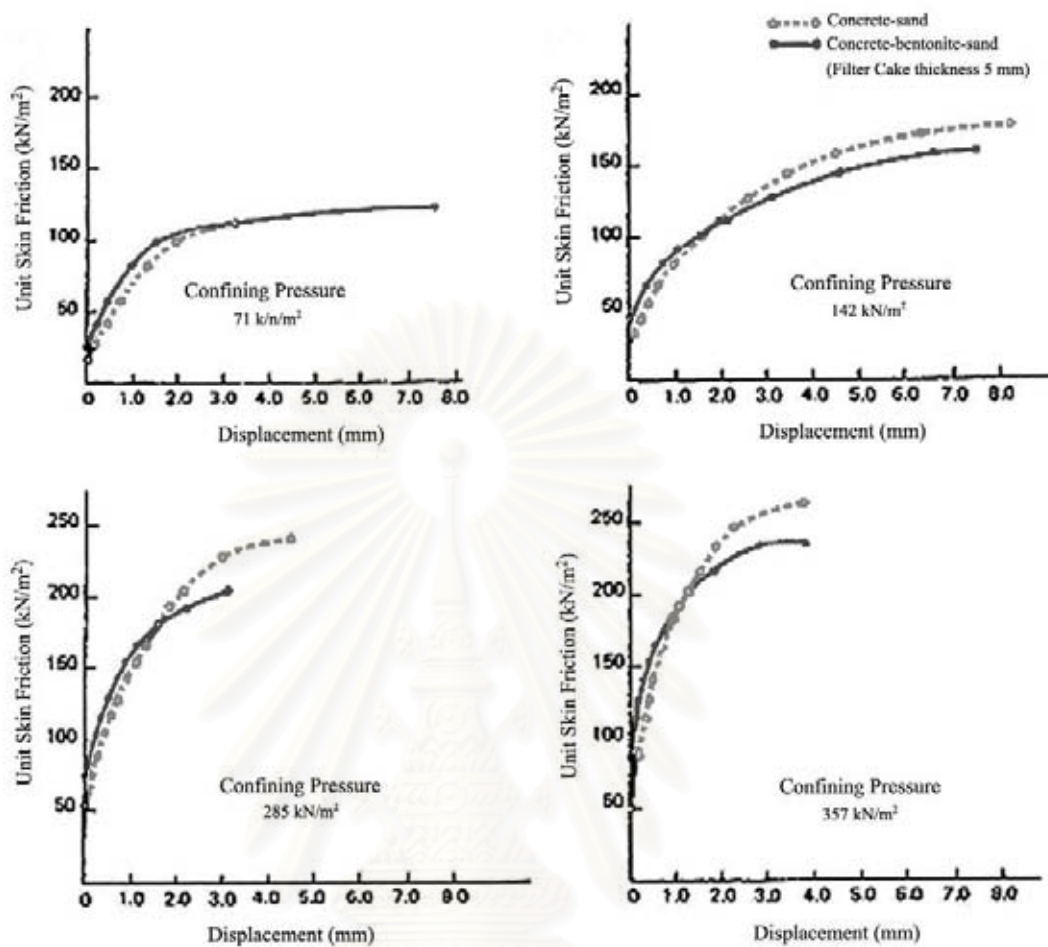
สำหรับการใช้สารละลายโพลีเมอร์เมื่ออยู่ในชั้นทรายจะไม่เกิดเยื่อที่บุน้ำ (Filter Cake) ขึ้น อย่างไรก็ตามในชั้นดินที่มีค่าการซึมผ่านสูงก็มีความจำเป็นที่จะต้องเติมเบนโทไนท์จำนวนหนึ่งลงไปเพื่อให้เกิดเยื่อที่บุน้ำ (Filter Cake) บางๆ เพื่อลดการสูญเสียสารละลายในปริมาณที่มากเกินไป และทำให้ประจุบวกที่ปลาย (Edge) ของอนุภาคเบนโทไนท์ (Bentonite Particle) จะจับตัวกับ

ประจุลบของโครงสร้างโพลีเมอร์ ป้องกันการเกิดการจับตัวของอนุภาค (Flocculation) ในสารละลายอีกด้วยทำให้เม็ดดินสามารถตกตะกอนในสารละลายได้ และโครงสร้างโพลีเมอร์ที่เข้าไประหว่างเม็ดดินจะช่วยยึดดินเข้าด้วยกันทำให้ดินสามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวชั่วคราวขึ้น การใช้โพลีเมอร์จะไม่เกิดปรากฏการณ์คืบกำลังของดิน (Thixotropy) ขึ้นเนื่องจากเป็นสารละลาย ไม่ใช่คอลลอยด์ (Colloid) ของสารประกอบดินเหนียว (Clay Mineral) เช่นเดียวกับเบนโทไนท์

2.3.3 การลดลงของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มเนื่องจากเยื่อบูทิน้ำ (Filter Cake)

ในอดีตที่ผ่านมามีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการลดลงของกำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะดังนี้

Farmer and Goldberg (1969) ทดสอบโดยสร้างเสาเข็มจำลองขึ้นมาในชั้นทรายโดยใช้เซลล์อัดแรงสามแกน (Triaxial Cell) พบว่าเมื่อใช้แรงดันเซลล์ (Confining Pressure) ในช่วง 10.3 ถึง 51.8 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) เสาเข็มจำลองที่ใช้เบนโทไนท์จะมีกำลังลดลงประมาณ 10% เมื่อเทียบกับเสาเข็มจำลองที่ไม่ใช้เบนโทไนท์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-27

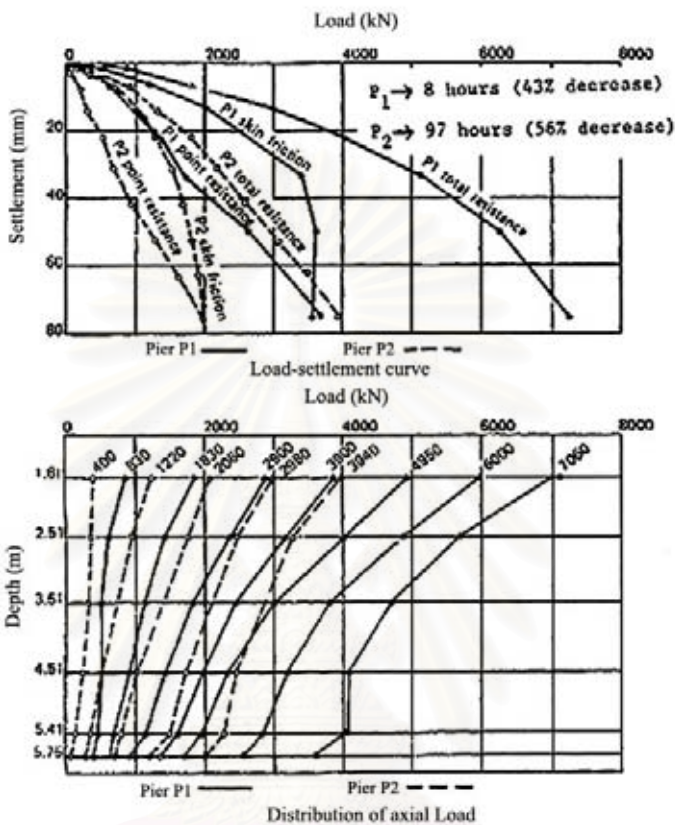


รูปที่ 2-27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับการเคลื่อนตัวที่แรงดันเซลล์ (Confining Pressure) ต่างๆ ของเสาเข็มจำลอง (Farmer and Goldberg, 1969)

O'Neil and Reese (1970) ทำการทดสอบกำลังรับแรงของเสาเข็ม พบว่ากำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มลดลงเนื่องจากมีเบนโทไนท์ค้ำอยู่หลังปลอกเหล็ก (Casing) ทำให้คอนกรีตไม่สามารถครูดออกไปได้ เมื่อถอนปลอกเหล็กออกจะทำให้ผิวคอนกรีตไม่สัมผัสกับดินและมีกำลังรับเสียดทานด้านข้างลดลงในส่วนของปลอกเหล็ก (Casing)

Cernak (1976) สร้างเสาเข็มขึ้นเพื่อทดสอบจำนวน 3 ต้นในดินประเภทกรวดปนทราย (Sandy-gravel) โดยมี 2 ต้นที่ใช้เบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพ โดยต้น P1 ทิ้งเบนโทไนท์ไว้ในหลุมเจาะ 8 ชั่วโมงและ 97 ชั่วโมง สำหรับ P2 พบว่าเข็มทั้ง 2 ต้นมีกำลังรับแรงเสียดทานลดลง 43% และ 56% ในเข็ม P1 และ P2 ตามลำดับเมื่อเทียบกับต้นที่หล่อคอนกรีตทันทีที่เจาะเสร็จ

ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อทิ้งเบนโทไนท์ไว้ในหลุมเจาะนานขึ้นจะทำให้เยื่อบูทึบน้ำ (Filter Cake) มีความหนาเพิ่มขึ้นและมีผลให้กำลังรับแรงเสียดทานลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2-28



รูปที่ 2-28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงของเสาเข็มจริง ที่ทิ้งไว้ในเบนโทไนท์ในเวลาต่างๆ กัน (Cernak, 1976)

Holden (1984) เสนอว่าเยื่อบูทึบน้ำ (Filter Cake) ประกอบขึ้นจากส่วน 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นเยื่อบูทึบน้ำจริงและส่วนที่เรียกว่าเจล (Gel) ซึ่งเกิดขึ้นนอกเยื่อบูทึบน้ำความแข็งของเจลถือว่า มีค่าน้อยสามารถถูกครูดออกไปได้หมดเมื่อเทคอนกรีต สำหรับเยื่อบูทึบน้ำจะไม่สามารถถูกครูดออกได้ทั้งหมด ความหนาของเยื่อบูทึบน้ำจะเหลืออยู่ประมาณ 25% ของความหนาเดิม

Tucker and Reese (1984) เก็บข้อมูลของหลุมเจาะที่ใช้เบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ (Drilling Fluid) โดยหลุมเจาะถูกทิ้งไว้นานกว่า 1 เดือน พบว่าเยื่อบูทึบน้ำ (Filter Cake) จะเกิดเฉพาะในชั้นทรายและจะไม่เกิดในชั้นดินเหนียวเลย ดังนั้นกำลังรับแรงเสียดทานจะสูญเสียเนื่องจากเยื่อบูทึบน้ำเฉพาะในส่วนของทรายเท่านั้น

2.3.4 การใช้สารละลายโพลิเมอร์ในอดีตที่ผ่านมา

เมื่อสารละลายโพลิเมอร์เริ่มมีบทบาทในการเป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะได้มีผู้ทำการศึกษาดังกล่าวรวมทั้งกำลังรับแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มอย่างคร่าวๆอีกด้วย ดังนี้

Bustamante et al (1998) ได้ทำการก่อสร้างเสาเข็มเจาะโดยใช้สารละลายโพลิเมอร์ในยุโรป (ฝรั่งเศสและอิตาลี) พบว่าการใช้สารละลายโพลิเมอร์นั้นไม่ก่อให้เกิดจุดบกพร่อง (Defect) ในเสาเข็มเลย ในขณะที่การใช้สารละลายเบนโทไนท์ก่อให้เกิดจุดบกพร่องทั้งที่ปลายเสาเข็มและผิวของเสาเข็ม ตลอดจนพบว่าการใช้สารละลายโพลิเมอร์ทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มมากขึ้นกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์

Ata and O'Neil (1998) ได้ทำการวิจัยการใช้สารละลายโพลิเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในสหรัฐอเมริกาเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายเบนโทไนท์ พบว่าแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มจากการใช้สารละลายโพลิเมอร์จะมากกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์ในชั้นทราย โดยที่ค่า β จากเสาเข็มที่ใช้โพลิเมอร์จะมากกว่าจากเสาเข็มที่ใช้เบนโทไนท์ประมาณ 100% ในปัจจุบันนี้มีการใช้สารละลายโพลิเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะอย่างมากมายในหลายทวีปทั้งอเมริกา, ยุโรป และบางประเทศในเอเชีย เช่น สิงคโปร์และฮ่องกง

การทำวิจัยในประเทศไทยโดย วันชัยและคณะ (2541) และ ณรงค์และคณะ (2542) พบว่าการใช้สารละลายโพลิเมอร์มีราคาถูกกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์ ทั้งนี้เนื่องจากใช้ปริมาณโพลิเมอร์น้อยมาก และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยไม่ต้องผ่านเครื่องกรองทราย (Desander) แต่ประการใด

2.4 เครื่องมือวัดในเสาเข็มเจาะ

เครื่องมือวัดที่ติดตั้งในเสาเข็มเจาะที่นิยมในประเทศไทยมี 2 ชนิดคือเกจวัดความเครียด (Vibrating Wire Strain Gauge, VWSG) และเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer) ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาแรงตามแนวแกนของเสาเข็มที่ความลึกต่างๆได้ โดยที่ค่าที่ได้จาก VWSG จะมีความน่าเชื่อถือและมีความละเอียดมากกว่าค่าที่ได้จาก

Extensometer สำหรับค่าที่ได้จาก Extensometer นั้นจะใช้สำหรับตรวจสอบความน่าเชื่อถือของ ข้อมูลที่ได้จาก VWSG โดยเครื่องมือวัดทั้ง 2 ชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 เกจวัดความเครียด (Vibrating Wire Strain Gauge)

หลักการทำงานของ VWSG คือใช้ค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นที่ความลึกต่างๆแปลง เป็นแรงตามแนวแกนที่ความลึกนั้นๆ โดยถือว่าแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับในเสาเข็มถูกส่งถ่ายไป ยังดินรอบๆตำแหน่งนั้นโดยแต่ละความลึกจะติดตั้ง VWSG จำนวน 3-5 ตัวที่เหล็กลึบในเสาเข็ม ดังแสดงในรูป 2-29 และ 2-30 ตามปกติ VWSG จะติดตั้งในระดับความลึกที่ชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งต้องอาศัยผลการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณที่จะก่อสร้างซึ่งแสดงอยู่ในรูปของข้อมูลดิน แบบหลุมเจาะ (Boring Log) และการเก็บตัวอย่างลักษณะดินขณะทำการขุดเจาะเสาเข็มสมอ (Anchorage Pile) เพื่อกำหนดตำแหน่งที่จะติดตั้ง VWSG โดยค่าแรงตามแนวแกน ณ จุดที่ทำการ ติดตั้ง VWSG สามารถหาได้จากสมการ 2.11

$$P_{i (WWSG)} = (AE)_p \cdot \epsilon_i \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$P_{i (WWSG)} = \text{แรงตามแนวแกนจาก VWSG ที่ระดับความลึก } i$$

$$(AE)_p = \text{ค่าสติฟเนสเทียบเท่าเสาเข็ม (Equivalent Pile Stiffness)}$$

$$= [A_s(n-1) + A_g] E_c \quad (2.12)$$

$$A_s = \text{พื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กเสริมรับแรงอัด}$$

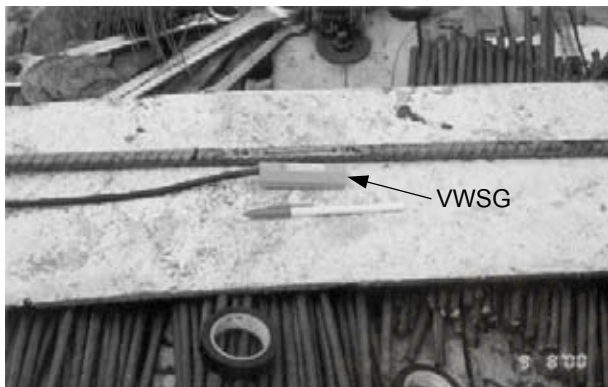
$$A_g = \text{พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม}$$

$$n = E_s / E_c$$

$$E_c = \text{อีลาสติกโมดูลัสของคอนกรีต}$$

$$E_s = \text{อีลาสติกโมดูลัสของเหล็กเสริม}$$

$$\epsilon_i = \text{ความเครียด (Strain) ณ ความลึก } i \text{ ได้จาก VWSG ตามปกติ มีหน่วยเป็น } \mu\epsilon \text{ (Micro Strain)}$$



รูปที่ 2-29 เกจวัดความเครียด (VWSG)



รูปที่ 2-30 การติดตั้ง VWSG

2.4.2 เครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer)

Extensometer มีอยู่ 2 ชนิดคือเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆแบบแม่เหล็ก (Magnetic Extensometer) และเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆแบบก้าน (Rod Extensometer หรือ Telltale Rod) หลักการทำงานของ Extensometer คือ แปลงค่าการหดตัวต่อความยาวของ Extensometer เป็นแรงตามแนวแกนของเสาเข็มจากหัวเสาเข็ม (Pile Head) ถึงระดับที่ต้องการวัด ในกรณีของ Rod Extensometer การติดตั้งจะทำโดยยึด Rod Extensometer กับเหล็กยื่นโดยมีปลายข้างหนึ่งยื่นเลยหัวเสาเข็มออกมาและปล่อยอีกข้างอยู่ที่ระดับความลึกที่ต้องการตามรูปที่ 2-31 และ 2-32 เนื่องจากไม่สามารถติดตั้ง Rod Extensometer ในเสาเข็มเป็นจำนวนมากได้ ทำให้ไม่สามารถหาค่าการถ่วงน้ำหนักบรรทุกสู่ชั้นดินต่างๆได้ละเอียดเพียงพอ เมื่อเทียบกับ VWSG การคำนวณแรงตามแนวแกนที่จุดนั้นหาได้จากสมการ 2.13

เมื่อ

$$P_{i (EXT)} = (AE)_p \cdot \epsilon_i \tag{2.13}$$

$$P_{i (EXT)} = \text{แรงตามแนวแกนจากหัวเสาเข็มถึงระดับความลึกนั้น}$$

$$(AE)_p = \text{ค่าสติฟเนสเทียบเท่าของเสาเข็ม}$$

$$= [A_s(n-1) + A_g] E_c$$

ϵ_i = ความเครียดของ Extensometer จากหัวเสาเข็ม ถึงความลึกระดับนั้น



รูปที่ 2-31 Rod Extensometer



รูปที่ 2-32 การติดตั้ง Rod Extensometer

2.5 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มเดี่ยว

วิธีการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีสถิตศาสตร์ (Static Method) และวิธีทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม (Pile Load Test) ซึ่งแต่ละวิธีก็มีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 วิธีสถิตศาสตร์ (Static Method)

วิธีการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตศาสตร์ ใช้หลักของสมดุลของแรง คือกำลังรับน้ำหนักประลัย (Q_{ult}) เท่ากับผลรวมของแรงเสียดทานรอบๆผิวเสาเข็มและแรงต้านจากปลายเสาเข็ม ลบด้วยน้ำหนักของเสาเข็มดังสมการ

$$Q_{ult} = Q_F + Q_E - W_p \quad (2.14)$$

เมื่อ

Q_F = แรงเสียดทานรอบๆผิวเสาเข็ม

Q_E = แรงต้านที่ปลายเข็ม

$$W_p = \text{น้ำหนักของเสาเข็ม}$$

ในแต่ละส่วนของสมการสามารถแยกกรณี ดังนี้

2.5.1.1 แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม

การประมาณค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจะต้องพิจารณาชั้นดินที่สัมผัสกับเสาเข็มว่าเป็นดินลักษณะใดเนื่องจากพฤติกรรมของการเกิดแรงเสียดทานกับดินแต่ละชนิดจะแตกต่างกันออกไป

2.5.1.1.1 แรงเสียดทานในชั้นทราย

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในชั้นทรายจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ชนิดและวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม, ชนิดของทราย, หน่วยแรงประสิทธิผลของชั้นทราย ซึ่งสมการทั่วไปในการหาค่าแรงเสียดทานคือ

$$Q_F = \sum f_s \cdot A_s \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$A_s = \text{พื้นที่ผิวสัมผัสของชั้นดินที่พิจารณา}$$

$$f_s = \text{หน่วยแรงเสียดทาน}$$

$$= K_s \cdot (\tan \delta) \cdot \sigma'_{vi} \quad (2.16)$$

$$= \beta \cdot \sigma'_{vi} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$K_s = \text{ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างระหว่างดินกับเสาเข็ม}$$

$$\delta = \text{มุมเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็ม}$$

$$\sigma'_{vi} = \text{หน่วยแรงประสิทธิผลที่กึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณา}$$

ค่า K_s จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามความลึกโดยบริเวณหัวเสาเข็มค่า K_s จะใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบพาสซีฟของแรงคิน (Rankine Passive Earth Pressure Coefficient, K_p) และจะลดลง จนถึงต่ำกว่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาพนิ่ง

(at-rest Earth Pressure Coefficient, K_0) ที่ความลึกมากขึ้นนอกจากนี้ ค่า K_s ยังมีค่าความแตกต่างออกไปตามวิธีการก่อสร้างเสาเข็มอีกด้วย ซึ่งสามารถแบ่งออกตามกรณีได้ดังนี้

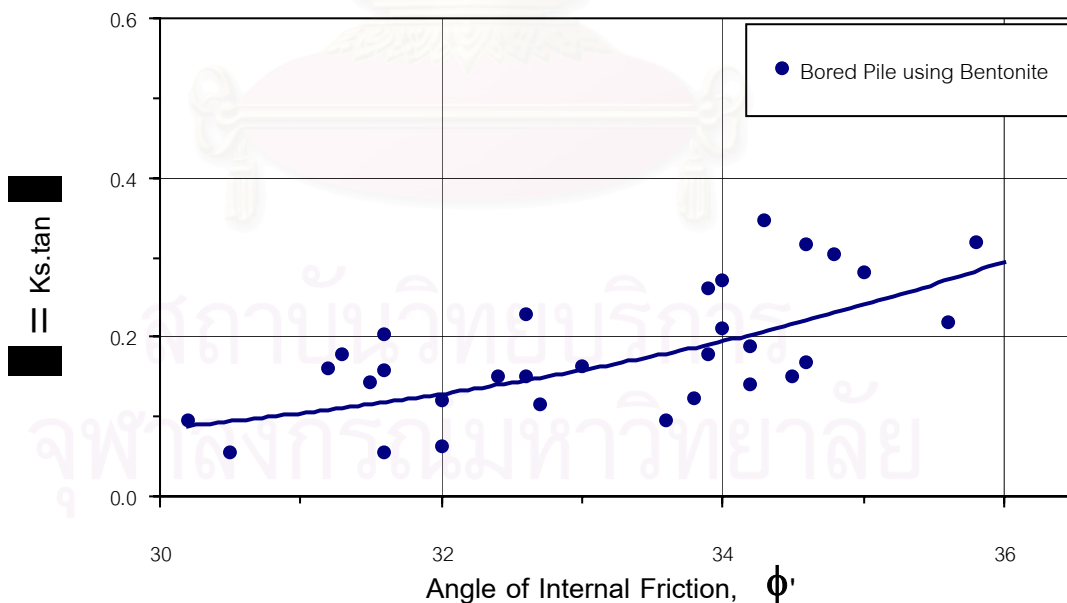
เสาเข็มเจาะ : $K_s \approx K_0 = 1 - \sin \phi'$

เสาเข็มสว่าน (Low - displacement Driven) : K_s มีค่าตั้งแต่ K_0 ถึง $1.4K_0$

เสาเข็มตอก (High - displacement Driven) : K_s มีค่าตั้งแต่ K_0 ถึง $1.8K_0$

ค่า δ คือมุมเสียดทานระหว่างทรายกับผิวของเสาเข็ม ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของผิวเสาเข็ม, ชนิดของทรายและวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม ตามปกติค่า δ จะมีค่าตั้งแต่ $0.5\phi'$ ถึง $0.8\phi'$

สำหรับดินกรุงเทพฯ ชาญชัย (2542) ได้ทำการวิจัยและรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาของ สุวรรณ (2531) เสนอค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $K_s \tan \delta$ กับมุม ϕ' ของชั้นดินกรุงเทพฯ สำหรับเสาเข็มเจาะระบบเปียกดังแสดงในรูป 2-33 และเนื่องจากชั้นดินกรุงเทพฯ มีลักษณะเป็นดินเหนียวสลับทราย ค่า σ'_{vi} ที่คำนวณในชั้นทรายจะยังคงเพิ่มขึ้นตามความลึกและต้องพิจารณาผลจากการสูบน้ำบาดาล (Drawdown Effective Overburden Pressure) ด้วย



รูปที่ 2-33 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ ϕ' ของชั้นทรายกรุงเทพฯ (ชาญชัย 2542)

2.5.1.1.2 แรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวเสาเข็มกับชั้นดินเหนียวเกิดจากพฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (Adhesion) ซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลต่อพฤติกรรมนี้คือ ชนิดของดินเหนียว สมการที่นิยมใช้ในการคำนวณค่าแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวเรียกว่าวิธีแอลฟา (α Method) คือ

$$Q_{F(\text{clay})} = \sum f_s \cdot A_s \quad (2.18)$$

$$f_s = \alpha \cdot S_u \quad (2.19)$$

เมื่อ

f_s = หน่วยแรงเสียดทาน

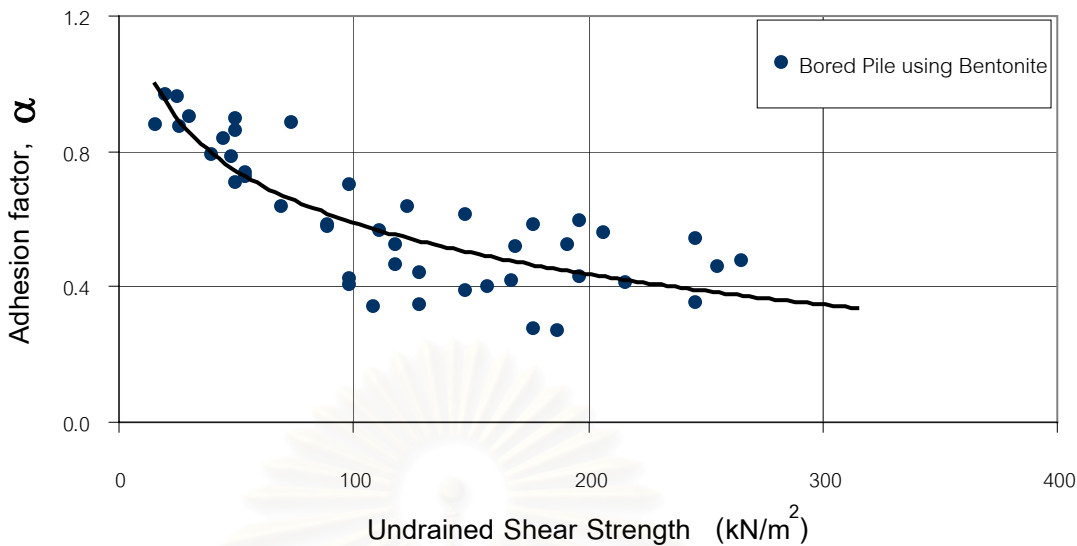
A_s = พื้นที่ผิวสัมผัสของชั้นดินที่พิจารณา

α = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเหนียว
(Adhesion Factor)

S_u = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว

ค่า α เป็นค่าที่ได้จากความสัมพันธ์แบบสูตรสำเร็จ (Empirical) ซึ่งแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ S_u สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ ชาญชัย (2542) ได้ทำการวิจัยและได้รวบรวมผลวิจัยก่อนหน้าไว้ด้วย (Pimpasugdi 1989, NG 1983 และสุวรรณ 2531) เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ S_u ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ดังแสดงในรูปที่ 2-34 โดยพบว่าค่า α มีลักษณะกระจัดกระจาย โดยวิธีการก่อสร้างเสาเข็มที่ต่างกันทั้งการอัดน้ำปูนปลายเสาเข็มและไม่อัดน้ำปูนปลายเสาเข็มไม่ทำให้ความสัมพันธ์ของ α แตกต่างออกไปแบบมีนัยสำคัญ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-34 ความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ S_u ของดินเหนียวกรุงเทพฯ (ชาญชัย 2542)

นอกจากนี้การวิเคราะห์แรงเสียดทานยังสามารถหาอยู่ในรูปหน่วยแรงประสิทธิผลในระยะยาว (Effective Stress Analysis in Long Term Condition) ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่าวิธีเบต้า (β-Method) เช่นเดียวกับกรณีชั้นทรายโดยมีสมการดังนี้

$$f_s = \beta \cdot \sigma'_{vi} \tag{2.20}$$

เมื่อ

$$\sigma'_{vi} = \text{หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง}$$

$$\beta = K (\tan \phi_R) \tag{2.21}$$

$$K = \text{แรงดันดินด้านข้าง}$$

$$= (1 - \sin \phi_R) \sqrt{OCR} \tag{2.22}$$

ϕ_R = มุมต้านแรงเฉือนของดินเหนียวในสภาพปั้นใหม่ (Remolded State)

OCR = ค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินตัว

2.5.1.2 แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

การคิดแรงต้านที่ปลายเสาเข็มต้องพิจารณาชั้นดินที่ปลายเข็มว่าเป็นดินชนิดใดและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มที่ต่างกันก็จะมีผลต่อแรงต้านที่ปลายเข็มด้วย ซึ่งสมการที่คำนวณแรงต้านที่ปลาย

เสาเข็มจะเป็นสมการที่ลดรูปจากสมการกำลังรับน้ำหนักประลัย (Ultimate Load Bearing Capacity) ซึ่งอยู่ในรูป

$$Q_{ult} = cN_c^* + qN_q^* \quad (2.23)$$

เมื่อปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินแต่ละประเภทสมการที่ใช้คำนวณก็จะต่างออกไปด้วย

2.5.1.2.1 แรงต้านที่ปลายเสาเข็มในชั้นทราย

สมการที่ใช้คำนวณหาแรงต้านที่ปลายเสาเข็มที่ใช้กันทั่วไปคือ

$$Q_E = q_E \cdot A_p \quad (2.24)$$

$$q_E = \sigma'_{ve} \cdot N_q^* \quad (2.25)$$

เมื่อ

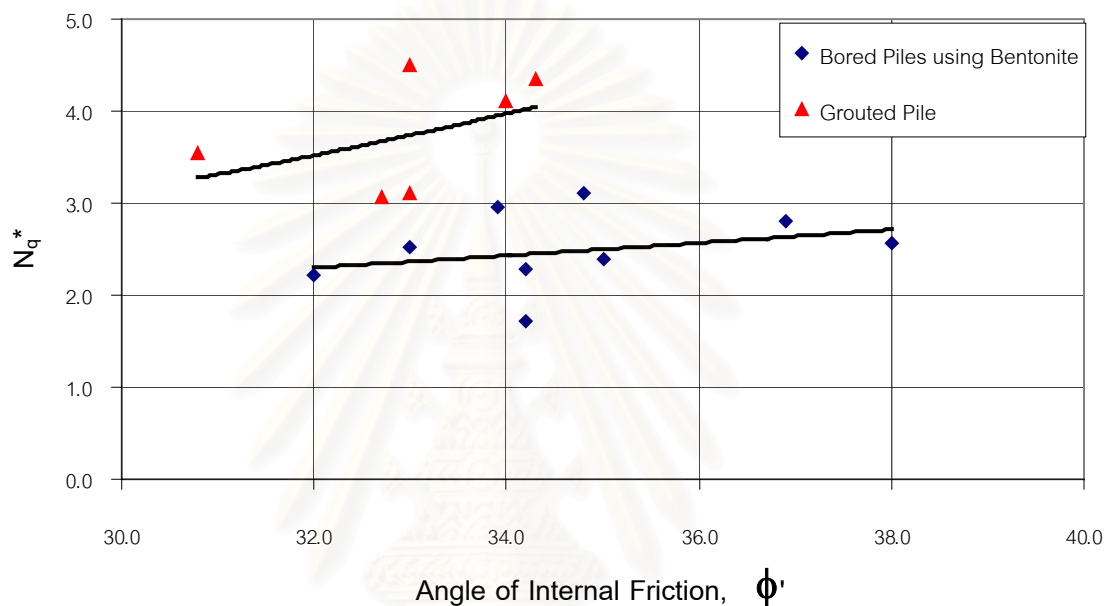
$$N_q^* = \text{สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานปลายเสาเข็ม}$$

$$\sigma'_{ve} = \text{หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งที่ระดับปลายเสาเข็ม}$$

สำหรับค่า N_q^* ในเสาเข็มตอก Meyerhof (1976) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q^* กับ ϕ' ซึ่งได้พิจารณาค่าระยะฝังสัมพัทธ์ (Relative Embedment Depth, $\left(\frac{D_b}{B}\right)$) เข้าไปด้วย Coyle and Castello (1981) ได้เสนอความสัมพันธ์ของ N_q^* กับ ϕ' ซึ่งพิจารณาผลของอัตราส่วนความยาวเสาเข็มกับขนาดเสาเข็ม $\left(\frac{L}{D}\right)$

ในกรณีเสาเข็มเจาะค่า N_q^* จะต่ำกว่าในเสาเข็มตอกมาก เนื่องจากการลดลงของแรงดันประสิทธิผลในแนวตั้งที่ปลายเสาเข็ม เนื่องจากการซูดหลุมเจาะ นอกจากนี้ถ้าการเก็บตะกอนก้นหลุมไม่ดีพอจะทำให้ค่า N_q^* ลดลงอย่างมาก Vesic (1967) ได้ทำการทดสอบและรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาของ De Beer, Meyerhof, Hansen and Terzaghi และเสนอค่าความสัมพันธ์ระหว่าง N_q^* กับ ϕ' ซึ่งค่าที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้เนื่องจากเป็นขีดล่างของความสัมพันธ์ (Lower Bound)

สำหรับดินกรุงเทพฯ ชาญชัย (2542) ได้ทำการวิจัยค่า N_q^* ของเสาเข็มเจาะในชั้นทราย กรุงเทพฯ และได้รวบรวมงานวิจัยก่อนหน้า (NG (1983), สุวรรณ (2531), Pimpasugdi (1989)) และได้เสนอความสัมพันธ์ของ N_q^* กับ ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง ของชั้นดินกรุงเทพฯ โดยแบ่งเป็นกรณีอัดน้ำปูนปลายเสาเข็มและไม่อัดน้ำปูนปลายเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 2-35



รูปที่ 2-35 ความสัมพันธ์ระหว่าง N_q^* กับ ϕ' ของชั้นทรายกรุงเทพฯ (ชาญชัย 2542)

2.5.1.2.2 แรงต้านที่ปลายเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

สมการที่ใช้คำนวณแรงต้านที่ปลายเข็มในชั้นดินเหนียวคือ

เมื่อ

$$Q_E = A_p \cdot S_u \cdot N_c^* \quad (2.26)$$

A_p = พื้นที่หน้าตัดของปลายเข็ม

S_u = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

N_c^* = สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

สำหรับค่า N_c^* Skempton (1991) ได้เสนอค่า N_c^* สำหรับเสาเข็มกลมที่มีอัตราส่วนความลึกต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง มากกว่า $4 \left(\frac{L}{D} > 4\right)$ ว่าให้ใช้เท่ากับ 9.00 Whitaker and Cooke (1966) พบว่าสำหรับเสาเข็มที่มีการขยายปลายจะมีค่า $N_c^* = 9$ ต่อเมื่อมีการเคลื่อนตัว 10%-15% และในเสาเข็มเจาะปกติ ค่า N_c^* จะเท่ากับ 9 เมื่อมีการเคลื่อนตัว 20% ในดินเหนียวกรุงเทพฯ Muktabhand and Suwanakul (1971) ได้ทำการวิจัยจากผลการทดสอบเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อนและแข็งได้พบว่า ค่า N_c^* จะต่ำกว่า 9 ชาญชัย (2542) ได้ทำการวิจัยและพบว่าค่า N_c^* ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ สำหรับเสาเข็มเจาะระบบเปียกมีค่าประมาณ 4-5

2.5.2 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Load Testing of Piles)

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม, ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม โดยเปรียบเทียบกับวิธีสถิตศาสตร์ (Static Method) นอกจากนี้ การทดสอบเสาเข็มยังสามารถใช้หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในชั้นดินได้ซึ่งการทดสอบเสาเข็มได้แสดงในรูป 2-36 และ 2-37 ในกรณีที่เสาเข็มมีการติดตั้งเครื่องมือวัด เช่น สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในดินเหนียว (α), สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) ฯลฯ



รูปที่ 2-36 สถานที่ทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม



รูปที่ 2-37 การทดสอบแบบรับแรงกดโดยใช้เสาเข็มสมอเป็นตัวต้านน้ำหนัก

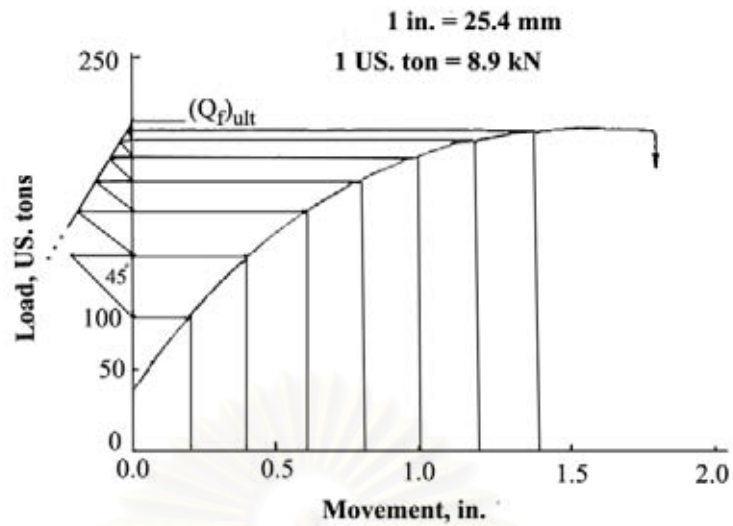
การทดสอบเสาเข็มมีการทดสอบหลายวิธี ในงานวิจัยครั้งนี้จะอ้างถึงวิธีที่ใช้ทั่วไปในชั้นดินกรุงเทพฯ สำหรับเสาเข็มเจาะคือ ทดสอบแบบรับแรงกด (Compression Test), มีการค้ำน้ำหนักบรรทุก (Maintained Load) โดยใช้เสาเข็มสมอ (Anchorage Pile) เป็นตัวต้านน้ำหนัก ซึ่งมีขั้นตอนโดยสังเขป สำหรับการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ดังนี้

1. สร้างเสาเข็มทดสอบ พร้อมทั้งเสาเข็มสมอ 4 ต้นและก่อสร้างหัวเสาเข็ม (Pile Cap) ที่ทำให้คอนกรีตมีอายุได้ 28 วัน
2. ปรับผิวสัมผัสระหว่างหัวเสาเข็ม (Pile Cap) กับเซลล์ให้น้ำหนัก (Load Cell)
3. ติดตั้งคานอ้างอิงกับเสาเข็มสมอและขุดดินข้างใต้หัวเสาเข็ม (Pile Cap)
4. ติดตั้งเครื่องมือวัดทั่วไป
5. ทำการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักทีละขั้นแล้วคั่งน้ำหนักไว้ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้
6. ทดสอบจนครบตามรอบที่ออกแบบและบันทึกข้อมูล

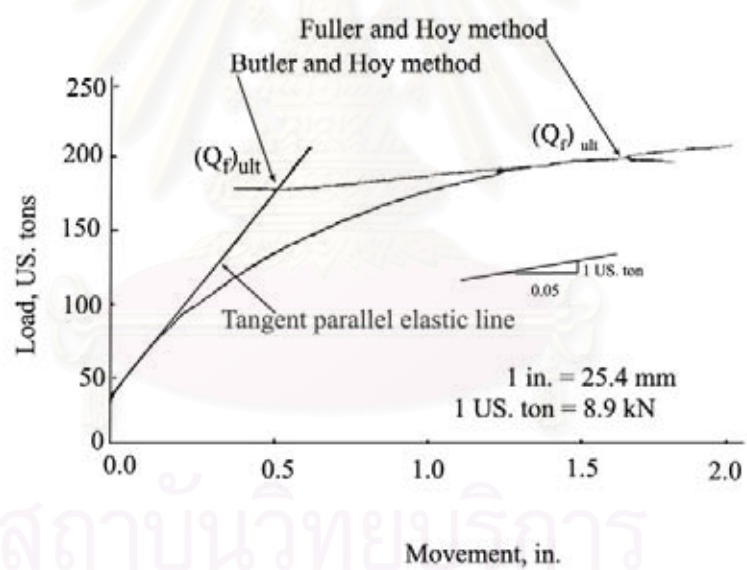
จำนวนรอบของการทดสอบ, น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแต่ละรอบและเพิ่มหรือลดน้ำหนักบรรทุกแต่ละขั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดินและข้อกำหนดในการออกแบบของเสาเข็มของแต่ละโครงการ

ข้อมูลที่สำคัญที่จะได้จากการทดสอบเสาเข็มคือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate Load Bearing Capacity, Q_{ult}) และการหลุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ บางครั้งการทดสอบเสาเข็มไม่ได้ทำการทดสอบจนถึงน้ำหนักบรรทุกที่เกิดวิบัติ (Failure Load) จึงจำเป็นต้องมีการคาดคะเน Q_{ult} จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการหลุดตัวของเสาเข็ม ซึ่งมีหลายวิธีที่เคยมีการทำวิจัยไว้

สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ ได้เคยมีผู้ทำวิจัยก่อนหน้านี้ คือ Pimpasugdi (1989), Wachiraprakarnpong (1993), Soontornsiri (1995) และชาญชัย (2542) พบว่าวิธีการที่เหมาะสมในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ คือ Mazurkiewicz (1972) และ Butler & Hoy (1977) โดยวิธีการของ Butler & Hoy (1977) จะใช้กับเสาเข็มที่ทำการทดสอบจนถึงจุดวิบัติ และใช้วิธีของ Mazurkiewicz (1972) ในกรณีที่เสาเข็มไม่เกิดการวิบัติ ซึ่งวิธีของ Mazurkiewicz (1972) และ Butler & Hoy (1977) ได้แสดงในรูปที่ 2-38 และ 2-39 ตามลำดับ



รูปที่ 2-38 วิธีหาน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของ Mazurkiewicz (1972)



รูปที่ 2-39 วิธีหาน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของ Butler&Hoy (1977)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยจะแยกออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลจากสถานที่ก่อสร้างและการทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกัน

3.1 การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลจากสถานที่ก่อสร้าง

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจากสถานที่ก่อสร้างที่ใช้โพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพ ได้แก่ ผลการทดสอบเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด, ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ, ชนิด, ปริมาณและสัดส่วนของโพลีเมอร์กับเบตงในทันทีที่ผสมเข้าด้วยกัน โดยแต่ละส่วนจะมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด

เสาเข็มที่ทำการพิจารณาในงานวิจัยครั้งนี้ได้แก่ เสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะที่ก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพฯ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1.20-1.50 เมตร เครื่องมือวัดที่ใช้เพื่อแปลผลการทดสอบเสาเข็มให้เป็นการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ดินรอบๆ ในแต่ละระดับความลึกได้แก่เกจวัดความเครียด (Vibrating Wire Strain Gauge, VWSG) และเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆแบบก้าน (Rod Extensometer) ซึ่งข้อมูลส่วนใหญ่จะวิเคราะห์จากผลของ VWSG โดยจะแปลผลมาเป็นแรงที่ดินต้องรับจากน้ำหนักที่กระทำดังแสดงในรูป 3-1 และ 3-2 เนื่องจากมีโอกาสเสียหายขณะติดตั้งน้อยกว่า Rod Extensometer และมีจำนวนการติดตั้งในช่วงการเปลี่ยนแปลงชั้นดินละเอียดกว่า Rod Extensometer ดังนั้นข้อมูลจาก Rod Extensometer จึงจะนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลเท่านั้น เสาเข็มทุกต้นในงานวิจัยนี้จะมีปลายเสาเข็มอยู่ที่ทรายชั้นที่ 2 และมีเสาเข็มบางต้นได้ทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม (Base Grouted)



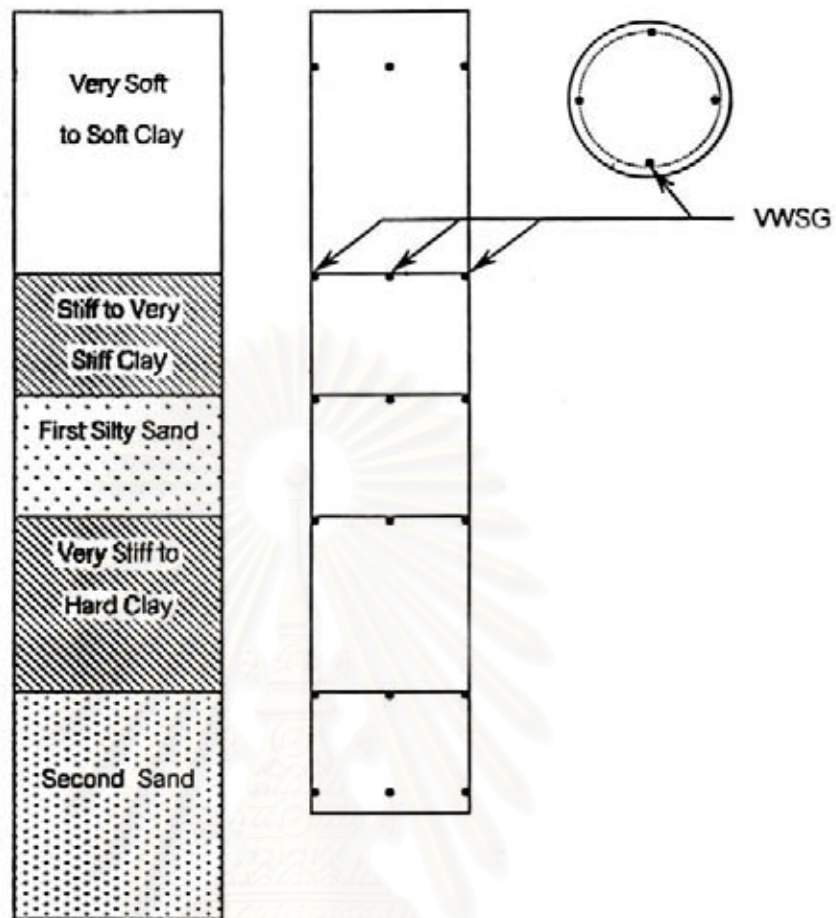
รูปที่ 3-1 อุปกรณ์เก็บข้อมูลจากเสาเข็ม
(Data Logger)



รูปที่ 3-2 คอมพิวเตอร์ใช้ประมวลผลการ
ทดสอบเสาเข็ม

ข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินสามารถหาได้จากผลการเจาะสำรวจชั้นดิน ซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของข้อมูลดินแบบหลุมเจาะ (Boring Log) โดยค่าที่แสดงได้แก่ ความชื้นในมวลดิน (W_n), ซีดจำกัดพลาสติก (PL), ซีดจำกัดเหลว (LL), ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (UU or UC), การทดสอบไบพัดในสนาม (Field Vane Test, FV) และค่าจำนวนครั้งการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) จากนั้นจึงนำค่าคุณสมบัติของดินมาแปรผลเป็นพารามิเตอร์ของดิน โดยใช้ค่าความสัมพันธ์และสมมุติฐานของชั้นดินกรุงเทพฯ ข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินที่เลือกใช้ควรจะเป็นของหลุมเจาะที่อยู่ใกล้กับเสาเข็มทดสอบให้มากที่สุด เพื่อที่จะให้ผลการวิเคราะห์การถ่ายแรงในเสาเข็มสู่ดิน สอดคล้องกับสภาพชั้นดินรอบ ๆ เสาเข็มมากที่สุด นอกจากนี้การติดตั้ง WWSG ควรจะติดตั้งที่ระดับการเปลี่ยนของชั้นดิน (ดินเหนียวหรือทราย) ดังแสดงในรูปที่ 3-3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-3 การติดตั้ง VWSG ที่ชั้นดินที่มีการเปลี่ยนแปลง

ดังนั้นข้อมูลดินของหลุมเจาะไม่ควรจะมีลักษณะชั้นดินแตกต่างจากดินรอบ ๆ เส้าเข็มทดสอบมากนัก ซึ่งลักษณะชั้นดินจากเส้าเข็มทดสอบสามารถตรวจสอบได้จากการเก็บตัวอย่างขณะทำการเจาะเส้าเข็มเสมอ 2 ต้นก่อนที่จะทำการเจาะเส้าเข็มทดสอบ การติดตั้ง VWSG ที่ไม่สอดคล้องกับสภาพชั้นดินจะทำให้เกิดความลำบากในการแปลผลการทดสอบเส้าเข็มเป็นพารามิเตอร์ของดินและทำให้ค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือน้อยลงไปด้วยหรืออาจจะผิดพลาดโดยสิ้นเชิง

3.1.2 ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะโดยใช้สารละลายโพลิเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะโดยใช้สารละลายโพลิเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะจะใช้วิธีการเจาะแบบหมุน (Rotary Drilling) ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างที่ต่างกัน จะทำให้สภาพของผนังหลุมเจาะ, ปริมาณตะกอน และความสะอาดในการก่อสร้างแตกต่างกันออกไปด้วย ปัจจัยที่อาจทำให้เกิดความแตกต่างเหล่านี้ได้แก่ ลักษณะชั้นดิน, ระยะเวลาในการขุดเจาะและทิ้งให้เกิดการตกตะกอน, ขนาดและความลึกของหลุมเจาะ, ประเภทและสภาพของหัวเจาะ, ชนิดและสัดส่วนการผสมของสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ ฯลฯ

การเก็บข้อมูลเหล่านี้สามารถทำได้โดยสังเกตการทำงานในสถานที่ก่อสร้าง ซึ่งข้อมูลที่จะวิเคราะห์ได้แก่สภาพผนังของหลุมเจาะ, ตัวอย่างดินที่เก็บจากหลุมเจาะ, เวลาในแต่ละขั้นตอนในการก่อสร้าง

3.2 การทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

แบบจำลองนี้ใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะผ่านชั้นทรายภายใต้สภาพแรงดันน้ำใต้ดินในกรุงเทพฯ ฯ ซึ่งแยกเป็นสองส่วนคือ แบบจำลองการไหลผ่านของสารละลายในชั้นทรายและแรงเสียดทานระหว่างทรายกับผิวมอร์ทาร์

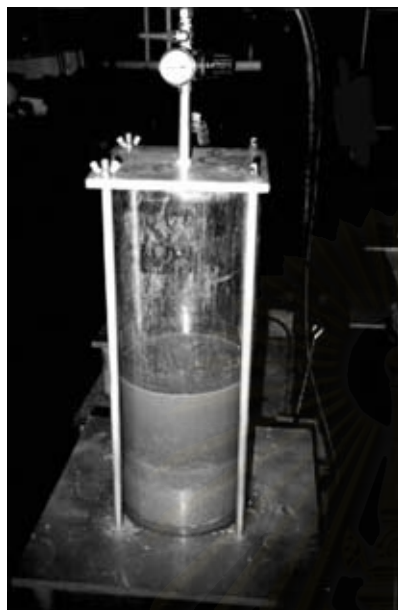
3.2.1 แบบจำลองการไหลผ่านในชั้นทราย

แบบจำลองจะประกอบด้วยโมลด์ (Mold) ทรงกระบอกใสกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 190 มม สูง 500 มม หนา 5 มม, แผ่นเหล็กฝาและฐานดังแสดงในรูปที่ 3-4 และ 3-5, บั๊มอากาศ, อุปกรณ์ควบคุมความดัน, อุปกรณ์เก็บตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบแรงเสียดทาน, พีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer), ทอร์เวน (Tore Vane) และอุปกรณ์ในการวัดต่าง ๆ ซึ่งการทดสอบแบบจำลองมีรายละเอียดดังนี้

1. เลือกสัดส่วนและปริมาณของโพลิเมอร์และเบนโทไนท์ที่จะใช้ในการทดสอบโดยจะยึดสัดส่วนและปริมาณของส่วนผสมในสถานที่ก่อสร้างเป็นแนวทางในการทดสอบแล้วทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนและปริมาณของส่วนผสม เพื่อหาความสัมพันธ์ของพฤติกรรมต่าง ๆ

2. ทำการผสมโพลีเมอร์และเบนโทไนท์กับน้ำโดยผสมแยกกันซึ่งต้องผสมเบนโทไนท์กับน้ำเปล่าก่อนแล้วจึงผสมโพลีเมอร์กับน้ำเปล่าจากนั้นทิ้งไว้หนึ่งชั่วโมง เพื่อให้เบนโทไนท์ดูดน้ำเต็มที่และโพลีเมอร์ละลายน้ำหมดจึงนำสารทั้งสองมาผสมให้เข้ากัน
3. เตรียมตัวอย่างทรายซึ่งได้จากการเก็บตัวอย่างในการเจาะหลุมเพื่อสร้างเสาเข็มจริงแล้วนำมาผึ่งอากาศให้แห้งจากนั้นจึงผสมกับน้ำ เพื่อให้ได้ปริมาณความชื้นในมวลดินที่ต้องการ (มีค่าอยู่ระหว่าง 10-15%) และทำการหามวลของตัวอย่างทราย
4. บรรจุทรายลงในทรงกระบอกแล้วทำการบดอัดทรายพร้อมทั้งบรรจุอุปกรณ์เก็บตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงเสียดทานลงไปด้วย จากนั้นวัดปริมาตรของทรายในแบบจำลองเพื่อหาค่าความหนาแน่นของทราย
5. หาคุณสมบัติของสารรักษาเสถียรภาพได้แก่ความหนืดแบบกรวยมาร์ช (Marsh Funnel Viscosity), ความหนาแน่นของสารละลาย (Unit Weight of Slurry), ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ตามมาตรฐานของ API 13 B
6. วัดค่ากำลังของพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer Strength) และทอร์เวน ซึ่งอุปกรณ์ทั้ง 2 แสดงอยู่ในรูปที่ 3-6 ของทรายก่อนบรรจุสารละลายจากนั้นบรรจุสารละลายลงไป
7. ให้ความดันที่แบบจำลองโดยความดันที่เลือกจะเป็นผลของความดันของเหลวในหลุมเจาะกับความดันของน้ำใต้ดินในชั้นทรายที่พิจารณา เมื่อพิจารณาแรงดันน้ำใต้ดินของกรุงเทพฯ ๙ ผลต่างนี้มีค่าประมาณ 150-200 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
8. วัดปริมาณที่สารละลายไหลผ่านทรายตามท่อในช่วงเวลาที่กำหนดไว้จนครบตามระยะเวลาของการทดสอบจึงค่อย ๆ ลดความดันที่ละน้อย
9. นำสารละลายที่เหลืออยู่ออกจากแบบจำลองแล้ววัดค่ากำลังของพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer Strength) ดังรูปที่ 3-7 และกำลังของทอร์เวนของทราย

10. เก็บตัวอย่างผิวสัมผัสของทรายกับสารละลายดังแสดงในรูปที่ 3-8 และนำตัวอย่างไปทำการทดสอบแรงเสียดทานระหว่างทรายกับผิวมอร์ทาร์



รูปที่ 3-4 แบบจำลองการไหลผ่านชั้นทราย



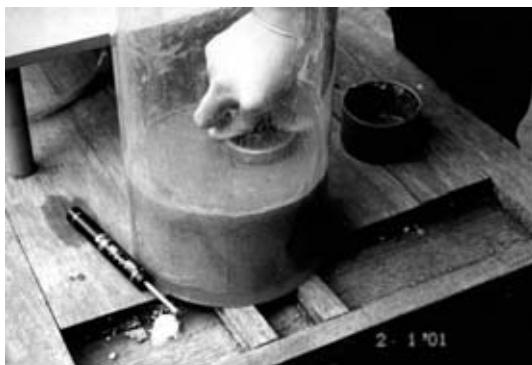
รูปที่ 3-5 ปริมาตรสารละลายที่ไหลผ่านชั้นทราย



รูปที่ 3-6 อุปกรณ์พีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา และเทอร์เวน



รูปที่ 3-7 การทดสอบกำลังของพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา



รูปที่ 3-8 การเก็บตัวอย่างผิวสัมผัสของทราย
กับสารละลาย



รูปที่ 3-9 ตัวอย่างทรายหลังการทดสอบการ
ไหลผ่านของสารละลาย

3.2.2 การทดสอบแรงเสียดทาน

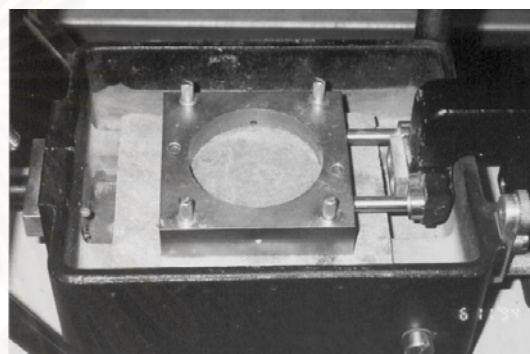
การทดสอบแรงเสียดทานจะนำตัวอย่างที่ได้จากแบบจำลองการไหลผ่านในชั้นทรายมาทำการทดสอบ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบจะมีลักษณะคล้ายกับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear) ตามมาตรฐาน ASTM แต่จะเปลี่ยนกล่องดันตัวอย่างขึ้นล่าง (Lower Shear Box) เป็นผิวมอร์ทาร์ที่ใช้ทดสอบแรงเสียดทาน ซึ่งในการทดสอบของงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นมอร์ทาร์ที่มีอัตราผสมของซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:2 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 และแผ่นมอร์ทาร์นี้มีขนาดเท่ากับ 104×128×20 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3-10 ขนาดตัวอย่างทรายมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 64.3 มม. หนา 10 มม. โดยมีอัตราการเคลื่อนตัวของกล่องดันตัวอย่างขึ้นบน (Upper Shear Box) เท่ากับ 0.2 มม ต่อนาที สำหรับทุกตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบเพื่อหามุมเสียดทานระหว่างทรายกับผิวมอร์ทาร์ (δ) มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างที่ได้จากแบบจำลองการไหลผ่านในชั้นทราย ในเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 3-11
2. เลือกแรงดันที่จะกดทับตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าเท่ากับแรงดันดินด้านข้างของเสาเข็ม ซึ่งในการทดสอบแรงเสียดทานจำเป็นต้องกำหนดค่าแรงดันกดทับตัวอย่างต่ำสุด เนื่องจากถ้าแรงกดทับไม่เพียงพอจะไม่สามารถทำให้ตัวอย่างเกิดแรงเสียดทานได้ แล้ววางแรงดันกดทับที่ตัวอย่างดังรูปที่ 3-12

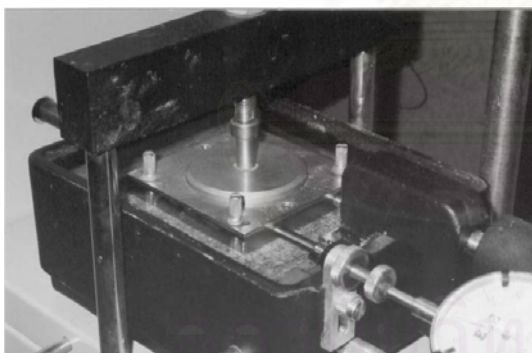
3. ให้แรงดันที่กล่องดินตัวอย่างขึ้นบน (Upper Shear Box) วัดค่าแรงเฉียดทานที่เกิดขึ้นจนค่าขึ้นถึงค่าสูงสุด บันทึกค่าแรงเฉียดทาน, การเคลื่อนตัวในแนวราบและการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง ดังรูปที่ 3-13
4. ค่ามุมเฉียดทานระหว่างทรายที่ผ่านการไหลของสารละลายประเภทต่างๆ หาได้จากการพล็อตค่าระหว่างหน่วยแรงเฉียดทานกับหน่วยแรงกดที่ตัวอย่าง ค่ามุมความชันของเส้นความสัมพันธ์จะเป็นค่ามุมเฉียดทาน (δ) ของตัวอย่างชนิดนั้น



รูปที่ 3-10 แผ่นมอร์ทาร์ที่ใช้ทดสอบแรงเฉียดทาน



รูปที่ 3-11 การเตรียมตัวอย่างทดสอบแรงเฉียดทาน



รูปที่ 3-12 กล่องดินตัวอย่างขึ้นบน (Upper Shear Box) และผิวมอร์ทาร์



รูปที่ 3-13 เครื่องมือทดสอบแรงเฉียดทาน

3.2.3 คุณสมบัติของทรายที่นำมาใช้ในแบบจำลองการไหลผ่านของสารละลาย

ทรายที่นำมาทดสอบจะต้องผ่านการหาคุณสมบัติเบื้องต้นซึ่งข้อมูลบางส่วนอาจได้จากการเจาะสำรวจดิน ซึ่งข้อมูลเหล่านั้นได้แก่ ปริมาณความชื้นในมวลดิน, ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) และลักษณะของดินจากการจำแนกชนิดของดิน (Soil Classification)

ซึ่งข้อมูลของความชื้นในมวลดินสามารถใช้เพื่อเตรียมตัวอย่างในแบบจำลองให้มีความชื้นในมวลดินใกล้เคียงกัน, ค่า SPT-N Value สามารถนำไปหาค่ามุม ϕ' และความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density) ของดินได้

ข้อมูลอีกส่วนจะได้จากการหาค่าในห้องปฏิบัติการได้แก่ ค่าความหนาแน่นสูงสุดและต่ำสุดของทราย, ค่าการไหลผ่านของน้ำในทราย (Hydraulic Conductivity), ลักษณะของดินตามการจำแนกแบบยูนิไฟด์ (Unified Soil Classification) และค่ามุม ϕ' จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test)

การเตรียมตัวอย่างทรายในการทดสอบแบบจำลองจะพยายามให้ตัวอย่างมีสภาพใกล้เคียงกับสภาพของดินในธรรมชาติให้มากที่สุด เพื่อให้ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับสภาพในการทดสอบเสาเข็ม

3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของดินที่เกี่ยวข้องกับกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

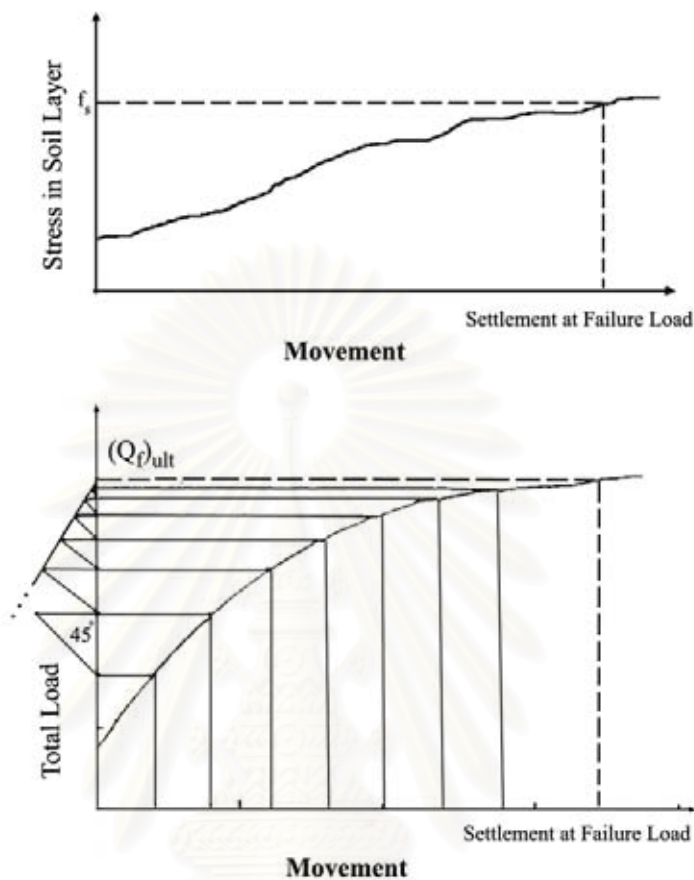
3.3.1 ค่า β ในชั้นทรายจากการทดสอบเสาเข็ม

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉียดทานในชั้นทราย (β) จะเสนอในรูปความสัมพันธ์กับมุมเฉียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') ซึ่งค่า β ได้จากการวิเคราะห์กลับหน่วยแรงเฉียดทานในชั้นทรายจากผลการถ่ายน้ำหนักในการทดสอบเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด โดยสมการที่ 3.1

$$\beta = f_s / \sigma'_{vi} \quad (3.1)$$

โดย f_s หาได้จากแรงเฉียดทานในชั้นทรายนั้นหารด้วยพื้นที่รับแรงเฉียดทาน ซึ่งแรงเฉียดทานจะเป็นค่าแรงเฉียดทานที่เกิดขึ้นที่น้ำหนักทดสอบสูงสุด เนื่องจากเสาเข็มที่ทำการทดสอบในงานวิจัยครั้งนี้ไม่เกิดการวิบัติ ตามปกติค่าแรงเฉียดทานสูงสุดจะเกิดขึ้นที่น้ำหนักทดสอบสูงสุดสำหรับชั้นทราย และขึ้นกับการถ่ายแรงสู่ชั้นดินแต่ละความลึกซึ่งดินชั้นบนรับแรงเฉียดทานสูงสุดได้ก่อนดินชั้นลึกลงไป

ในกรณีที่เสาเข็มเกิดการวิบัติ ค่า f_s จะหาจากแรงเฉียดทานที่เกิดขึ้น ณ การทรุดตัวที่ให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) ดังแสดงในรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-14 ค่า f_s ที่ใช้คำนวณค่า β ในชั้นทราย

ค่าแรงดันประสิทธิผลในแนวตั้ง (σ'_{v1}) ที่ใช้คำนวณ จะคิดที่ความลึกถึงกลางชั้นของทรายที่พิจารณาโดย พิจารณาผลของการลดลงของแรงดันน้ำใต้ดิน (Piezometric Drawdown) ในชั้นดินกรุงเทพฯด้วย

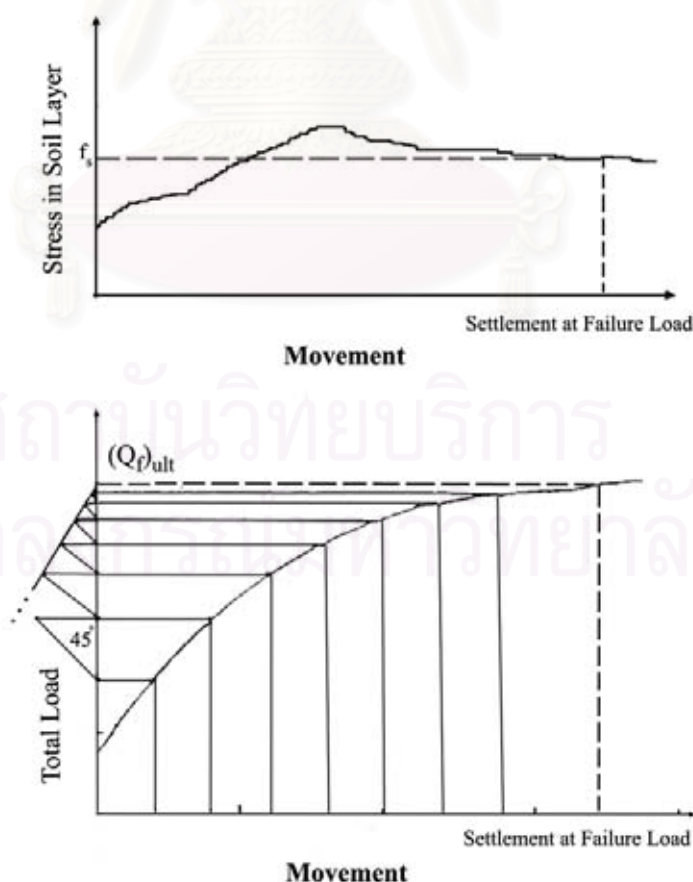
ค่ามุมต้านทานภายใน (ϕ') สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ' กับ $N_{corrected}$ ของ Peck, Hanson & Thornburn (1975) ที่เป็นค่าเฉลี่ยของชั้นทรายนั้นโดยพิจารณาตำแหน่งกึ่งกลางชั้นเป็นจุดปรับแก้ผลจากหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง

3.3.2 ค่า α ในชั้นดินเหนียวจากการทดสอบเสาเข็ม

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถหาได้จากการวิเคราะห์หักกลับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียว จากผลการทดสอบการถ่วงน้ำหนักลงชั้นดินในเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด โดยสมการที่ 3.2

$$\alpha = f_s / S_u \quad (3.2)$$

เนื่องจากเสาเข็มที่ทำการทดสอบในงานวิจัยครั้งนี้ไม่เกิดการวิบัติ ค่า f_s ที่ใช้ในการวิเคราะห์หักกลับจะใช้ค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่น้ำหนักทดสอบสูงสุด ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Q_{ult}) มากที่สุด ในชั้นดินเหนียวแรงเสียดทานสูงสุดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้น ณ การทรุดตัวที่น้อยกว่า ค่าทรุดตัวที่น้ำหนักทดสอบสูงสุดซึ่งพฤติกรรมนี้จะแตกต่างออกไปในชั้นทรายดังแสดงในรูปที่ 3-15



รูปที่ 3-15 ค่า f_s ที่ใช้คำนวณค่า α ในชั้นดินเหนียว

ค่า S_u ของชั้นดินเหนียวอ่อน สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดแรง (Unconfined Compression Test, UC) หรือการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Unconsolidated Undrained Triaxial Test, UU) ทั้งชั้นดินที่ทำการพิจารณาสำหรับชั้นดินเหนียวแข็ง จะหาค่า S_u โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน (S_u) ของวีระนันท์ (2526) โดยค่าจำนวนครั้งในการตอก (N) ที่ใช้ไม่ต้องทำการปรับแก้ผลของความลึก

3.3.3 ค่า β ในทรายจากการทดสอบแรงเสียดทานในห้องปฏิบัติการ

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) ไม่สามารถหาได้โดยตรงจากการทดสอบแรงเสียดทาน ต้องแบ่งเป็นสองส่วนคือ $\beta = K_s \cdot \tan \delta$ ค่า $\tan \delta$ สามารถหาค่าจากการพล็อตค่าระหว่างหน่วยแรงเสียดทานกับหน่วยแรงกดที่ตัวอย่าง โดยใช้หน่วยแรงกดเป็นแกนนอนและค่าหน่วยวัดของทั้งสองแกนต้องอยู่ในหน่วยเดียวกัน ค่ามุมเสียดทานระหว่างทรายกับมอร์ตาร์ (δ) จะหาได้จากความชันของเส้นที่ลากผ่านจุดความสัมพันธ์

สำหรับค่า K_s ได้จากการประมาณค่าเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพในสถานที่ก่อสร้างโดยใช้ค่าของเสาค้ำเข็มนั้นคือ $K_s = 1 - \sin \phi'$ และค่า ϕ' สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $N_{corrected}$ กับ ϕ' หรือจากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) จากตัวอย่างทรายที่นำมาทดสอบ

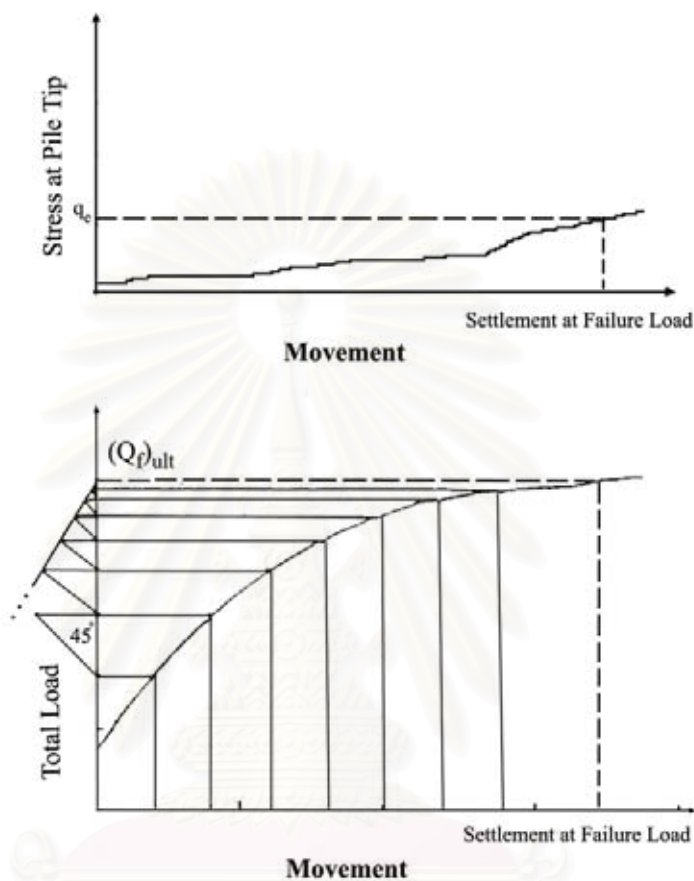
3.3.4 ค่าแรงต้านที่ปลายเข็มในชั้นทราย (N_q^*)

ค่าแรงต้านที่ปลายเข็มในชั้นทราย (Mobilized Bearing Capacity, N_q^*) จะอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับมุมด้านทานภายใน (ϕ') เสาค้ำเข็มนำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้ทุกต้นมีปลายเข็มอยู่ที่ชั้นทราย โดยค่า N_q^* สามารถหาค่าได้จากการวิเคราะห์กลับจากการทดสอบเสาค้ำเข็ม จากสมการ 3.3

$$N_q^* = q_E / \sigma'_{ve} \quad (3.3)$$

ค่า q_E ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นหน่วยแรงกดที่ได้จากเกจวัดความเครียด (VSWG) ที่ปลายเสาค้ำเข็ม ซึ่งค่า q_E ที่เกิดการหลุดตัวที่หัวเสาค้ำเข็ม ณ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) ดังแสดงในรูปที่ 3-16 แต่จากการทดสอบครั้งนี้ พบว่าเสาค้ำเข็มไม่เกิดการวิบัติ ทำให้ต้องเลือกค่า q_E ที่เป็นค่าสูงสุด

ในการทดสอบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ห้อย่างไรก็ตาม การถ่ายแรงในเสาเข็มแรงเสียดทานจะเกิดขึ้นก่อนจะถ่ายลงมาที่แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ทำให้เมื่อวิเคราะห์ค่า N_q^* จะได้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริง



รูปที่ 3-16 ค่า q_c ที่ใช้คำนวณค่า N_q^* ในชั้นทราย

ค่า σ'_{ve} เป็นค่าที่คำนวณที่ความลึกเท่ากับระดับความลึกของ VSWG ที่ปลายเสาเข็มโดยคำนึงถึงผลกระทบของการลดลงของน้ำใต้ดิน (Piezometric Drawdown) ของชั้นดินกรุงเทพฯ ของปี พ.ศ. 2542

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดสอบ, การวิเคราะห์ผลและ อภิปรายผลการวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้ จะมาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ, ข้อมูลจากสถานที่ก่อสร้างและผลงานวิจัยที่ผ่านมา

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละส่วนจะนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของการใช้สารละลายโพลิเมอร์กับการใช้สารละลายเบนโทไนท์ ซึ่งการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

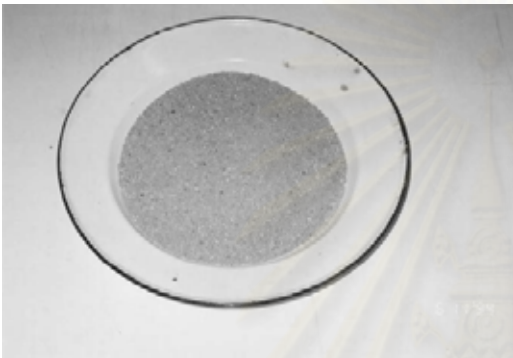
ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบหาคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติของทรายที่นำมาทดสอบ, คุณสมบัติของสารละลายที่สัดส่วนและความเข้มข้นต่างๆ, การซึมของสารละลายผ่านทรายในแบบจำลอง, กำลังของทรายภายหลังการซึมผ่านสารละลายโดยพีวีไทรเมเตอร์แบบพกพา และการทดสอบแรงเสียดทานระหว่างทรายกับผิวมอร์ทาร์ ซึ่งการทดสอบมีความจำเป็นที่จะต้องทำตามลำดับ เพื่อที่จะใช้การควบคุมคุณสมบัติและผลการทดสอบมีความถูกต้อง เช่น ถ้าทรายที่นำมาจากแหล่งเดียวกัน มีคุณสมบัติต่างจากตัวอย่างทรายก่อนหน้านั้นก็จะทำให้ผลการทดสอบต่างๆที่ตามมา คือ การซึมผ่านของสารละลายหรือแรงเสียดทานของทรายมีค่าแตกต่างกันออกไป ซึ่งผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 คุณสมบัติของทรายที่นำมาทดสอบ

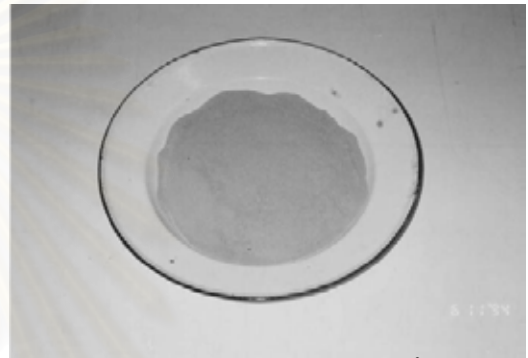
ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้แก่ ทรายหยาบที่ใช้ผสมคอนกรีต (ทรายแม่น้ำ), ทรายกรุงเทพฯชั้นที่หนึ่ง และทรายกรุงเทพฯชั้นที่สอง ซึ่งได้จากการเก็บตัวอย่างจากหลุมเจาะของเสาเข็มจริง รูปที่ 4-1 ถึง 4-4 แสดงตัวอย่างทรายชนิดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ก่อนจะนำทรายมาทดสอบในแบบจำลองจะต้องทำการหาคุณสมบัติก่อนเพื่อที่จะให้การเตรียมตัวอย่างของทรายแต่ละประเภทมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันและทำให้ปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการวิเคราะห์ มีความแตกต่างกันน้อยที่สุด โดยที่คุณสมบัติต่างๆมีค่าดังต่อไปนี้

4.1.1.1 ชนิดของทรายจากการจำแนกโดยวิธียูนิไฟด์ (Unified Soil Classification System)

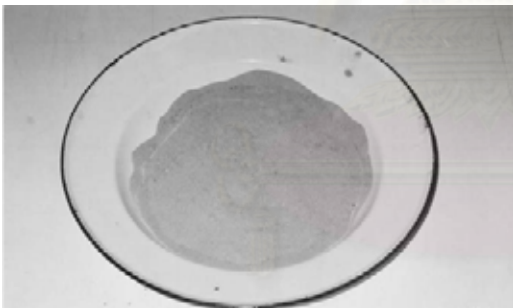
จากการจำแนกชนิดของทรายพบว่า ทรายหยาบ (ทรายแม่น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต) อยู่ในประเภท SP ทรายกรุงเทพฯชั้นที่หนึ่งและทรายกรุงเทพฯชั้นที่สองจัดอยู่ในประเภท SM รูปที่ 4-5 แสดงการจำแนกชนิดของทรายแต่ละชนิด



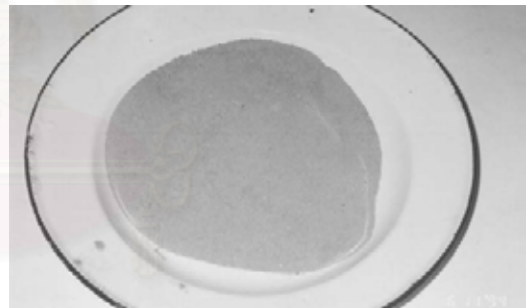
รูปที่ 4-1 ตัวอย่างทรายหยาบ



รูปที่ 4-2 ตัวอย่างทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1

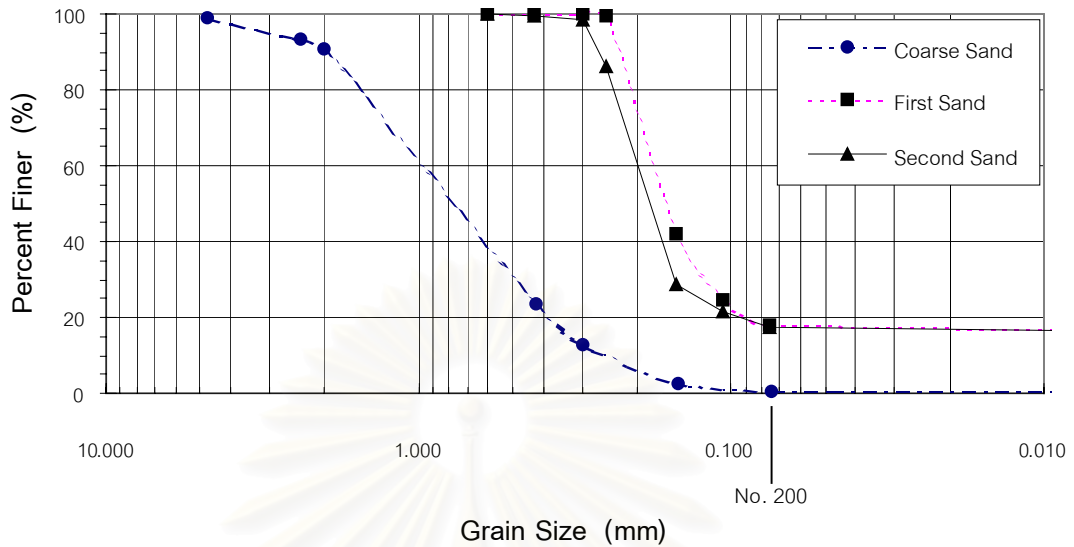


รูปที่ 4-3 ตัวอย่างทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 2



รูปที่ 4-4 ตัวอย่างทรายที่ตกตะกอนในถังพัก
ตะกอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-5 ขนาดคละ (Grain Size Distribution) ของทรายที่ใช้ในการวิจัย

4.1.1.2 ค่ามุมต้านทานภายในของทราย (Angle of Internal Resistance, ϕ')

จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) ของตัวอย่างทรายพบว่า ทรายหยาบ (ทรายแม่น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต) มีมุมต้านทานภายใน (ϕ') เท่ากับ 34.3° ทรายกรุงเทพฯชั้นที่หนึ่งมีมุม ϕ' เท่ากับ 33.5° และ 33.7° สำหรับทรายกรุงเทพฯชั้นที่สอง โดยที่ตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบแรงเฉือนโดยตรง มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 12 % ทุกตัวอย่าง และมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ระหว่าง 75–85 %

สำหรับค่ามุม ϕ' ที่ได้จากการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT) ของทรายกรุงเทพฯ ชั้นที่ 1 และ 2 มีค่าอยู่ระหว่าง 31° - 35° และ 32° - 36° ตามลำดับ

4.1.1.3 ความหนาแน่นสูงสุดและต่ำสุดของทราย

การหาความหนาแน่นสูงสุดและต่ำสุดของทรายมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้คำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทราย โดยการทดสอบจะใช้มาตรฐานของ ASTM D-4253 และ ASTM D-4254 ซึ่งจะให้ผลการทดสอบดังตาราง 4-1

4.1.1.4 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านในชั้นทราย (Hydraulic Conductivity, k)

การทดสอบหาสัมประสิทธิ์การไหลผ่านในชั้นทรายจะใช้วิธีระดับน้ำคงที่ (Constant Head Permeability Test) ดังแสดงผลในตารางที่ 4-1 เพื่อเปรียบเทียบการไหลผ่านของทรายก่อนที่จะเกิดเยื่อบูที่บนน้ำ (Filter Cake)

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของทรายที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ประเภทของทราย	$\gamma_{d,min}$ (kN/m ³)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	Relative Density	Hydraulic Conductivity
ทรายหยาบ(ใช้ผสมคอนกรีต)	14.66	16.82	80 *	5.15×10^{-2} (cm/sec)
ทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1	15.48	19.22	75-85 **	2.30×10^{-3} (cm/sec)
ทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 2	15.42	18.92	75-85 **	3.79×10^{-3} (cm/sec)

* ได้จากการเตรียมตัวอย่างทรายในแบบจำลอง

** ได้จากการเก็บข้อมูลของ SPT ในการเจาะสำรวจชั้นดิน

4.1.2 คุณสมบัติของสารละลาย

การใช้สารละลายเบนโทไนท์สำหรับเสาะเข็มเจาะโดยทั่วไปจะทำการทดสอบคุณสมบัติ 4 อย่างของสารละลายคือ ความหนาแน่นของสารละลาย , ความหนืดของสารละลายโดยวิธีกรวยมาร์ช (Marsh Funnel), ความเป็นกรด-เบสของสารละลายและปริมาณทรายที่ผสมอยู่ในสารละลาย (Sand Content) เมื่อนำสารละลายโพลีเมอร์เข้ามาใช้ คุณสมบัติที่จะต้องทดสอบจะยังคงใช้เหมือนกับการใช้สารละลายเบนโทไนท์เนื่องจากข้อกำหนดในการก่อสร้าง แต่เนื่องจากพฤติกรรมของโพลีเมอร์แตกต่างจากเบนโทไนท์ออกไป ข้อกำหนดดังกล่าวควรมีการเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสม ซึ่งคุณสมบัติทั้ง 4 อย่างมีรายละเอียดดังตารางที่ 4-2

4.1.2.1 ความหนาแน่นของสารละลาย

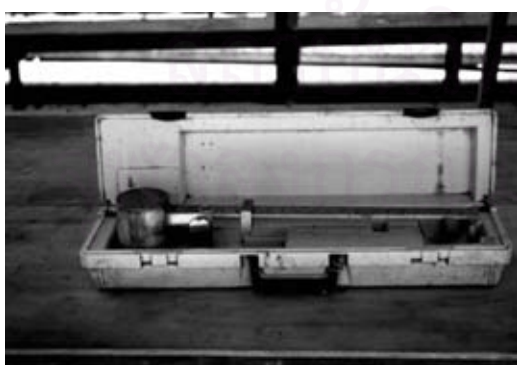
การหาความหนาแน่นของสารละลายในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้โดยตวงสารละลายตามปริมาตร แล้วนำไปชั่งมวลด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.01 g การหาความหนาแน่นในสถานที่ก่อสร้างจะใช้ตาชั่งสารละลาย (Mud Balance) ตามมาตรฐาน API 13B ดังแสดงในรูปที่ 4-6 ซึ่งสารละลายที่มีสัดส่วนผสมและความเข้มข้นต่างๆจะมีค่าความหนาแน่นดังตาราง 4-2

4.1.2.2 ความหนืดของสารละลายโดยวิธีกรวยมาร์ช (Marsh Funnel)

การทดสอบความหนืดของสารละลายโดยวิธีกรวยมาร์ช (Marsh Funnel) จะมีขั้นตอนและอุปกรณ์ตามมาตรฐานของ API 13B ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4-7 ผลการทดสอบให้ค่าดังตาราง 4-2

4.1.2.3 ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย

ค่าความเป็น กรด-เบส ของสารละลายจะใช้อุปกรณ์วัดความเป็นกรด-เบส (pH Meter) ดังแสดงในรูปที่ 4-8 เป็นตัววัด โดยการผสมผงโพลีเมอร์หรือผงเบนโทไนท์จะใช้น้ำประปาเป็นสารผสม ซึ่งค่า pH ของสารละลายที่ส่วนผสมต่างๆจะให้ค่าดังตาราง 4-2



ยบริการ
หาวิทยาลัย



รูปที่ 4-6 ตาชั่งสารละลาย (Mud Balance)

รูปที่ 4-7 กรวยมาร์ช (Marsh Funnel)



รูปที่ 4-8 อุปกรณ์วัดความเป็นกรด-เบสของสารละลาย (pH Meter)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-2 คุณสมบัติของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ

ส่วนผสมของสารละลาย (% โดยน้ำหนัก)		ความหนาแน่น ของสารละลาย (g/cm ³)	ความหนืดแบบกรวยมาร์ช (sec)	pH
Polymer (%)	Bentonite (%)			
0.05	1	1.007	41.8	9.16
0.05	1.5	1.012	64.3	9.20
0.05	2	1.019	71.3	9.38
0.08	0	1.000	43.3	7.78
0.08	1	1.008	49.8	8.87
0.08	2	1.020	98.3	9.13
0.10	0	0.999	45.5	7.69
0.10	1	1.008	58.6	9.14
0.10	2	1.020	110	9.35
0.15	0	0.999	50.0	7.75
0.15	1	1.009	71.8	9.28
0.15	2	1.019	120.4	9.30
0.20	0	1.000	60.3	7.81
0.20	1	1.008	83.2	9.18
0.20	2	1.020	160.3	9.32

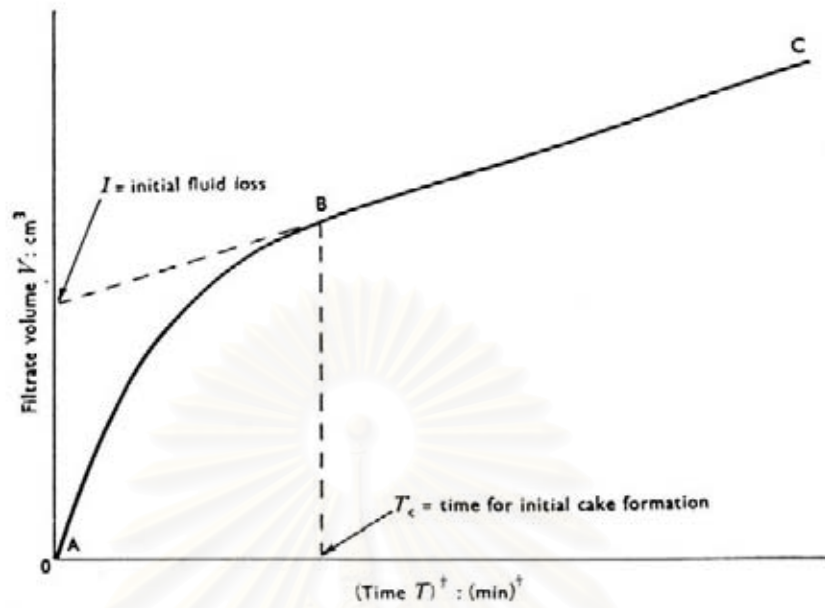
4.1.2.4 ปริมาณทรายในสารละลาย

ในการก่อสร้างจะมีทรายปริมาณหนึ่งค้างในสารละลาย เมื่อทำการสูบลับเพื่อจะนำไปใช้ใหม่ ในสถานที่ก่อสร้างจะใช้วิธีและอุปกรณ์หาปริมาณทราย ตามมาตรฐานของ API 13B แต่ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการเมื่อผสมเบนโทไนท์หรือโพลีเมอร์จะไม่มีทรายผสมอยู่ในสารละลายจึงไม่จำเป็นต้องมีการทดสอบปริมาณทรายในสารละลายสำหรับงานวิจัยนี้

4.1.3 ผลการทดสอบการไหลผ่านชั้นทรายของสารละลาย

การทดสอบแบบจำลองไหลผ่านชั้นทรายของสารละลายจะใช้ปริมาณทรายแห้ง 5000 g ผสมกับน้ำให้ได้ปริมาณความชื้นเท่ากับ 12 % และมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ในช่วง 75 – 85 % สารละลายที่ใช้จะทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนและความเข้มข้นของสารละลาย โดยจะใช้ปริมาณสารละลายเท่ากับ 4000 cm³ ให้ความดันที่ใช้เท่ากับ 200 kN/m² ซึ่งเท่ากับผลต่างระหว่างแรงดันของสารละลายกับแรงดันของน้ำใต้ดิน (พิจารณาผลของแรงดันน้ำใต้ดินของกรุงเทพฯ) และใช้เวลาทดสอบ 60 นาที จากการทดสอบ พบว่า สำหรับส่วนผสมที่มีเบนโทไนท์ผสมอยู่ เมื่อมีการไหลผ่านเข้าไปในชั้นทรายจนผ่านไปถึงเวลาหนึ่งอัตราการไหลผ่านจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าเกิดเยื่อที่บนน้ำขึ้นบางส่วน ซึ่งอัตราการลดลงของการไหลจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเบนโทไนท์ โดยเวลาที่อัตราการไหลผ่านลดลงอย่างมากจะเรียกว่า เวลาการเกิดเยื่อที่บนน้ำเริ่มต้น (Time for Initial Filter cake), T_c ซึ่งแสดงในรูปแบบที่ 4-9

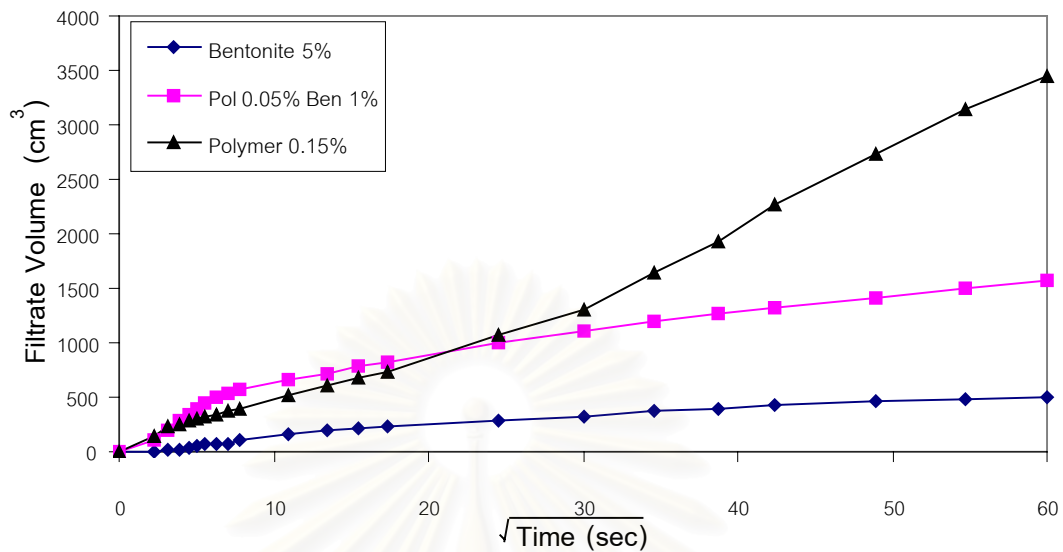
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-9 ระยะเวลาการเกิดเยื่อที่บ่งชี้เริ่มต้น

สำหรับสารละลายที่ใช้เพียงโพลีเมอร์อย่างเดียวอัตราการไหลผ่านชั้นทรายจะไม่ลดลงเนื่องจากไม่มีเยื่อที่บ่งชี้ (Filter Cake) เกิดขึ้น จากรูปความสัมพันธ์จะเห็นว่าอัตราการไหลกับเวลาในการไหลมีความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4-10

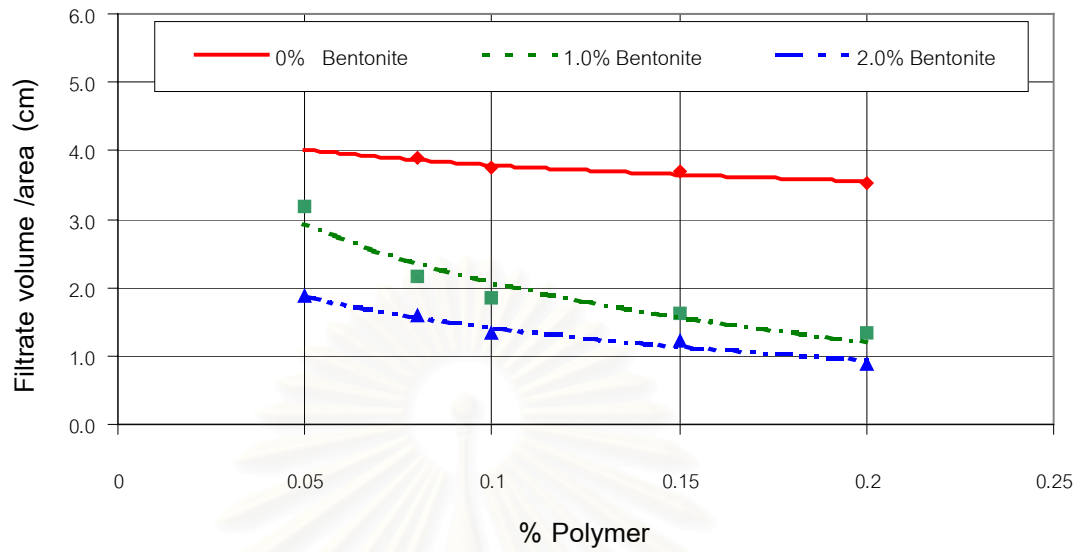
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



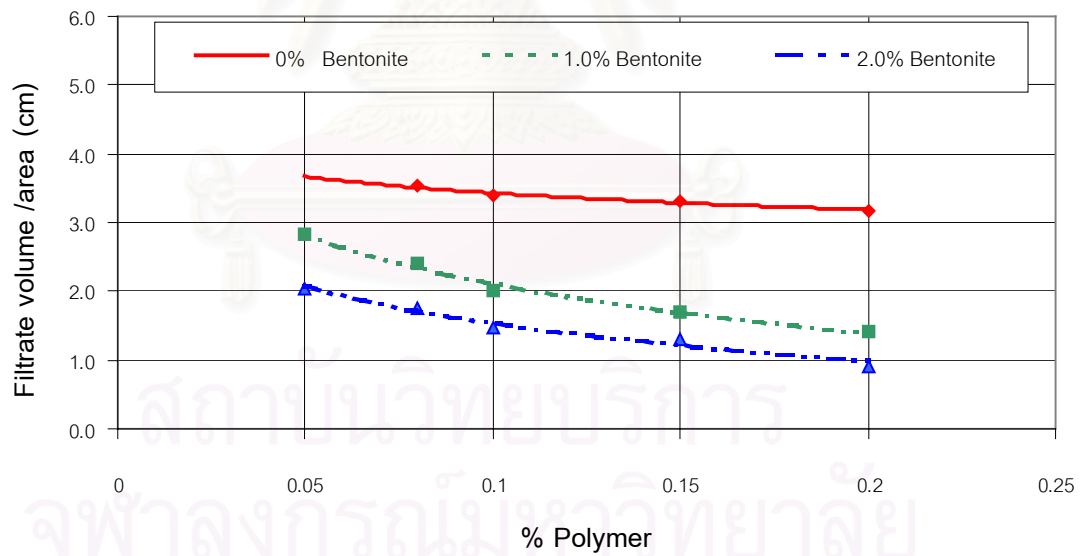
รูปที่ 4-10 แสดงตัวอย่างการไหลผ่านชั้นทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1 ของสารละลายที่มีส่วนผสมต่างๆกัน

ความหนาของเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake) นั้นในสารละลายเบนโทไนท์ที่มีความเข้มข้น 5 % หลังจากไหลผ่านชั้นทรายไป 1 ชั่วโมง สามารถวัดความหนาเยื่อที่บดน้ำได้ประมาณ 0.5–1 mm ในสารละลายที่มีส่วนผสมของเบนโทไนท์ต่ำ (ไม่เกิน 2 %) ความหนาของเยื่อที่บดน้ำมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้ แต่จะมีเยื่อที่บดน้ำบางส่วนเกิดขึ้นระหว่างเม็ดทราย ทำให้อัตราการไหลผ่านลดลงไปได้ แต่เนื่องจากปริมาณเบนโทไนท์ในสารละลายมีน้อยทำให้ไม่เกิดเยื่อที่บดน้ำที่มีความหนาตามที่ผิวของทราย

อัตราการไหลของสารละลายผ่านชั้นทรายในสารละลายที่มีส่วนผสมของเบนโทไนท์จะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากค่าความสามารถในการซึมผ่านของเยื่อที่บดน้ำจะต่ำกว่าของทรายมาก และความหนาของเยื่อที่บดน้ำจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่สารละลายเบนโทไนท์ไหลผ่าน เนื่องจากเกิดการสะสมตัวของอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) ในเบนโทไนท์ เมื่อความหนาของเยื่อที่บดน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการไหลผ่านของสารละลายลดลง ทำให้อัตราการไหลมีค่าน้อยมากเมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง ผลการทดสอบการไหลผ่านชั้นทรายที่เวลา 60 นาทีได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 4-11 และ 4-12



รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ของการไหลผ่านชั้นทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1 ที่เวลา 60 นาทีเมื่อใช้อัตราส่วนของสารละลายต่างๆกัน



รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ของการไหลผ่านชั้นทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 2 ที่เวลา 60 นาทีเมื่อใช้อัตราส่วนของสารละลายต่างๆกัน

4.1.4 การเปลี่ยนแปลงทางด้านกำลังของทรายโดยเครื่องมือพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer)

เมื่อทำการอัดความดันให้สารละลายผ่านทรายเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง พบว่ากำลังของทรายมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4-13 แสดงให้เห็นว่าผิวหน้าของทรายมีความแข็งเพิ่มขึ้นและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันจนสามารถยกทรายเป็นแผ่นได้ เมื่อเทียบกับทรายที่ห่างจากผิวหน้า (รูปที่ 4-14) ลงมาจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของทรายในส่วนนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านกำลังที่ชัดเจน เมื่อวัดด้วยพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer) ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 4-15 ถึง 4-17 เปรียบเทียบกันระหว่างกำลังของทรายก่อนผ่านการไหลผ่านของสารละลายและหลังการไหลผ่านของสารละลาย เมื่อแยกพิจารณาเป็นกรณี จะอธิบายพฤติกรรมได้ดังนี้



รูปที่ 4-13 ทรายที่ส่วนผิวหน้ามีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างมากสามารถเกาะติดเป็นแผ่นได้

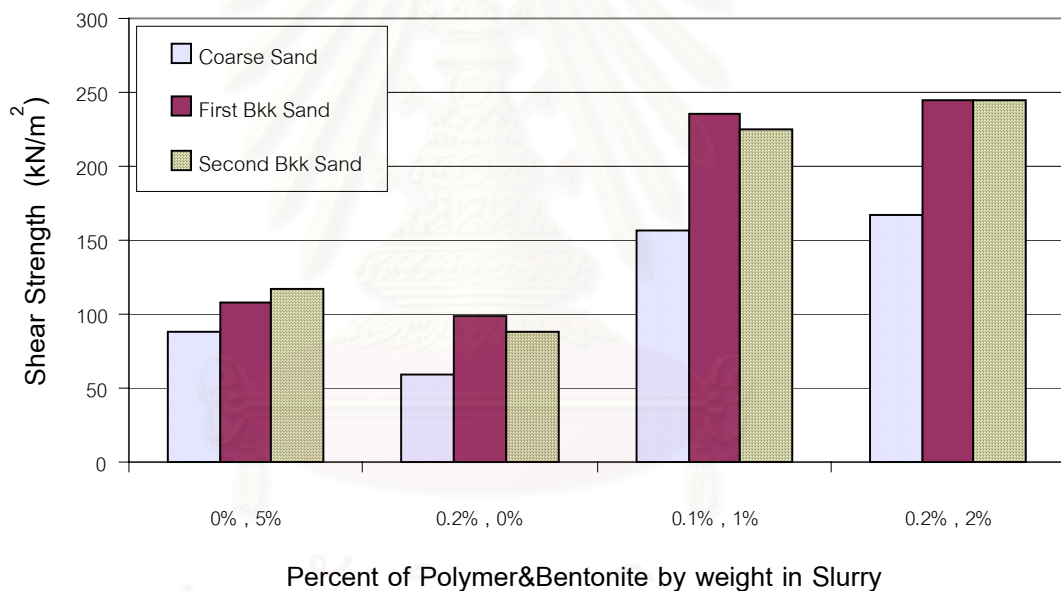


รูปที่ 4-14 ทรายในส่วนที่ห่างจากผิวหน้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านกำลังที่ชัดเจน

4.1.4.1 ชนิดของทราย

จากการทดสอบกับตัวอย่างทรายทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ทรายหยาบ (ที่ใช้ผสมคอนกรีต), ทรายกรุงเทพฯชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สองพบว่า กำลังที่เพิ่มขึ้นของทราย แต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากันโดยที่กำลังของทรายก่อนผ่านการไหลของสารละลายของทรายทุกชนิดมีค่าเท่ากันหมดคือใกล้เคียงศูนย์

หลังจากผ่านการไหลของสารละลายที่มีสัดส่วนและความเข้มข้นเท่ากันจะเห็นได้ว่าทรายหยาบมีกำลังเพิ่มขึ้นน้อยกว่าทรายกรุงเทพฯชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สอง ซึ่งมีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 4-15



รูปที่ 4-15 การทดสอบทรายชนิดต่างๆ โดยพีวีไทรอมิเตอร์แบบพกพาที่อัตราส่วนของสารละลายต่างๆ

ทั้งนี้เนื่องจากค่าความสามารถในการซึมผ่านของทรายหยาบมีค่าสูงกว่าทรายกรุงเทพฯและมีค่าปริมาณดินเม็ดละเอียด (Fine Content) ประมาณ 2% ซึ่งต่ำกว่าทรายกรุงเทพฯทั้งสองชั้นที่มีปริมาณดินเม็ดละเอียดถึงประมาณ 17% ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินของทรายหยาบมีค่าสูงกว่าทรายกรุงเทพฯ อันจะเป็นผลให้การจับตัวของโครงสร้างโพลีเมอร์และการอุดช่องว่างของเบนโทไนท์เกิดขึ้นน้อยกว่าในกรณีของทรายกรุงเทพฯซึ่งโครงสร้างของโพลีเมอร์และเยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake)

ของเบนโทไนท์จะทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้ทรายสามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดทรายได้ ดังนั้นกำลังของทรายกรุงเทพฯ จึงมีค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบพินิโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer) เพิ่มขึ้นมากกว่าทรายหยาบเมื่อสารละลายที่มีส่วนผสมเท่ากันไหลผ่าน

ในกรณีที่ใช้เบนโทไนท์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังของทรายแต่ละชนิดมีค่าต่างกันไม่มากนักเนื่องจากเบนโทไนท์จะอุดช่องว่างระหว่างเม็ดทรายและสร้างเยื่อที่บูนน้ำ (Filter Cake) ทำให้กำลังที่ผิวหน้าของทรายแต่ละประเภทต่างกันไม่มากนัก

ในกรณีที่ใช้โพลีเมอร์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนัก) พบว่าทรายกรุงเทพฯ ชั้นที่ 1 และ 2 มีกำลังเพิ่มขึ้นมากกว่าทรายหยาบ เนื่องจากโพลีเมอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างเม็ดทรายเท่านั้นและทรายกรุงเทพฯ มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินน้อยกว่าทรายหยาบทำให้การประสานเม็ดทรายของโพลีเมอร์เกิดประสิทธิภาพในทรายกรุงเทพฯ สูงกว่าทรายหยาบ

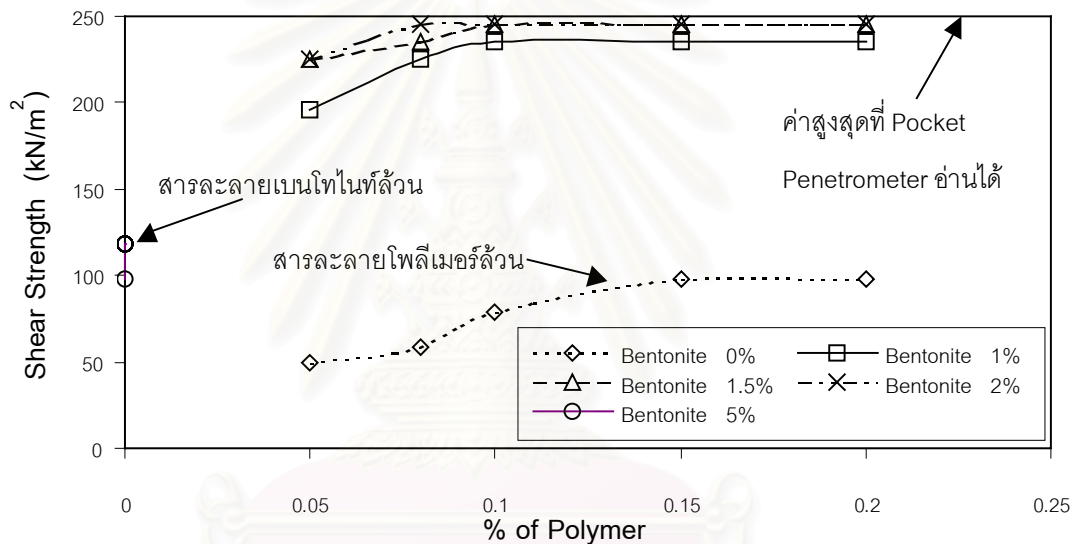
ในกรณีที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ผสมกับเบนโทไนท์จะพบว่ากำลังรับแรงเฉือนของทรายโดยพินิโตรมิเตอร์แบบพกพาของทรายทุกชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยที่ทรายกรุงเทพฯ จะมีกำลังที่เพิ่มขึ้นมากกว่าทรายหยาบเนื่องจากผลจากทั้งโพลีเมอร์และเบนโทไนท์รวมกันคือ เบนโทไนท์จะทำให้ทรายทุกประเภทมีกำลังเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน แต่โพลีเมอร์จะเกิดประสิทธิภาพในทรายกรุงเทพฯ มากกว่าทรายหยาบ

4.1.4.2 สัดส่วนและความเข้มข้นของสารละลาย

สารละลายที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มี 3 ประเภทคือ สารละลายเบนโทไนท์ล้วน, สารละลายโพลีเมอร์ล้วน, สารละลายผสมเบนโทไนท์และโพลีเมอร์ ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนของทรายได้แสดงไว้ในรูปที่ 4-16 และ 4-17

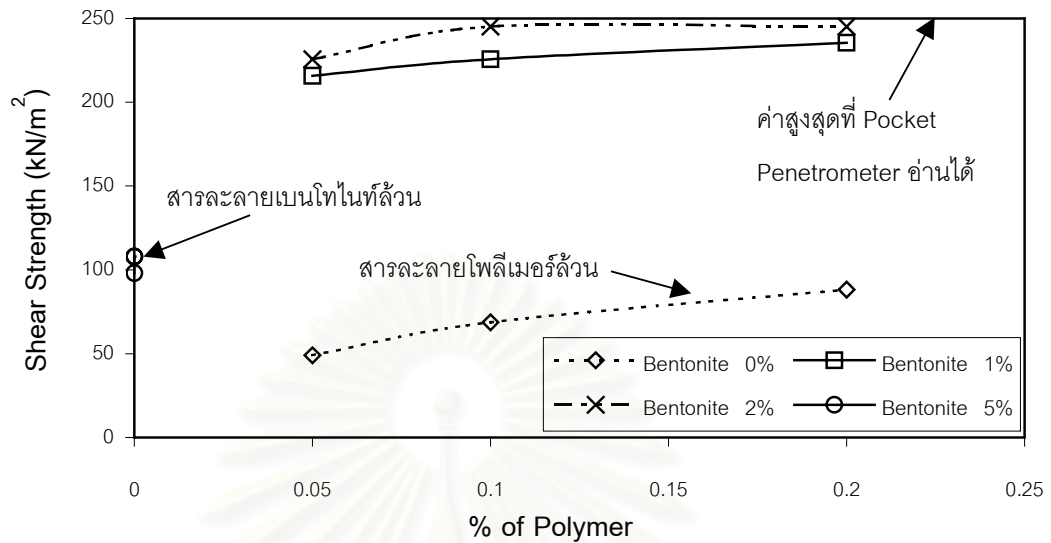
จากผลการทดสอบ Teparaksa&Boonyarak (2001) สามารถสรุปได้ว่า

1. ในกรณีใช้สารละลายโพลีเมอร์ล้วนจะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของพีนีโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer) ต่ำที่สุด
2. ในกรณีใช้สารละลายเบนโทไนท์ล้วนจะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของพีนีโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer) สูงกว่ากรณีใช้สารละลายโพลีเมอร์ล้วน
3. ในกรณีใช้สารละลายผสมระหว่างเบนโทไนท์และโพลีเมอร์จะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของพีนีโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer) สูงมาก



รูปที่ 4-16 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1 โดยพีนีโตรมิเตอร์แบบพกพา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-17 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 2 โดยพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา

โดยจะพบว่าส่วนผสมระหว่างเบนโทไนท์และโพลีเมอร์ที่เหมาะสม สามารถทำให้กำลังของทรายเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของทรายที่ผ่านสารละลายเบนโทไนท์ล้วนหรือโพลีเมอร์ล้วน โดยเฉพาะการใช้พีนิโตรมิเตอร์แบบพกพาแสดงให้เห็นว่ากำลังของทรายกรุงเทพฯที่ใช้สารละลายผสมระหว่างเบนโทไนท์และโพลีเมอร์มีกำลังมากกว่าค่าสูงสุดของพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพาจะอ่านได้ (ค่าสูงสุดที่พีนิโตรมิเตอร์แบบพกพาอ่านได้มีค่าเท่ากับ 250 kN/m²)

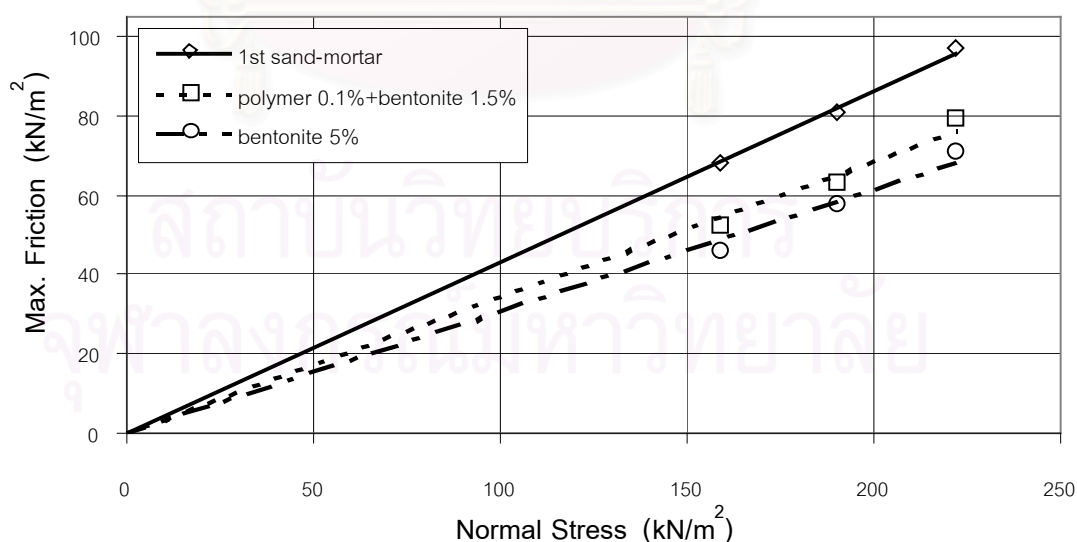
จากรูปที่ 4-15 ถึง 4-17 พบว่าที่อัตราส่วนของเบนโทไนท์ 1% โพลีเมอร์ 0.1% โดยน้ำหนัก ค่ากำลังของทรายโดยพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพาจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่เมื่อเพิ่มโพลีเมอร์หรือเบนโทไนท์ลงไปอีกกลับไม่ทำให้กำลังของทรายโดยพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดทรายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของโพลีเมอร์จนถึงจุดหนึ่ง (ประมาณ 0.1%) ที่โครงสร้างของโพลีเมอร์เข้าไปสร้างแรงยึดเหนี่ยวได้จนสมบูรณ์ทำให้ปริมาณโพลีเมอร์ส่วนที่เกินไม่ช่วยสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดทราย

4.1.5 การทดสอบแรงเสียดทานของตัวอย่างทรายที่ผ่านการไหลของสารละลาย

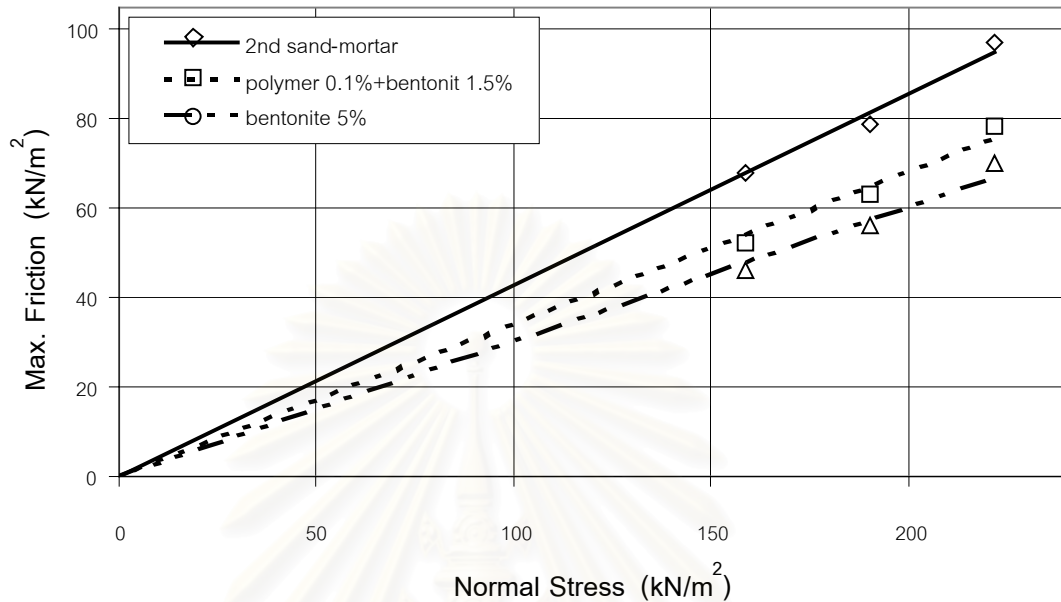
ทรายที่ใช้ในการทดสอบคือทรายกรุงเทพฯชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สอง สารละลายที่ใช้คือสารละลายเบนโทไนท์ 5 % และสารละลายเบนโทไนท์ 1.5 % ผสมกับสารละลายโพลีเมอร์ 0.1 % ทรายที่นำมาทดสอบจะผ่านการไหลของสารละลายเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง นอกจากนี้ยังทำการทดสอบทรายที่ไม่ผ่านการไหลของสารละลายเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้เสาเข็มเจาะระบบแห้ง

ค่าที่นำมาคำนวณคือค่ามุมเสียดทานระหว่างทรายและคอนกรีตของตัวอย่างทรายที่มีปริมาณน้ำในมวลดิน 12 % และมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ระหว่าง 70- 80 % โดยใช้อัตราการเคลื่อนที่ของกล่องดันตัวอย่างขึ้นบน (Upper Shear Box) เท่ากับ 0.2 mm / min

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4-18 และ 4-19 จะเห็นได้ว่า มุมเสียดทานระหว่างทรายและผิวมอร์ตาร์ (δ) ของตัวอย่างทรายที่ไม่ได้ผ่านการไหลของสารละลายมีค่าสูงสุด ตัวอย่างทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1 และ 2 ที่ผ่านการไหลของสารละลายผสมเบนโทไนท์กับโพลีเมอร์มีการลดลงของมุมเสียดทาน (δ) เท่ากับ 19% เมื่อเทียบทรายที่ไม่ผ่านการไหลของสารละลาย และมุม δ ของทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1 และ 2 มีค่าลดลง 27% เมื่อทรายผ่านการไหลของสารละลายเบนโทไนท์ล้วน (ความเข้มข้น 5%) เทียบกับทรายที่ไม่ผ่านการไหลของสารละลายใดๆ



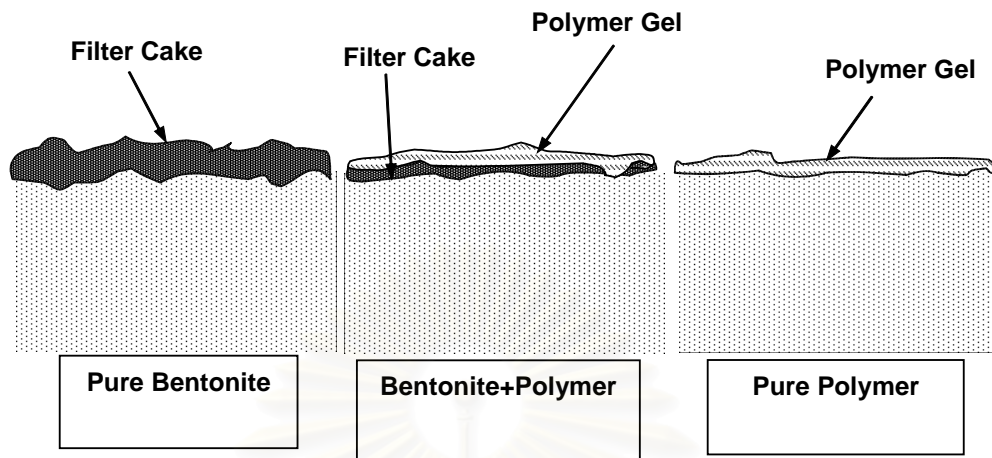
รูปที่ 4-18 การทดสอบแรงเสียดทานของทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 1



รูปที่ 4-19 การทดสอบแรงเสียดทานของทรายกรุงเทพฯชั้นที่ 2

ตัวอย่างทรายที่ผ่านการไหลของสารละลายผสมเบนโทไนท์กับโพลีเมอร์ไม่มีเยื่อที่บุน้ำที่ผิวหน้าของตัวอย่างแต่จะมีโพลีเมอร์เจล (Polymer Gel) รวมกับเบนโทไนท์ซึ่งมีลักษณะลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4-20 และอาจทำให้แรงเสียดทานระหว่าง เม็ดทรายกับผิวมอร์ตาร์มีค่าลดลง แต่ตัวอย่างจะมีลักษณะยื่นหยุ่นได้มากกว่าทรายที่ไม่มีการการไหลผ่านของสารละลาย

สำหรับทรายที่ผ่านการไหลของสารละลายเบนโทไนท์จะมีเยื่อที่บุน้ำซึ่งมีความหนาประมาณ 1 mm. ดังรูปที่ 4-20 ทำให้เม็ดทรายไม่สัมผัสกับผิวมอร์ตาร์โดยตรงเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงจนมีค่าต่ำกว่าการใช้ทรายที่ไม่ผ่านการไหลของสารละลาย และทรายที่ผ่านการไหลของสารละลายผสมเบนโทไนท์กับโพลีเมอร์ ลักษณะผิวหน้าของทรายที่ผ่านการไหลของเบนโทไนท์จะมีความแน่นมากกว่าทรายที่อยู่ลึกลงไป



รูปที่ 4-20 เยื่อที่บวม (Filter Cake) และเจลโพลีเมอร์ (Gel) ที่ผิวหน้าของตัวอย่างทราย

เมื่อเปรียบเทียบมุมเสียดทานระหว่างทรายกับมอร์ตาร์ (δ) กับ มุมต้านทานภายในของทราย (ϕ') จะมีอัตราส่วนดังตารางที่ 4-3 ซึ่งค่ามุม δ นี้เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้น การนำไปใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มจริงมีปัจจัยอื่นดังจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.3 เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย มุม δ ที่ได้นี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในชั้นทราย (β) ในการก่อสร้างเสาเข็มจริง

ตารางที่ 4-3 อัตราส่วนระหว่าง δ/ϕ' ของทรายกรุงเทพฯ ชั้นที่ 1 และ 2 เมื่อไหลผ่านสารละลาย

ชนิดของทราย	ชนิดของสารละลายที่ผ่านทราย	δ , องศา	ϕ' , องศา	δ/ϕ'
ทรายกรุงเทพฯ ชั้นที่ 1	ไม่มีการไหลผ่านของสารละลาย	23.35	33.5	0.70
	โพลีเมอร์ 0.1% และ เบนโทไนท์ 1.5%	18.93	33.5	0.57
	เบนโทไนท์ 5%	17.13	33.5	0.51
ทรายกรุงเทพฯ ชั้นที่ 2	ไม่มีการไหลผ่านของสารละลาย	23.17	33.7	0.69
	โพลีเมอร์ 0.1% และ เบนโทไนท์ 1.5%	18.84	33.7	0.56
	เบนโทไนท์ 5%	16.87	33.7	0.50

4.2 ข้อมูลจากสถานที่ก่อสร้าง

ข้อมูลที่เก็บมาจากสถานที่ก่อสร้างได้แก่ ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้าง, ปริมาณตะกอนที่กั้นหลุม, ปริมาณทรายในสารละลายโพลีเมอร์ที่ไม่ผ่านเครื่องกรองทรายและผลการทดสอบเสาเข็ม

โดยสถานที่ก่อสร้างที่ไปเก็บข้อมูลจะเป็นการก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80-1.80 ม ซึ่งใช้สารละลายผสมระหว่างโพลีเมอร์ 0.05 % กับเบนโทไนท์ 1.25-1.50 % โดยน้ำหนัก เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ ความลึกของเสาเข็มจะลงไปถึงชั้นทรายกรุงเทพฯชั้นที่สองโดยมีความลึกของปลายเสาเข็มอยู่ระหว่าง 40-55 ม

เสาเข็มที่ทดสอบมีการติดตั้งอุปกรณ์วัด 2 ประเภทได้แก่เกจวัดความเครียด (Vibrating Wire Strain Gauge) และเครื่องมือวัดการหดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Rod Extensometer) การทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะกระทำเมื่อกำลังของคอนกรีตมีอายุได้ 28 วันโดยใช้คานอ้างอิงกับเสาเข็มสมอเป็นตัวต้านน้ำหนัก สามารถแยกการวิเคราะห์ผลออกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

4.2.1 ขั้นตอนและรายละเอียดในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ

การใช้สารละลายโพลีเมอร์ทำให้วิธีการก่อสร้างแตกต่างจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์ โดยมีข้อแตกต่างดังนี้

4.2.1.1 ปริมาณตะกอนที่กั้นหลุม

การใช้สารละลายโพลีเมอร์จะทำให้เกิดการตกตะกอนของดินเม็ดละเอียด เพราะว่าเกิดการรวมตัวของเม็ดดิน เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์มีลักษณะเป็นประจุลบ (Anionic) ซึ่งสามารถดึงดูดดินเม็ดละเอียดที่มีประจุตรงกันข้ามให้มาเกาะรวมกันเป็นผลให้ดินเม็ดละเอียดมีน้ำหนักมากขึ้นจนตกตะกอนลงมาได้

นอกจากนี้สารละลายโพลีเมอร์ยังไม่มีกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) เหมือนกับสารละลายเบนโทไนท์ทำให้สารละลายไม่ค้ำเม็ดดินเอาไว้

การตกตะกอนในสารละลายโพลีเมอร์จะดำเนินไปจนระยะเวลาหนึ่ง การตกตะกอนจะเกิดขึ้นน้อยมากจนถึงว่าสิ้นสุดแล้ว อย่างไรก็ตามระยะเวลาในการตกตะกอนและปริมาณตะกอนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น ความหนาของชั้นทราย, ชนิดของทรายและดินเม็ดละเอียด, คุณสมบัติของสารละลาย, ความลึกของเสาเข็ม, วิธีการขุดเจาะเสาเข็ม ฯลฯ การวัดตะกอนสามารถทำได้โดยใช้สายวัดความลึกของหลุมเจาะเทียบกับระยะเวลาในการตกตะกอนดังแสดงในรูปที่ 4-21 และ 4-22



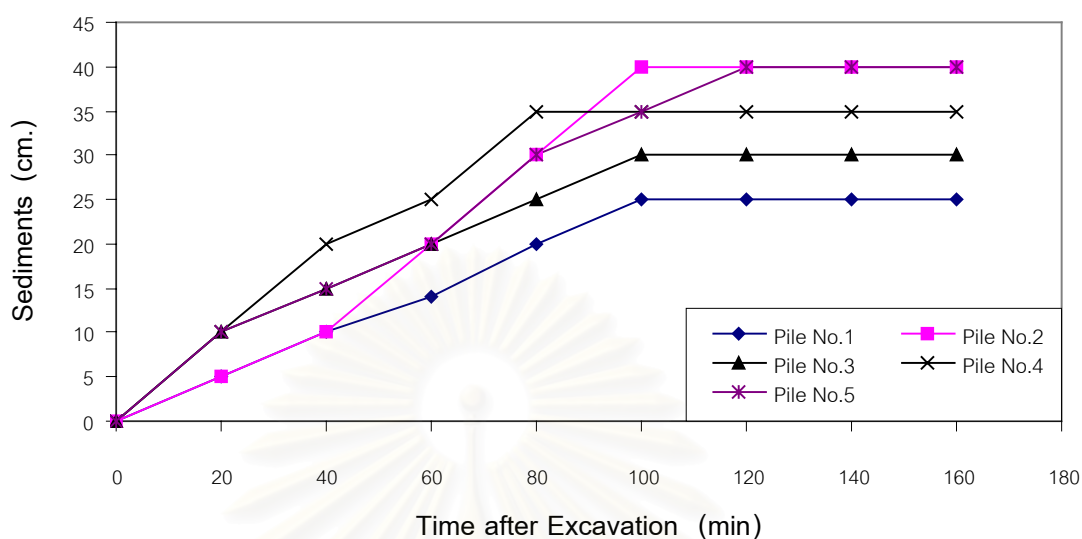
รูปที่ 4-21 สายวัดความลึกของหลุมเจาะ



รูปที่ 4-22 การวัดความลึกของหลุมเจาะเทียบกับเวลาของการตกตะกอน

จากตัวอย่างข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4-23 ที่เก็บมาเป็นข้อมูลของเสาเข็มในบริเวณใกล้เคียงที่ความลึกเดียวกันพบว่า ระยะเวลาการตกตะกอนและปริมาณตะกอนของแต่ละหลุมเจาะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องของหลายปัจจัยดังที่กล่าวข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่การตกตะกอนถือว่าสิ้นสุดจนสามารถเก็บตะกอนได้จะมีค่าประมาณ 100 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-23 การตกตะกอนของทรายในหลุมเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ม
ความลึกประมาณ 45 ม

4.2.1.2 ปริมาณทรายในสารละลายภายหลังการสูบล้างหลุมเจาะ

ขณะที่ทำการเทคอนกรีตใต้น้ำด้วยท่อเท (Tremie) สารละลายในหลุมเจาะจะถูกแทนที่โดยคอนกรีตออกมานอกหลุมเจาะแล้วจึงสูบล้างไปที่ถังพักตะกอนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

ก่อนที่จะนำสารละลายมาใช้งานในแต่ละวัน จำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติการใช้สารละลายเบนโทไนท์ว่า จะมีทรายหรือดินเม็ดละเอียดแขวนลอยอยู่ในสารละลาย ทำให้ต้องใช้เครื่องกรองทราย (Desander) แยกทรายออกมา อย่างไรก็ตามจะมีดินเม็ดละเอียดแขวนลอยอยู่แต่การใช้สารละลายโพลีเมอร์ดินเม็ดละเอียดจะตกตะกอนในก้นหลุม เมื่อตรวจหาปริมาณทรายพบว่ามีในสารละลายผสมระหว่างเบนโทไนท์กับโพลีเมอร์จะมีปริมาณทรายไม่เกิน 0.5 % โดยไม่จำเป็นต้องผ่านเครื่องกรองทราย

ในถังพักตะกอนเมื่อทิ้งไว้หลายวันจะมีดินเม็ดเล็กตกตะกอน แต่ปริมาณตะกอนจะมีไม่มากนัก เนื่องจากการตกตะกอนส่วนใหญ่เกิดขึ้นในหลุมเจาะแล้ว

4.2.2 ผลการทดสอบเสาเข็ม

เสาเข็มทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดจำนวนทั้งสิ้น 8 ต้น ดังแสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 จำนวนเสาเข็มทดสอบที่ใช้สารละลายโพลิเมอร์และมีการติดตั้งอุปกรณ์วัด

สถานที่ทำการทดสอบ	เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (ม)	ความลึกปลายเสาเข็ม (ม)
โครงการ Hope Well-1 (C21)	1.50	49.0
โครงการ Hope Well-2 (C22)	1.50	49.0
โครงการ MRTA รัชดา-ลาดพร้าว	1.20	50.0
สะพานพระราม 8 ฝั่งกทม.	0.80	47.5
สะพานพระราม 8 ฝั่งธนบุรี	0.80	49.5
สะพานวัดนครอินทร์-1*	1.50	49.0
สะพานวัดนครอินทร์-2*	1.50	56.5
สะพานวัดนครอินทร์-3*	1.50	49.0

* ทำการฉีดน้ำปูนที่ก้นหลุมเมื่อคอนกรีตมีอายุได้ 28 วัน

การทดสอบจะใช้น้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน โดยมีคานอ้างอิงและเสาเข็มสมอ 4 ต้น เป็นตัวค้ำน้ำหนัก

เสาเข็มทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ มีการติดตั้งเครื่องมือวัด 2 ประเภทคือ

- เกจวัดความเครียด (VWSG) ส่วนใหญ่จะติดตั้งที่ตำแหน่งชั้นดินที่มีการเปลี่ยนแปลง
- เครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆแบบก้าน (Rod Extensometer) ติดตั้งเพื่อหาแรงรวมของเสาเข็มและเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของ VWSG อย่างคร่าวๆ

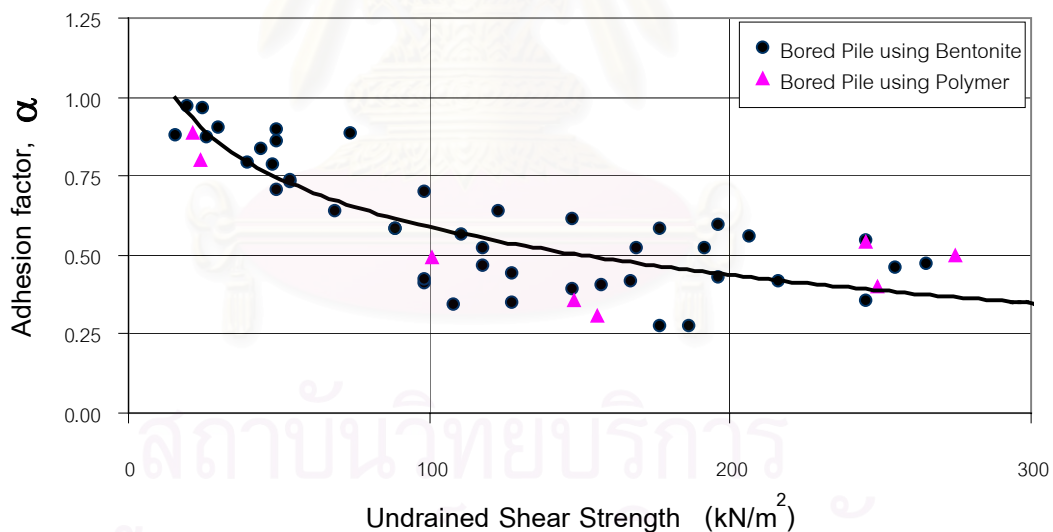
การวิเคราะห์น้ำหนักที่ถ่ายลงไปที่ชั้นดินในแต่ละความลึกจะนำข้อมูลของ VWSG เป็นหลักเมื่อวิเคราะห์น้ำหนักที่ถ่ายจากเสาเข็มสู่ชั้นดินแต่ละชั้นจะใช้วิธีวิเคราะห์กลับ (Back Analysis) เพื่อหา

พารามิเตอร์ของดินแต่ละชั้น ได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α), ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินทราย (β) และ N_q^* ในชั้นทราย ซึ่งแยกเป็นกรณีดังนี้

4.2.2.1 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α)

ค่า α ได้จากการแปลงผลแรงเสียดทานที่ได้จากเสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด VWSG ที่เกิดขึ้นในดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยหาความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของ α กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u)

เสาเข็มที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้จะใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ และเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ที่ได้จากข้อมูลเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ รูปที่ 4-24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน (S_u) ของดินเหนียวกรุงเทพฯ กับค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานของดินเหนียว (α)



รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน (S_u) ของดินเหนียวกรุงเทพฯ กับค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานของดินเหนียว (α)

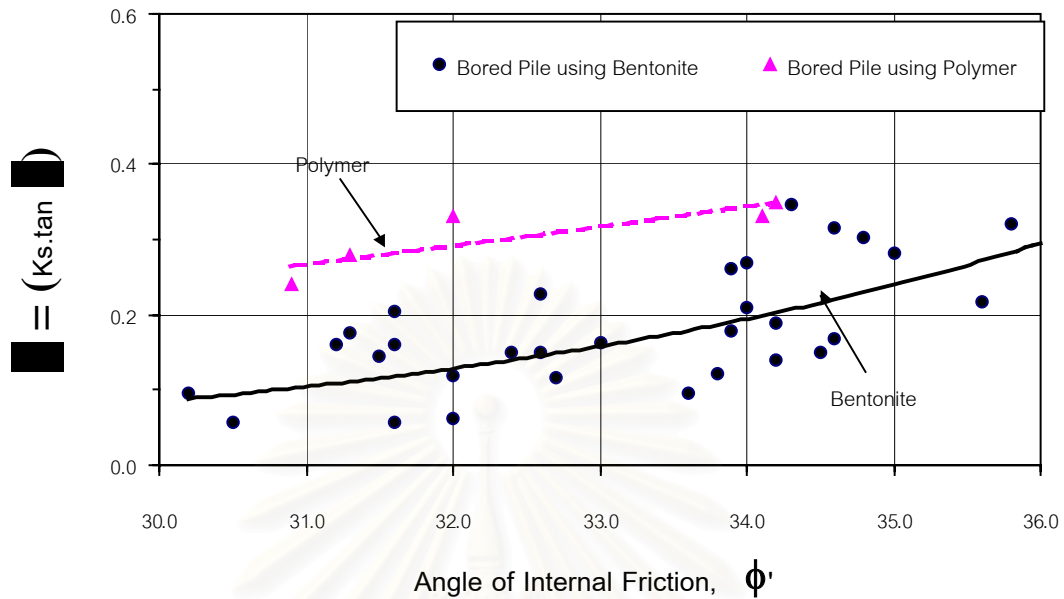
จะเห็นได้ว่า ค่า α ที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์จะอยู่ในช่วงเดียวกับเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ เนื่องจากสารละลายเบนโทไนท์จะไม่เกิดเยื่อหุ้มที่บวม (Filter Cake)

ขึ้นในชั้นดินเหนียวเพราะว่าสารละลายเบนโทไนท์ไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในชั้นดินเหนียว ทำให้ไม่เกิดการสะสมตัวของอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) จากสารละลายเบนโทไนท์ สำหรับสารละลายโพลีเมอร์จะไม่มีพฤติกรรมการก่อดตัวของเยื่อที่บุน้ำเกิดขึ้น ทำให้แรงเสียดทานของเสาเข็ม 2 ประเภทไม่แตกต่างกัน

4.2.2.2 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β)

ค่าพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการประมาณค่าแรงเสียดทาน ในชั้นทรายของเสาเข็มคือค่า β เสนอโดย Burland (1973) ซึ่งแยกส่วนประกอบออกเป็น $K_s \cdot (\tan \delta)$ แต่ในการวิเคราะห์หาค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มจะได้รับความสัมพันธ์ออกมาในรูปของค่า β กับมุมต้านทานภายในของทราย (ϕ') โดยที่แรงเสียดทานในชั้นทรายเท่ากับ $\beta \cdot \sigma'_{vi}$ สำหรับชั้นทรายกรุงเทพฯจะต้องคิดผลจากการลดลงของแรงดันน้ำใต้ดิน (Piezometric Drawdown) ในการคำนวณ σ'_{vi} ซึ่งค่า σ'_{vi} หรือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งแบบคิดผลจากการลดของน้ำใต้ดิน (Drawdown Effective Overburden Stress) สามารถคำนวณได้ข้อมูลดินของเสาเข็มทดสอบ การวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาเสาเข็มที่ทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ก้นหลุม (สะพานวัดนครินทร์ 1-3) เนื่องจากมีปัจจัยการอัดฉีดน้ำปูนเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งต่างจากเสาเข็มต้นอื่นที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้

ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4-25 แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์มีค่า β สูงกว่าค่าที่ได้จากเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพ เนื่องจากการใช้สารละลายโพลีเมอร์ไม่ทำให้เกิดเยื่อที่บุน้ำ (Filter Cake) ที่มีความหนาในชั้นทราย ต่างจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์ล้วนซึ่งเยื่อที่บุน้ำที่มีความหนาจะลดแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับเม็ดทรายซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา และในกรณีที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ผสมกับสารละลายเบนโทไนท์จะเกิดการประสานของโครงสร้างโพลีเมอร์กับเม็ดดินดังได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 2 (รูปที่ 2-26)



รูปที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมต้านทานภายใน (ϕ') ของชั้นทรายกรุงเทพฯ กับ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานของทราย (β)

อย่างไรก็ตามค่า β ที่ได้จากการวิเคราะห์หักกลับจากชั้นทรายกรุงเทพฯ ชั้นที่สองมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ ทั้งนี้เนื่องจากแรงเสียดทานในชั้นทรายกรุงเทพฯ ชั้นที่สองยังพัฒนาไม่ถึงค่าสูงสุดเพราะว่าน้ำหนักทดสอบสูงสุดไม่สามารถเกิดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้ ทำให้ค่า β ที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้มีค่าต่ำกว่าค่า β ที่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ในขณะที่ค่า β ของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ในชั้นทรายกรุงเทพฯ ชั้นที่หนึ่งมีค่าสูงกว่าเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์อย่างชัดเจน เนื่องจากแรงเสียดทานสามารถพัฒนาได้จนถึงค่าสูงสุดหรือใกล้เคียงค่าสูงสุดเพราะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มจะทำให้ดินชั้นบนรับน้ำหนักสูงสุดก่อนถ่ายสู่ดินชั้นล่าง

4.2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นทราย (N_q^*)

เสาเข็มเจาะที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้มีปลายเสาเข็มอยู่ที่ชั้นทรายกรุงเทพฯ ชั้นที่สองและติดตั้งเครื่องมือวัด VSWG ที่บริเวณปลายเสาเข็ม ตามปกติค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานสูงสุดของเสาเข็มจะเกิดขึ้นหลังจากกำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มพัฒนาจนถึงค่าสูงสุดก่อน และสำหรับเสาเข็มที่

ทดสอบไม่ถึงจุดวิกฤติทำให้กำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มไม่สามารถพัฒนาถึงขั้นสูงสุดได้ดังนั้น ค่า N_q^* จะต้องหาใช้ค่าที่ทดสอบสูงสุดซึ่งอาจมีค่าต่ำเกินไป

ค่า N_q^* จะเสนอในรูปของความสัมพันธ์ของค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (ϕ') กับค่า N_q^* โดยค่า N_q^* จะได้จากการวิเคราะห์หักลับจากสมการ 3.3

$$N_q^* = q_E / \sigma'_{ve} \quad (3.3)$$

ซึ่งค่า σ'_{ve} เป็นค่าเฉลี่ยของแรงดันประสิทธิผลในแนวตั้งที่ปลายเสาเข็มโดยในชั้นทราย กรุงเทพฯ ฯ จะต้องคิดผลจากการลดลงของแรงดันน้ำใต้ดิน (Piezometric Drawdown) ด้วย

ค่า N_q^* ที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพซึ่งมีทั้งประเภทที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มและประเภทที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน

เมื่อเปรียบเทียบกันจะพบว่าค่า N_q^* ที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยครั้งนี้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาแต่เนื่องจากเสาเข็มทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดสอบจนถึงจุดวิกฤติและน้ำหนักทดสอบสูงสุดไม่ถึงกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย ทำให้ค่า N_q^* มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปได้ว่า N_q^* ของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์มีค่ามากหรือน้อยกว่าเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์

การใช้สารละลายโพลีเมอร์มีผลให้วิธีการเก็บตะกอนแตกต่างจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์ เพราะเมื่อดินจะตกตะกอนในสารละลายโพลีเมอร์ ถ้าทิ้งให้ระยะเวลาในการตกตะกอนนานพอแล้วใช้ถังเก็บตะกอนตักขึ้นมาจะไม่ทำให้เกิดปัญหาการสะสมของตะกอนก้นหลุม (Soft Base) นอกจากนี้ส่วนผสมของสารละลายเบนโทไนท์ยังสามารถทำให้ผิวหน้าของหลุมเจาะมีความแน่นขึ้นมาได้ อีกด้วยจากการที่โครงสร้างของโพลีเมอร์ยึดเม็ดทรายเข้าด้วยกันและเบนโทไนท์จำนวนเล็กน้อยจะช่วยให้สารละลายถ่ายแรงไปที่ชั้นทรายได้

สำหรับสารละลายเบนโทไนท์นั้นเมื่อดินจะแขวนลอยอยู่ในสารละลายซึ่งขนาดและปริมาณที่สามารถแขวนลอยอยู่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสารละลายและปริมาณเม็ดดินที่มีอยู่ในสารละลาย การไล่ตะกอนจากสารละลายเบนโทไนท์จะใช้วิธีเป่าลม (Air lift) และสูบออก ในกรณีที่มีเม็ดดินมีน้ำหนักมากหรือมีปริมาณมากจะมีเม็ดดินจำนวนหนึ่งตกตะกอนลงไปที่ก้นหลุมทำให้การใช้เครื่องเป่าลม (Air lift) ไม่สามารถไล่เม็ดดินขึ้นมาได้ทั้งหมดและอาจมีผลให้เกิดปัญหาตะกอนก้นหลุม (Soft Base) ได้ ด้วยสาเหตุนี้เสาเข็มที่ใช้เบนโทไนท์จึงน่าจะมีค่า N_q^* ที่ต่ำกว่าเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพ แต่เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ไม่ใช่ค่า N_q^* ที่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจึงยังไม่สามารถสรุปถึงค่าที่แน่นอนได้

4.2.3 ประสิทธิภาพของการใช้สารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ

การใช้สารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะเริ่มเป็นที่แพร่หลายมากขึ้นในประเทศไทย เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาเรื่องประสิทธิภาพในการทำงานมากนัก หัวข้อต่อไปนี้จะบอกถึงประสิทธิภาพในการทำงานเมื่อใช้สารละลายโพลีเมอร์ โดยเปรียบเทียบกับการทำงานเมื่อใช้สารละลายเบนโทไนท์

4.2.3.1 เสถียรภาพของหลุมเจาะ

จากการเก็บข้อมูลของหลุมเจาะจากเครื่องตรวจสอบสภาพหลุมเจาะ (Borehole Monitor) ดังรูปที่ 4-26 และ 4-27 พบว่า การใช้สารละลายโพลีเมอร์สามารถทำให้หลุมเจาะมีเสถียรภาพอยู่ได้โดยไม่เกิดการพังทลายของหลุมเจาะแต่ประการใด นอกจากนี้สารละลายโพลีเมอร์ไม่ก่อให้เกิดเยื่อบูทึบ (Filter Cake) ทำให้การแปลผลของเครื่องตรวจสอบสภาพหลุมเจาะมีความคลาดเคลื่อนลดลงเนื่องจากผนังของหลุมเจาะจะไม่มีเยื่อบูทึบน้ำซึ่งจะเพิ่มความหนาให้ผนังของหลุมเจาะได้



รูปที่ 4-26 การวัดขนาดของหลุมเจาะโดย
เครื่องตรวจสอบสภาพหลุมเจาะ



รูปที่ 4-27 ข้อมูลความหนาของผนังหลุมเจาะ

4.2.3.2 ปริมาณสารละลายที่สูญเสียไป

จากการเก็บข้อมูลในหลายๆสถานที่ก่อสร้างที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์และสารละลายโพลีเมอร์ พบว่าปริมาณสารละลายที่สูญเสียหลังจากจบโครงการมีค่าใกล้เคียงกัน คือมีค่าการสูญเสียประมาณ 40% ของปริมาณสารละลายเมื่อเริ่มต้นโครงการ

แม้ว่าการใช้สารละลายโพลีเมอร์จะทำให้เกิดการสูญเสียในชั้นทรายมากกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์ เนื่องจากจะใช้เวลาในการเกิดเยื่อที่บั้นน้ำเริ่มต้น (T_c) สูงกว่าและเยื่อที่บั้นน้ำ (Filter Cake) ที่เกิดขึ้นมีความหนาน้อยกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์ แต่สารละลายโพลีเมอร์จะไม่แขวนลอยเม็ดทรายเอาไว้ ทำให้การปรับปรุงคุณสมบัติจะต้องการเพียงผสมสารละลายโพลีเมอร์เพิ่มเข้าไปเท่านั้น ซึ่งจะมีความแตกต่างกับการใช้สารละลายเบนโทไนท์ คือสารละลายเบนโทไนท์จะทำให้ทรายและดินเม็ดละเอียดแขวนลอยเป็นผลให้ความหนาแน่นของสารละลายเพิ่มขึ้น ดินเม็ดละเอียดที่มีขนาดเล็กสามารถลอดตะแกรงในเครื่องกรองทรายจะสะสมอยู่ในสารละลายเพิ่มขึ้นจนต้องทิ้งสารละลายบางส่วนไป เนื่องจากไม่สามารถทำการปรับปรุงคุณสมบัติได้แล้วนอกจากนี้สารละลายเบนโทไนท์ยังมีความหนืดสูง เมื่อใช้ถังชุด (Drilling Bucket) ตักขึ้นมาแล้วจะรวมตัวอยู่กับดินในถังชุดไม่ไหลกลับออกมา ซึ่งการใช้สารละลายโพลีเมอร์จะไหลออกจากถังชุดได้สะดวกกว่า เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว พบว่าปริมาณการสูญเสียของสารละลายทั้งสองประเภทมีค่าใกล้เคียงกัน

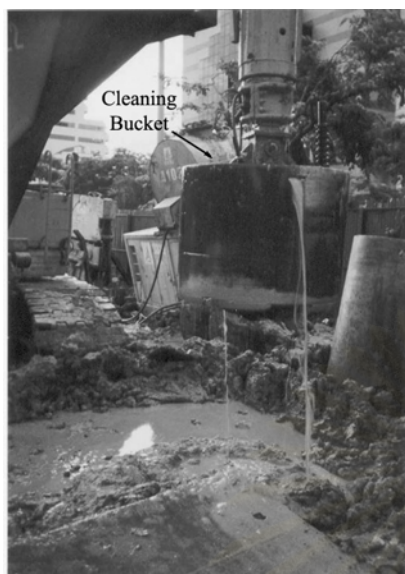
4.2.3.3 อุปกรณ์และระยะเวลาในการก่อสร้างเสาเข็มแต่ละต้น

การใช้สารละลายทั้งสองประเภทมีอุปกรณ์ที่ใช้แตกต่างกันในบางขั้นตอน คือในขั้นตอนการผสม, การกำจัดเม็ดดินออกจากหลุมเจาะ และการปรับปรุงคุณสมบัติก่อนจะนำมาใช้ใหม่

ในขั้นตอนการผสมนั้น การผสมเบนโทไนท์เมื่อผสมเสร็จแล้วจำเป็นที่จะต้องสุบไปที่ถังพักก่อน เพื่อให้เบนโทไนท์ดูดน้ำเต็มที่ (Fully Hydrated) เป็นเวลา 1 วันก่อนจะนำไปใช้งานในหลุมเจาะได้ สำหรับสารละลายโพลีเมอร์นั้นหลังจากผสมเสร็จแล้วก็สามารถสุบขึ้นไปรวมกับสารละลายเก่าได้ทันที เพียงแต่ก่อนการใช้งานควรรอเวลาประมาณ 30 นาทีเพื่อให้โพลีเมอร์ละลายน้ำเต็มที่เสียก่อน

การกำจัดเม็ดดินออกจากหลุมเจาะในการใช้สารละลายเบนโทไนท์ จะต้องใช้เครื่องเป่าลม (Air Lift) เป่าไล่ตะกอนจากกันหลุม และใช้ปั๊มดูดสารละลายและตะกอนไปไว้ที่ถังพักสารละลายซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงสำหรับเสาเข็มที่มีปลายลึกถึงทรายชั้นที่สอง ในกรณีของการใช้สารละลายโพลีเมอร์หลังจากชุดได้ถึงระดับที่ต้องการแล้ว จะทิ้งระยะเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้การตกตะกอนเกิดขึ้นสมบูรณ์ จึงใช้ถังเก็บตะกอน (Cleaning Bucket) ดังแสดงในรูปที่ 4-28 ตักตะกอนขึ้นมาจากกันหลุม

การปรับปรุงคุณสมบัติของสารละลายนั้น สารละลายเบนโทไนท์ส่วนที่อยู่ในถังพักสารละลาย จะมีเม็ดดินแขวนลอยอยู่ จำเป็นที่จะต้องให้สารละลายผ่านเครื่องกรองทราย (Desander) ดังแสดงในรูปที่ 4-29 ก่อนที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของสารละลายเพื่อนำไปใช้งานต่อไป สำหรับสารละลายโพลีเมอร์ที่สุบขึ้นมาจากหลุมเจาะนั้นจะมีดินเม็ดละเอียด (เล็กกว่าตะแกรง #200) แขวนลอยในปริมาณเล็กน้อย จำเป็นต้องปล่อยให้เม็ดดินตกตะกอนประมาณ 2 วันก่อนจะนำมาปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อใช้งานต่อไป อย่างไรก็ตามสารละลายโพลีเมอร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติยังสามารถใช้งานได้ดีในการนำมาใช้ใหม่ในครั้งถัดๆไป สำหรับสารละลายเบนโทไนท์เมื่อนำมาใช้งานครั้งถัดๆไปคุณภาพของสารละลายจะแยลงเรื่อยๆ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดสารละลายบางส่วนทิ้งไป



รูปที่ 4-28 ถังเก็บตะกอน (Cleaning Bucket)



รูปที่ 4-29 เครื่องกรองทราย (Desander)

4.2.3.4 พลังงานทางตรงที่ใช้ในการก่อสร้าง

เนื่องจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์จะต้องมีอุปกรณ์ในการก่อสร้างเข้ามาเกี่ยวข้องมากกว่าการใช้สารละลายโพลีเมอร์ พลังงานที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มหนึ่งต้นของการใช้สารละลายเบนโทไนท์จึงมากกว่าการใช้น้ำสารละลายโพลีเมอร์ด้วย

4.2.3.5 ราคาของสารละลายในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ

จากการเก็บข้อมูลในสถานที่ก่อสร้างพบว่าสารละลายโพลีเมอร์มีราคาของสารละลายต่อปริมาตรสูงกว่าสารละลายเบนโทไนท์และมีราคาของสารละลายในการก่อสร้างเสาเข็มหนึ่งต้นสูงกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์ประมาณ 29% (พิจารณาจากเสาเข็มที่มีขนาดและความลึกเท่ากัน) ตารางที่ 4-5 แสดงการเปรียบเทียบราคาของการใช้สารละลายทั้ง 2 ชนิดเมื่อปี พ.ศ. 2544 โดยที่ราคาของโพลีเมอร์ผงเท่ากับ 300 บาทต่อกิโลกรัม และเบนโทไนท์ผงมีราคาเท่ากับ 8 บาทต่อกิโลกรัม การใช้งานของโพลีเมอร์ในงานเสาเข็มเจาะโดยทั่วไปจะผสมโพลีเมอร์ผง 0.5 kg กับเบนโทไนท์ผง 15 kg ในน้ำหนึ่งลูกบาศก์เมตร สำหรับสารละลายเบนโทไนท์จะผสมเบนโทไนท์ผง 50 kg กับน้ำหนึ่งลูกบาศก์เมตร ราคาของน้ำหนึ่งลูกบาศก์เมตรที่พิจารณาเท่ากับ 16 บาท การใช้สารละลายโพลีเมอร์จะมีการสูญเสียสารละลายในชั้นดินมากกว่าสารละลายเบนโทไนท์ แต่เนื่องจากคุณภาพของ

สารละลายเบนโทไนท์จะลดลงเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ทำให้จำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่ของสารละลายเบนโทไนท์มีน้อยกว่าของการใช้งานสารละลายโพลีเมอร์ นอกจากนี้การใช้สารละลายเบนโทไนท์ต้องมีค่าใช้จ่ายของการใช้งานและบำรุงรักษาเครื่องกรองทราย (Desander) และเครื่องเป่าลม (Air Lift Unit) อีกด้วย

ตารางที่ 4-5 ราคาในการก่อสร้างของสารละลายโพลีเมอร์และสารละลายเบนโทไนท์

ชนิดของสารละลาย	สารละลายโพลีเมอร์	สารละลายเบนโทไนท์
ส่วนผสมของสารละลาย (% โดยน้ำหนัก)	Polymer (JF Mud P) 0.05% Bentonite (McGel) 1.5%	Bentonite (McGel) 5%
ราคาของสารละลาย ต่อปริมาตร 1 m ³ (บาท)	286	416
การสูญเสียในชั้นดิน	40%	25%
จำนวนครั้งที่นำกลับมาใช้ใหม่	10	6
ปริมาตรของเสาเข็ม (ขนาด 1.5 m ลึก 45 m)	80 m ³	80 m ³
ราคาของขบวนการ (บาทต่อตัน)		
- เครื่องกรองทราย	-	1700
- เครื่องเป่าลม	-	600
ราคาของสารละลายต่อการ ก่อสร้างเสาเข็ม 1 ต้น (บาท)	10525	14780

4.3 ความสอดคล้องของผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและข้อมูลจากสถานที่ก่อสร้าง

การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะจำลองสภาพคุณสมบัติต่างๆ ให้เหมือนสภาพในสถานที่ก่อสร้างให้มากที่สุด แต่เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องบางปัจจัยในห้องปฏิบัติการที่แตกต่างออกไปจากสภาพในสนาม หัวข้อต่อไปนี้จะแสดงถึงปัจจัยที่มีความแตกต่างกันเพื่อสามารถนำไปเป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยในอนาคต ปัจจัยต่างๆสามารถแยกพิจารณาออกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

4.3.1 ลักษณะและคุณสมบัติของทรายตัวอย่าง

ทรายที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการได้จากการเก็บตัวอย่างจากการเจาะเสาเข็มโดยมีสารละลายโพลิเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพซึ่งถือว่าเป็นตัวอย่างที่ถูกรบกวนโดยสมบูรณ์ (Disturbed Sample) การจำลองสภาพในห้องปฏิบัติการจึงไม่สามารถจำลองคุณสมบัติบางประการให้เหมือนสภาพในธรรมชาติ เนื่องจากสภาพทรายในธรรมชาติมีส่วนประกอบต่าง ๆ ไม่คงที่ คุณสมบัติต่าง ๆ ใน แต่ละบริเวณหรือความลึกไม่เท่ากัน การเตรียมตัวอย่างจะเลือกค่าเฉลี่ยที่ได้จากการหาคุณสมบัติของดินจากห้องปฏิบัติการและจากการเจาะสำรวจดินมาจำลองสภาพ ดังนั้นอาจทำให้มีสภาพแตกต่างจากสภาพในธรรมชาติออกไป

4.3.2 คุณสมบัติของสารละลาย

ในสถานที่ก่อสร้างการผสมสารละลายจะใช้ถังผสม (Recirculation Pump) ดังแสดงในรูปที่ 4-30 เป็นเครื่องผสมโดยผสมเบนโทไนท์ลงไปก่อนเมื่อใช้เวลาผสมผ่านไปประมาณ 15 นาที จึงเติมผงโพลิเมอร์ลงไปจากนั้นจึงผสมสารทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันดังรูปที่ 4-31 ก่อนที่จะนำสารละลายลงสู่หลุมเจาะจะต้องทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีเพื่อให้โพลิเมอร์ละลายและเบนโทไนท์ดูน้ำเต็มที เมื่อทำการเทคอนกรีตจะสูบลำสารละลายไปเก็บที่ถังพักตะกอนเพื่อให้เม็ดดินขนาดเล็กมากที่ไม่ตกตะกอนในหลุมเจาะ ได้มีการตกตะกอนในถังพักตะกอนก่อนจะสูบไปที่ถังเก็บสารละลายเพื่อนำไปใช้ในวันต่อไป



รูปที่ 4-30 ถังผสม (Recirculation Pump) ใช้ผสมสารละลายรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ



รูปที่ 4-31 การผสมสารละลายรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ

การเตรียมสารละลายในห้องปฏิบัติการจะใช้เครื่องปั่นของเหลวไฟฟ้าขนาด 1000 cm^3 ดังแสดงในรูปที่ 4-32 เป็นเครื่องมือผสมสารละลายโดยการผสมจะผสมผงเบนโทไนท์ก่อน เมื่อผสมเสร็จแล้วจะแยกสารละลายเบนโทไนท์ออกมา จากนั้นจึงผสมผงโพลีเมอร์กับน้ำเปล่าแล้วจึงผสมสารละลายทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน เมื่อสารละลาย 2 ชนิดผสมกันจะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4-33 ก่อนทำการทดสอบจะปล่อยให้สารละลายโพลีเมอร์ละลายทั้งหมดและใช้สารละลายเบนโทไนท์ดู่น้ำเต็มที หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นจะทำการกำจัดสารละลายเก่าโดยไม่นำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นคุณสมบัติสารละลายที่มีสัดส่วนและความเข้มข้นเท่ากันของทุกตัวอย่างจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันมาก ต่างจากคุณสมบัติของสารละลายในสนามคือ ไม่มีดินเม็ดละเอียดมากแขวนลอยอยู่ในสารละลาย, สารละลายที่ใช้ทดสอบมีการใช้สัดส่วนและปริมาณของส่วนผสมที่แน่นอนมากและควบคุมคุณสมบัติได้เนื่องจากการเตรียมสารละลายทุกครั้งก่อนการทดสอบ



รูปที่ 4-32 เครื่องปั่นไฟฟ้าขนาด 1000 cm^3



รูปที่ 4-33 สารละลายผสมระหว่างเบนโทไนท์กับโพลีเมอร์

4.3.3 ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในชั้นทราย (β) ในห้องปฏิบัติการและในสถานที่ก่อสร้าง

ค่า β ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการกับค่า β ที่ได้จากการวิเคราะห์หักลับจากการทดสอบเสาเข็มจะมีค่าแตกต่างกันโดยที่ค่า β จะมีค่าประมาณ 0.22 เมื่อใช้สารละลายโพลี

เมอร์และมีค่าประมาณ 0.15 เมื่อใช้สารละลายเบนโทไนท์ สำหรับค่า β ที่ได้จากการวิเคราะห์หักลับจากการทดสอบเสาเข็มจะมีค่าประมาณ 0.32 ในการใช้สารละลายโพลีเมอร์และมีค่าประมาณ 0.15 สำหรับการใส่สารละลายเบนโทไนท์ เมื่อพิจารณาชั้นทรายที่มีค่ามุม ϕ' ประมาณ 33° ค่า β ที่ได้จากห้องปฏิบัติการและจากการทดสอบเสาเข็มจะมีความแตกต่างกันเมื่อใช้สารละลายโพลีเมอร์ เนื่องจากความแตกต่างในปัจจัยต่างๆในการคำนวณค่า β ระหว่างวิธีทั้งสอง การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในชั้นทราย (β) ในห้องปฏิบัติการและในสถานที่ก่อสร้างจะมีความแตกต่างกันดังนี้

4.3.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในชั้นทราย (β) ในห้องปฏิบัติการ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของทรายในห้องปฏิบัติการมีหลักการในการคำนวณดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต้องคำนวณจาก $\beta = K_s \cdot \tan \delta$ โดยที่ค่า K_s ได้จากการคำนวณ และค่า $\tan \delta$ ได้จากการทดสอบแรงเสียดทานของตัวอย่างโดยจำลองสภาพของตัวอย่างให้ใกล้เคียงกับสภาพในธรรมชาติ การคำนวณ K_s สำหรับกรณีเสาเข็มเจาะจะใช้ค่า K_s/K_0 ประมาณ 0.70 – 1.00 อย่างไรก็ตาม การเลือกค่า K_s มาคำนวณอาจไม่สอดคล้องกับสภาพในสถานที่ก่อสร้าง ทำให้ค่า β ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไป
- การทดสอบแรงเสียดทานจะกระทำทันทีหลังจากทรายผ่านการไหลของสารละลายทำให้โพลีเมอร์ยังไม่เกิดการสลายตัว ผิวหน้าทรายยังมีความชื้นและทรายยังมีลักษณะยึดหยุ่นทำให้แรงเสียดทานระหว่างทรายกับผิวมอร์ทาร์มีค่าลดลง
- การทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถควบคุมอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีตผ่านทรายให้ทุกตัวอย่างมีอัตราการเคลื่อนตัวเท่ากันได้
- การหาค่ามุมต้านทานภายในของทราย (ϕ') ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear) โดยจำลองตัวอย่างให้มีปริมาณความชื้นในมวลดินและความหนาแน่นสัมพัทธ์ให้ใกล้เคียงกับสภาพในธรรมชาติ

4.3.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในชั้นทราย (β) จากการทดสอบเสาเข็ม

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของทรายจากการทดสอบเสาเข็มมีหลักการในการคำนวณดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหาได้จากการวิเคราะห์หักลับของสมการ $f_{si} = \beta \cdot \sigma'_{vi}$ จากผลการทดสอบเสาเข็มที่ติดตั้งเครื่องมือวัดในชั้นทราย โดยที่ค่า σ'_{vi} ได้จากการคำนวณซึ่งค่าบางค่าจะได้จากการประมาณค่าเช่นหน่วยน้ำหนักรวมของดิน (γ), ความดันของน้ำใต้ดินของชั้นดินกรุงเทพฯ ซึ่งได้จากความสัมพันธ์แบบสูตรสำเร็จ (Empirical)
- ค่าแรงเสียดทานที่อ่านได้จากเกจวัดความเครียด (VWSG) จะติดตั้งที่ชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลง ในบางครั้งการติดตั้ง VWSG อาจทำให้ค่าแรงเสียดทานที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อนซึ่งแบ่งเป็นกรณีได้ดังนี้
 - ตำแหน่งที่ติดตั้ง VWSG ไม่ได้อยู่ที่ชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลงหรือติดตั้ง VWSG ครอบคลุมดินสองชั้นคือชั้นดินเหนียวและชั้นดินทราย
 - จำนวน VWSG ในแต่ละชั้นมีน้อยเกินไปมีบางกรณีที่ VWSG ทั้งชั้นเกิดการชำรุดทำให้มีผลต่อการวิเคราะห์แรงของ VWSG ในชั้นข้างเคียงด้วย เนื่องจากจะทำให้ VWSG ที่ชั้นข้างเคียงติดตั้งครอบคลุมชั้นดินสองชั้นหรือมากกว่า
- การทดสอบเสาเข็มในแต่ละสถานที่ก่อสร้างจะใช้อัตราการเพิ่มน้ำหนัก, น้ำหนักทดสอบสูงสุด, จำนวนรอบในการทดสอบและข้อกำหนดในการทดสอบต่างกันออกไป ซึ่งจะทำให้อัตราการเคลื่อนตัวของเสาเข็มผ่านชั้นทรายของเสาเข็มแต่ละสถานที่ทดสอบมีค่าไม่เท่ากัน
- เมื่อคอนกรีตของเสาเข็มทดสอบมีอายุเท่ากับ 28 วันจึงทำการทดสอบเสาเข็มทำให้โครงสร้างโพลีเมอร์บางส่วน เกิดการสลายตัว ทำให้ผิวทรายมีความลื่นน้อยลงและลักษณะของทรายที่มีความยึดหยุ่นหายไป

- ค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (ϕ') ในสถานที่ก่อสร้างได้จากความสัมพันธ์แบบ สูตรสำเร็จ (Empirical) ที่เสนอโดย Peck, Hanson & Thornburn (1974) โดยที่ ความสัมพันธ์จะอยู่ในรูปของค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐานที่ ทำการปรับแก้แล้ว (Corrected SPT-N Value) กับ มุมต้านทานภายใน (ϕ')

4.3.4 การเกิดเยื่อหุ้มน้ำ (Filter Cake) ของตัวอย่างในห้องปฏิบัติการและในผนังของ เสาเข็มในหลุมเจาะ

การเกิดเยื่อหุ้มน้ำของกรณีในห้องปฏิบัติการและในหลุมเจาะจะมีปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างในด้านความหนาและความแข็งของเยื่อหุ้มน้ำซึ่งพิจารณาจากตัวอย่างในห้องปฏิบัติการซึ่งใช้ สารละลายเบนโทไนท์ที่มีความเข้มข้น 5 % และสถานที่ก่อสร้างที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสาร รักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ แต่ละกรณีจะมีปัจจัยการเกิดเยื่อหุ้มน้ำต่างกันดังนี้

4.3.4.1 การเกิดเยื่อหุ้มน้ำ (Filter Cake) ในห้องปฏิบัติการ

แบบจำลองการเกิดเยื่อหุ้มน้ำมีปัจจัยต่างๆดังนี้

- ความดันที่อัดให้สารละลายผ่านเข้าไปในชั้นทรายจะเป็นค่าคงที่คือ 200 kN/m^2 ตลอดเวลาสำหรับทุกตัวอย่าง
- สารละลายไม่มีดินเม็ดละเอียดแขวนลอยอยู่เยื่อหุ้มน้ำที่เกิดขึ้นจะมีแต่อนุภาคดิน เหนียวจากเบนโทไนท์ (Clay Particle) เพียงอย่างเดียวซึ่งมีความแข็งไม่มากนัก
- เวลาในการเกิดเยื่อหุ้มน้ำสำหรับตัวอย่างในห้องปฏิบัติการจะเท่ากับ 60 นาที สำหรับทุกตัวอย่าง
- ผิวหน้าของทรายจะมีลักษณะเรียบ เนื่องจากการใช้เครื่องมือปรับผิวหน้าขณะเตรียม ตัวอย่าง

4.3.4.2 การเกิดเยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake) ในหลุมเจาะ

ในหลุมเจาะการเกิดเยื่อที่บนน้ำมีปัจจัยต่างๆดังนี้

- ความดันที่ทำให้สารละลายผ่านเข้าไปในผนังของหลุมเจาะจะไม่เป็นค่าคงที่แต่จะมีค่าใกล้เคียง 200 kN/m^2 โดยมีปัจจัยที่ทำให้ความแตกต่างของความดันไม่คงที่คือ
 - ระดับของสารละลายในหลุมเจาะ ถ้าระดับสูงจะทำให้ความดันของสารละลายในหลุมเจาะมีค่าสูงตามไปด้วย
 - ความดันน้ำใต้ดินของชั้นดินกรุงเทพฯจะมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละพื้นที่
- ในระหว่างการขุดเจาะจะมีดินเม็ดละเอียดแขวนลอยอยู่ เมื่อมีความแตกต่างระหว่างความดันของสารละลายในหลุมเจาะกับความดันของน้ำใต้ดินจะทำให้ดินเม็ดละเอียดเข้าไปรวมอยู่ในเยื่อที่บนน้ำเป็นผลให้ความแข็งของเยื่อที่บนน้ำสูงกว่าในกรณีของในห้องปฏิบัติการ
- ระยะเวลาที่สารละลายอยู่ในหลุมเจาะหรือระยะเวลาในการเกิดเยื่อที่บนน้ำจะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างคือ
 - ความลึกของเสาเข็ม ถ้าหลุมเจาะมีความลึกมากระยะเวลาในการเกิดเยื่อที่บนน้ำก็จะมากขึ้นตามไปด้วย
 - ความลึกของชั้นทราย ชั้นทรายที่อยู่ในระดับความลึกน้อยกว่าจะมีระยะเวลาการเกิดเยื่อที่บนน้ำนานกว่าชั้นทรายที่อยู่ลึกลงไป
 - ขั้นตอนในการก่อสร้างต่างๆเช่นระยะเวลาในการไล่เม็ดดินขึ้น , ระยะเวลาในการติดตั้งเหล็กเสริม
- ผิวหน้าของทรายจะมีลักษณะขรุขระเนื่องจากการใช้ถังขุด (Drilling Bucket) นอกจากนี้อัตราการขุดอาจจะมีครูดเยื่อที่บนน้ำบางส่วนออกขณะทำการขุดเจาะ

4.4 ข้อกำหนดที่เหมาะสมสำหรับสารรักษาเสถียรภาพในหลุมเจาะ

เนื่องจากที่ผ่านมาข้อกำหนดสำหรับคุณสมบัติของสารรักษาเสถียรภาพจะยึดเอาวิธีและขั้นตอนการก่อสร้างโดยใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ แต่การใช้สารละลายโพลีเมอร์จะมีพฤติกรรมแตกต่างออกไปจากเบนโทไนท์ นอกจากนี้ในการทำงานยังต้องเติมเบนโทไนท์ลงไปปริมาณเล็กน้อย ข้อกำหนดในการใช้งานจึงควรกำหนดช่วงที่ทำให้สารละลายเกิดประโยชน์สูงสุดในการทำงานซึ่งได้เสนอดังตารางที่ 4-6 สำหรับรายละเอียดคุณสมบัติที่เหมาะสมของสารละลายผสมโพลีเมอร์กับเบนโทไนท์ซึ่งจะต้องพิจารณาตามหัวข้อดังนี้

- ทำให้หลุมเจาะมีเสถียรภาพสูงไม่เกิดการเคลื่อนตัวหรือพังขณะทำการขุดเจาะ
- ไม่เกิดเยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake) ในชั้นทรายหรือให้มีความหนาน้อยที่สุดเพื่อลดการสูญเสียแรงเสียดทานในชั้นทราย
- มีปริมาณการสูญเสียสารละลาย (Fluid Loss) ในชั้นทรายในปริมาณที่ยอมรับได้
- ไม่มีกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) และไม่เกิดพฤติกรรมคืบกำลัง (Thixotropy) เพื่อให้ทรายสามารถตกตะกอนลงสู่ก้นหลุมได้หมดและทำให้สารละลายไม่ต้องอู่มเม็ดทรายเอาไว้ เพื่อจะได้ไม่ต้องใช้เครื่องกรองทรายในขณะที่ทำการสูบลกลับ

ตารางที่ 4-6 ข้อกำหนดที่เสนอในการใช้สารละลายโพลีเมอร์

คุณสมบัติที่ทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่าที่เหมาะสม
ความหนาแน่นของสารละลาย	ตาชั่งสารละลาย (Mud Balance)	1.00-1.02 (g/cm ³)
ความหนืดของสารละลาย	กรวยมาร์ช (Marsh Funnel)	40-70 sec/liter
ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย	แถบวัดความเป็นกรด-เบส (pH indicator)	8-10
ปริมาณทรายในสารละลาย	เครื่องมือวัดปริมาณทรายตาม API 13B	น้อยกว่า 0.5%
ปริมาณการไหลของสารละลายผ่านชั้นทราย	แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย	น้อยกว่า 3 cm

โดยทั่วไปคุณสมบัติของสารรักษาเสถียรภาพที่ทำการทดสอบในสถานที่ก่อสร้างจะแบ่งออกเป็น 4 การทดสอบ คือ ความหนาแน่นของสารละลาย, ความหนืดของสารละลายแบบกรวยมาร์ช (Marsh Funnel), ค่าความเป็น กรด-เบส ของสารละลายและปริมาณทรายในสารละลาย โดยแต่ละหัวข้อจะแยกพิจารณาได้ดังนี้

4.4.1 ความหนาแน่นของสารละลาย

สำหรับส่วนผสมของสารละลายโพลีเมอร์และเบนโทไนท์นั้น ค่าความหนาแน่นของสารละลายจะขึ้นอยู่กับเบนโทไนท์เป็นหลัก เนื่องจากการผสมโพลีเมอร์ปริมาณเล็กน้อยลงในสารละลายสามารถเกิดประสิทธิภาพในการทำงานได้ดี (ปริมาณโพลีเมอร์ไม่เกิน 0.3%) แต่มีความจำเป็นที่ต้องผสมเบนโทไนท์ในสารละลายในปริมาณมากกว่าโพลีเมอร์เพื่อให้สารละลายมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งาน (ปริมาณเบนโทไนท์ 1-2% เมื่อผสมกับโพลีเมอร์ และ 3-6% เมื่อใช้เบนโทไนท์เพียงอย่างเดียว)

ข้อกำหนดโดยทั่วไปสำหรับการใช้สารละลายเบนโทไนท์เพียงอย่างเดียวในงานเสาเข็มเจาะกำหนดให้สารละลายมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.04 – 1.21 g/cm³ และให้ใช้ปริมาณของเบนโทไนท์ > 4.5 % ทั้งนี้เพื่อให้สารละลายมีคุณสมบัติเหล่านี้คือ ทำให้เกิดเยื่อที่บีบน้ำ (Filter Cake) ที่ผิวหน้าเพื่อให้เกิดการสูญหายของสารละลายน้อยที่สุด, แขนวนลอยดินเม็ดละเอียดจำนวนหนึ่งไว้ในสารละลายและสร้างแรงดันที่ผนังของหลุมเจาะเพื่อรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

สารละลายโพลีเมอร์จะมีความหนาแน่นของสารละลายใกล้เคียงกับน้ำมาก (ประมาณ 1.01 g/cm^3) นอกจากนี้ ในกรณีที่การผสมทำให้เกิดฟองอากาศมากและสารละลายโพลีเมอร์ก็ฟองอากาศเหล่านั้นไว้ อาจทำให้ความหนาแน่นของสารละลายลดลงจนต่ำกว่าน้ำได้ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติที่ต้องการสำหรับการใช้สารละลายโพลีเมอร์จะแตกต่างกับเบนโทไนท์บางประการ คือ

- การรักษาเสถียรภาพของผนังหลุมเจาะจะใช้แรงยึดเหนี่ยวของโพลีเมอร์ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดทราย
- การใช้สารละลายโพลีเมอร์มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความหนาของเยื่อบูทบนน้ำ (Filter Cake) และ พฤติกรรมของเยื่อบูทบนน้ำที่เกิดขึ้นมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นแบบการซึมผ่านลึก (Deep Filtration) ในกรณีที่ใช้เบนโทไนท์ปริมาณเล็กน้อยผสมลงไป หรือเป็นแบบไม่เกิดเยื่อบูทบนน้ำ (Rheological Blocking) กรณีที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เพียงอย่างเดียว
- เนื่องจากความหนาแน่นของสารละลายโพลีเมอร์ต่ำกว่าสารละลายเบนโทไนท์ การที่จะทำให้ความต่างของความดันของสารละลายมีมากพอที่จะซึมเข้าไปในผนังของหลุมเจาะจะต้องให้ความสูงของสารละลายในหลุมเจาะ (วัดเทียบกับก้นหลุม) ของสารละลายโพลีเมอร์ มีค่าสูงกว่าในกรณีที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าสารละลายที่มีส่วนผสมของโพลีเมอร์และเบนโทไนท์ที่มีความหนาแน่นเพียง 1.01 g/cm^3 สามารถทำให้ผิวหน้าของทรายมีความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมากจากการทดสอบโดยพีเนโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer)

การใช้สารละลายโพลีเมอร์หรือเบนโทไนท์เพียงอย่างเดียวจะทำให้กำลังของทรายเพิ่มขึ้นน้อยกว่าการใช้สารละลายทั้งสองชนิดในอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากความแข็งที่ผิวหน้าของทรายที่มากกว่าได้แสดงถึงเสถียรภาพของหลุมเจาะที่มากกว่าด้วย อัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะทำให้กำลังของทรายมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากคือ ใช้โพลีเมอร์ในช่วง $0.05\text{--}0.15 \%$ โดยน้ำหนัก และใช้เบนโทไนท์ $1\text{--}2 \%$ โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของสารละลายมีค่าอยู่ในช่วง $1.005\text{--}1.020 \text{ g/cm}^3$

4.4.2 ความหนืดของสารละลายแบบกรวยมาร์ช (Marsh Funnel)

ข้อกำหนดในการทดสอบค่าความหนืดนิยมใช้กรวยมาร์ชเนื่องจากการทดสอบ ไม่มีความยุ่งยากแต่ค่าที่ได้จากการทดสอบกรวยมาร์ชจะเป็นค่าของคุณสมบัติของสารละลาย 3 อย่างรวมอยู่ด้วยกันคือ ความหนืดของสารละลาย, ความหนาแน่นของสารละลาย และกำลังรับแรงเฉือนของสารละลาย

ในกรณีของความหนืดของสารละลายจะมีผลขณะที่สารละลายไหลผ่านท่อของกรวยมาร์ช ถ้าสารละลายมีความหนืดสูงจะใช้เวลานานกว่าในการไหลผ่านท่อ อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของสารละลายจะมีผลต่อความดันที่ทำให้สารละลายไหลผ่านท่อ สารละลายที่มีความหนาแน่นมากกว่า จะใช้เวลาในการไหลผ่านท่อน้อยกว่า

นอกจากนี้การใช้เบนโทไนท์เพียงอย่างเดียวจะเกิดปรากฏการณ์คีนกำลัง (Thixotropy) คือสารละลายจะมีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายไม่ถูกรบกวน ทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา

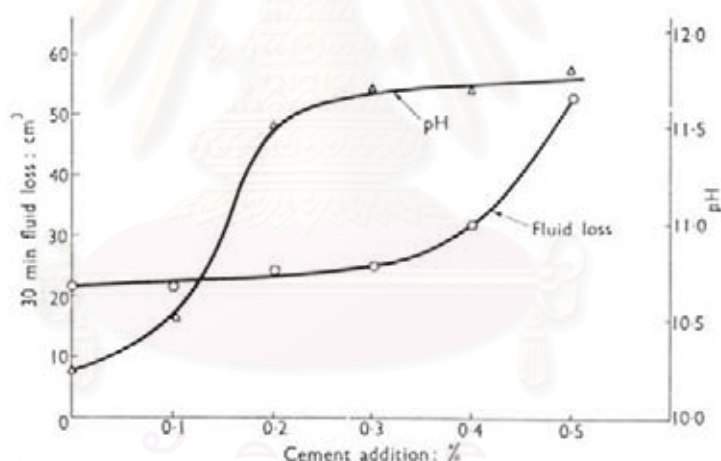
อัตราส่วนของโพลีเมอร์และเบนโทไนท์ก็จะมีผลต่อความหนืดแบบกรวยมาร์ชเมื่อเพิ่มปริมาณของโพลีเมอร์หรือเบนโทไนท์ลงไปความหนืดของสารละลายก็จะเพิ่มขึ้นโดยที่ปริมาณโพลีเมอร์เพียงเล็กน้อย จะทำให้ความหนืดของสารละลายมีค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการได้

เนื่องจากค่าความหนืดแบบกรวยมาร์ชเป็นค่าของคุณสมบัติสารละลาย 3 ชนิด ข้อกำหนดที่ให้จึงมีพื้นฐานจากการใช้งานในภาคสนามของสารละลายเบนโทไนท์เพียงอย่างเดียว สำหรับสารละลายโพลีเมอร์ช่วงของความหนืดแบบกรวยมาร์ชที่เหมาะสมของสารละลายผสมทั้ง 2 ชนิด สำหรับค่าความหนืดแบบกรวยมาร์ชควรแสดงถึงปริมาณและสัดส่วนของโพลีเมอร์และเบนโทไนท์ที่ทำให้การทำงานเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

4.4.3 ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย

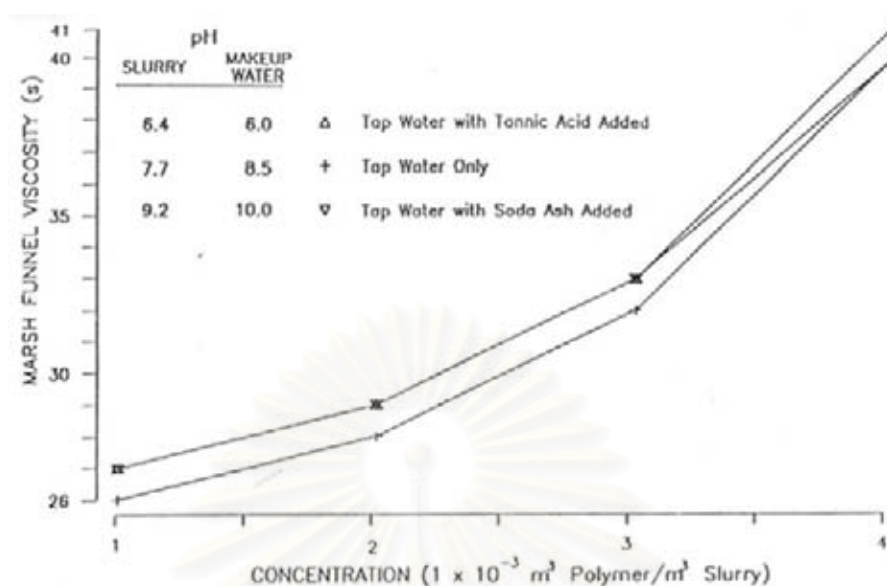
สารละลาย 2 ชนิดนี้มีค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เมื่อผสมกับน้ำประปาไม่เท่ากัน โดยที่ค่า pH ของสารละลายโพลีเมอร์จะมีค่าค่อนข้างเป็นกลางถึงเป็นเบสเล็กน้อย ($\text{pH} \approx 7-7.5$) และสารละลายเบนโทไนท์จะมีค่าเป็นเบส (pH อยู่ระหว่าง 8-10) ดังนั้นค่า pH ของสารผสมจึงขึ้นอยู่กับปริมาณและสัดส่วนของโพลีเมอร์กับเบนโทไนท์

ค่า pH จะมีผลกับเบนโทไนท์มากกว่าโพลีเมอร์ โดยที่ช่วงของการใช้งานที่สามารถใช้ได้ คือ 8-11 ในสภาพที่เป็นกรด (pH มีค่าต่ำกว่า 7) จะทำให้ผงเบนโทไนท์ไม่สามารถดูดน้ำได้ ดังนั้นจะทำให้สารละลายไม่มีความหนืดและไม่สามารถเกิดพฤติกรรมการก่อตัวของเยื่อที่บับน้ำ (Filter Cake Formation) ได้ เมื่อค่า pH มีค่ามากกว่า 11 โครงสร้างของเบนโทไนท์จะสลายตัว ทำให้ไม่สามารถเกิดความหนืดและเกิดเยื่อที่บับน้ำได้ซึ่งแสดงในรูปที่ 4-34



รูปที่ 4-34 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของเบนโทไนท์ กับ การสูญเสียของสารละลาย (Hutchinson et al, 1975)

สำหรับโพลีเมอร์แบบ PHPA (แบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้) พบว่าค่า pH ไม่มีผลต่อสารละลายมากนัก ในช่วง pH ระหว่าง 6-10 ค่าความหนืดแบบกรวยมาร์ชของสารละลายที่มีค่า pH อยู่ในช่วงเดียวกันดังรูปที่ 4-35 แต่เมื่อค่า pH มีค่าเกิน 10 ค่าของความหนืดแบบกรวยมาร์ชของสารละลายจะมีค่าลดลง ดังนั้นค่า pH ที่เหมาะสมของสารละลายโพลีเมอร์อยู่ในช่วงระหว่าง 8-10



รูปที่ 4-35 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของสารละลายที่ผสมกับผงโพลีเมอร์กับความหนืดแบบกรวยมารีซ (Majano and O'Neil, 1993)

4.4.4 ปริมาณทรายแขวนลอยในสารละลาย

เนื่องจากการใช้สารละลายโพลีเมอร์สามารถลดการใช้เครื่องกรองทรายออกไปได้ เพราะสารละลายโพลีเมอร์ไม่ทำให้เม็ดดินแขวนลอย และสารละลายโพลีเมอร์จะทำหน้าที่ให้เม็ดดินรวมตัวกันจนเกิดการตกตะกอนได้ ทั้งนี้ต้องใช้ระยะเวลาจนกระทั่งเม็ดดินเกือบทั้งหมดตกตะกอน แล้วจึงจะทำความสะอาดก้นหลุม ดังนั้นก่อนทำความสะอาดก้นหลุมจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบปริมาณทรายที่แขวนลอยในสารละลายก่อน โดยใช้อุปกรณ์เก็บสารละลายที่ความลึกต่างๆ ซึ่งความลึกของสารละลายที่ควรทำการเก็บตัวอย่าง คือที่ระดับก้นหลุมเจาะและก้นหลุม ซึ่งปริมาณทรายที่ยอมรับได้ที่ระดับก้นหลุมควรมีค่าปริมาณทรายในสารละลายไม่เกิน 0.5% และที่ระดับก้นหลุมเจาะควรมีค่าไม่เกิน 1%

นอกจากนี้จะมีดินเม็ดละเอียดมากกว่าตะแกรง #200 แขวนลอยอยู่ในสารละลายและไม่เกิดการตกตะกอนลงก้นหลุมภายในระยะเวลาการขุดเจาะเสาเข็ม แต่จะเกิดการตกตะกอนที่ถังพักตะกอน ดินเม็ดละเอียดเหล่านี้ไม่สามารถตรวจวัดได้จากเครื่องมือหาปริมาณทรายของ API 13B (Sand Content Apparatus) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4-36 และ 4-37 เนื่องจากเม็ดดินเหล่านี้จะทำให้ความ

หนาแน่นของสารละลายเพิ่มขึ้น อีกทั้งทำให้เยื่อบูทึบน้ำ (Filter Cake) มีความหนาและความแข็งเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพักสารละลายในถังพักตะกอนก่อนจะนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้ดินเม็ดละเอียดเกิดการตกตะกอนทั้งหมดเสียก่อน



รูปที่ 4-36 การหาปริมาณทรายในสารละลาย



รูปที่ 4-37 ปริมาณทรายในสารละลาย

4.4.5 การทดสอบการซึมผ่านกับตัวอย่างดินในหลุมเจาะ

ข้อกำหนดของ API 13B ได้มีเครื่องมือทดสอบหาปริมาณสารละลายที่ซึมผ่านกระดาดกรอง และวัดความหนาของเยื่อบูทึบน้ำบนกระดาดกรอง แต่ในหลุมเจาะชั้นทรายแต่ละชั้นจะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน สำหรับการใส่สารละลายผสม 2 ชนิด มีจุดประสงค์ที่จะทำให้เกิดเยื่อบูทึบน้ำที่มีความหนาน้อยที่สุด ซึ่งพฤติกรรมการไหลผ่านของสารละลายจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทรายที่ใช้ทดสอบ เนื่องจากทรายแต่ละความลึกหรือแต่ละบริเวณจะมีส่วนประกอบและสภาพในธรรมชาติต่างกันไป

การทดสอบการไหลผ่านโดยใช้ตัวอย่างทรายในหลุมเจาะและส่วนผสมของสารละลายที่จะใช้ในการรักษาเสถียรภาพในการก่อสร้าง จะช่วยให้สามารถประมาณค่าต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- ปริมาณสารละลายที่ซึมผ่านชั้นทรายในระยะเวลาการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแต่ละต้น
- ความหนาของเยื่อที่บุน้ำที่ผิวหน้าของทราย (กรณีที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เพียงอย่างเดียว)
- ความแข็งของผิวหน้าของทราย ตรวจสอบโดยวัดค่าพีนิโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer) ก่อนและหลังให้ความดันกับสารละลาย

การทดสอบกับแบบจำลองนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องทำทุกวันที่มีการก่อสร้างเสาเข็ม เนื่องจากการทดสอบมีความยุ่งยากกว่าการทดสอบแบบอื่นๆ จำนวนครั้งของการทดสอบควรจะทำเมื่อเจาะสำรวจดินหรือเพิงจะเริ่มต้นการก่อสร้าง, ในระหว่างตอนกลางของระยะเวลาการก่อสร้าง และช่วงท้ายของการก่อสร้าง หรือเมื่อขุดเจาะพบชั้นทรายที่มีลักษณะแตกต่างจากที่พบในหลุมเจาะที่ผ่านมา

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์สามารถศึกษาได้จากการทดสอบตัวอย่างทรายกรุงเทพฯชั้นที่หนึ่ง, ชั้นที่สองและทรายหยาบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ส่วนผสมและปริมาณต่างๆกันของสารละลายสองประเภท คือ สารละลายโพลีเมอร์และสารละลายเบนโทไนท์ ซึ่งมีวิธีในการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมในด้านต่างๆของแบบจำลองในสภาพของการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ

การศึกษาพฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์จากข้อมูลจริงในสถานที่ก่อสร้างสามารถทำได้จากการเก็บข้อมูลในสถานที่ก่อสร้างแล้วทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากสถานที่ก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังมาจากการรวบรวมผลงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อทำการเปรียบเทียบอีกด้วย เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดแล้วสามารถสรุปออกมาเป็นหัวข้อหลักๆได้ดังนี้

5.1 ปริมาณการสูญเสียของสารละลายในระยะเวลาการก่อสร้าง

การใช้สารละลายทั้งโพลีเมอร์และเบนโทไนท์มีการสูญเสียสารละลายในปริมาณที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 40% ของปริมาณสารละลายที่ใช้เมื่อเริ่มต้นโครงการ แม้ว่า การใช้สารละลายโพลีเมอร์จะมีการสูญเสียในชั้นทรายมากกว่าสารละลายเบนโทไนท์ แต่สารละลายเบนโทไนท์จะมีการสูญเสียปริมาณของสารละลายในกระบวนการอื่น ๆ มากกว่า เมื่อเก็บข้อมูลปริมาณการใช้งานแล้วพบว่าการใช้งานสารละลายทั้งสองประเภทมีปริมาณใกล้เคียงกัน

5.2 ประสิทธิภาพของการทำงานของสารละลายโพลีเมอร์เปรียบเทียบกับสารละลายเบนโทไนท์

โดยรวมแล้วการใช้งานสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้งานสารละลายเบนโทไนท์ดังแสดงในตารางที่ 5-1 เนื่องจากมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกต่อพื้นที่สูงกว่า, ประหยัดพลังงานมากกว่า, มีกระบวนการใช้งานสะดวกกว่า, ใช้อุปกรณ์ในการทำงานน้อยกว่า และมีราคาต่อหน่วยปริมาตรรวมทั้งราคาในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะถูกกว่า ดังนั้นการใช้สารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกจะมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และทางวิศวกรรมมากกว่าการใช้งานสารละลายเบนโทไนท์

ตารางที่ 5-1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสารละลายทั้งสองประเภท

คุณสมบัติที่ทำการเปรียบเทียบ	สารละลายเบนโทไนท์	สารละลายโพลีเมอร์
การสูญเสียของสารละลายทั้งหมด	40% ของปริมาตรเริ่มต้น	40% ของปริมาตรเริ่มต้น
ราคาต่อปริมาตรของสารละลาย	แพงกว่า	ถูกกว่า
ราคาการก่อสร้างทั้งโครงการ	แพงกว่า	ถูกกว่า
อุปกรณ์ในการก่อสร้าง	มากกว่า	น้อยกว่า
พลังงานในการก่อสร้าง	มากกว่า	น้อยกว่า
ความสะดวกในการทำงาน	ยุ่งยากกว่า	ง่ายกว่า
ค่า α	อยู่ในช่วงเดียวกัน	อยู่ในช่วงเดียวกัน
ค่า β	ต่ำกว่า	สูงกว่า

5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

การใช้สารละลายโพลีเมอร์จะมีค่าพารามิเตอร์บางค่าต่างออกไปจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์ ซึ่งจะมีผลทำให้กำลังรับแรงของเสาเข็มมีค่าต่างกันออกไป

5.3.1 ค่า α ของเสาเข็มที่สร้างโดยสารละลายโพลีเมอร์

ค่า α ของการใช้งานสารละลายโพลีเมอร์มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับค่า α ของการใช้งานสารละลายเบนโทไนท์ เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์ไม่สามารถซึมเข้าไปในชั้นดินเหนียวได้ เช่นเดียวกับสารละลายเบนโทไนท์เนื่องจากในชั้นดินเหนียวมีค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ต่ำมาก ดังนั้นค่า α ที่ใช้ในการประมาณค่ากำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวของสารละลาย โพลีเมอร์สามารถใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) ของงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น ชาญชัย (2542) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากเสาเข็มที่ก่อสร้างโดยสารละลายเบนโทไนท์

5.3.2 ค่า β ของเสาเข็มที่สร้างโดยสารละลายโพลีเมอร์

จากการเก็บข้อมูลในสถานที่ก่อสร้างและการทดสอบแรงเสียดทานในห้องปฏิบัติการ พบว่าการใช้งานสารละลายโพลีเมอร์ทำให้กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทรายมีค่าสูงกว่าการใช้งานสารละลายเบนโทไนท์ เนื่องจากการใช้สารละลายโพลีเมอร์ไม่ทำให้เกิดเยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake) ที่มีความหนาและมีความแข็งมากเหลืออยู่หลังจากการเทคอนกรีตที่ผนังของหลุมเจาะ การคำนวณค่าแรงเสียดทานในชั้นทรายจะใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical Effective Stress, σ'_v) ซึ่งค่าความสัมพันธ์นี้ของสารละลายโพลีเมอร์จะให้ค่า β สูงกว่าค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการใช้สารละลายเบนโทไนท์ประมาณ 80%

5.3.3 ค่า N_q^* ของเสาเข็มที่สร้างโดยสารละลายโพลีเมอร์

เนื่องจากน้ำหนักทดสอบที่ใช้ยังมีค่าไม่สูงพอที่ส่งลงมาที่ปลายเสาเข็ม ทำให้เมื่อวิเคราะห์กลับออกมาแล้ว ค่า N_q^* ของน้ำหนักทดสอบสุดท้ายของเสาเข็มที่สร้างด้วยสารละลายโพลีเมอร์จะมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่า N_q^* ของเสาเข็มที่สร้างด้วยสารละลายเบนโทไนท์ จากข้อมูลที่มีจำนวนน้อยเกินไป และการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ไม่ถึงจุดวิบัติ ทำให้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าค่า N_q^* ของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ควรมีค่าเป็นเท่าใด

5.4 ข้อกำหนดในการก่อสร้างเกี่ยวกับสารรักษาเสถียรภาพ

การใช้งานสารละลายโพลีเมอร์ควรมีข้อกำหนดที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานดังกล่าว คือ

- มีค่าความหนาแน่นของสารละลายอยู่ระหว่าง 1.000 – 1.020 g/cm³
- มีค่าความหนืดแบบกรวยมาร์ช (Marsh Funnel) อยู่ในช่วง 40-70 sec/liter
- มีปริมาณทรายแขวนลอยในสารละลายไม่เกินกว่า 0.5 %
- มีค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายในช่วง 8-10
- มีปริมาณเบนโทไนท์ระหว่าง 1-2 % และโพลีเมอร์อย่างน้อย 0.05 % โดยน้ำหนักในสารละลาย

นอกจากนี้ยังควรมีการทดสอบการซึมผ่านชั้นทรายโดยแบบจำลองเพื่อใช้ในการหาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับชั้นดินที่ทำการก่อสร้าง

5.5 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การศึกษาพฤติกรรมของการใช้สารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในงานวิจัยนี้ทำโดยวิธีศึกษาจากแบบจำลองที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และจากข้อมูลที่เกิดขึ้นจากสถานที่ก่อสร้างรวมทั้งผลงานวิจัยที่ผ่านมา ข้อมูลและผลการวิเคราะห์ที่ได้มาจะเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการใช้สารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ ข้อเสนอแนะที่ได้รวบรวมดังต่อไปนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีการพัฒนาและสามารถเข้าใจพฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในระดับสูงขึ้นไปได้ดียิ่งขึ้น

- ควรทำการทดสอบเสาเข็มจนถึงจุดวิบัติเพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ของกำลังรับแรงของเสาเข็ม (α , β และ N_u^*) ที่ได้จากการวิเคราะห์หักกลับ จะใช้ข้อมูล ณ จุดที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate Load Bearing Capacity) ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มที่ก่อสร้างโดยสารละลายโพลีเมอร์จะไม่ได้ทำการทดสอบจนถึงกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแต่จะทดสอบจนถึง 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน เมื่อทำการทดสอบ พบว่าเสาเข็มทุกต้นที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ไม่เกิดการวิบัติ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่นำเสนอในงานวิจัยครั้งนี้จะยังไม่ใช่ค่าสุดท้ายที่กำลังรับน้ำหนักจะพัฒนาไปถึงได้
- จำนวนข้อมูลของเสาเข็มที่ติดตั้งเครื่องมือวัดควรจะมีมากกว่านี้เพื่อให้การสร้างเส้นแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ของกำลังรับน้ำหนักมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น เนื่องจากข้อมูลของการทดสอบเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้มีเพียง 5 ต้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หักกลับมีลักษณะที่น่าเชื่อถือได้ ดังนั้นข้อมูลที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้ในระดับหนึ่ง
- ควรทำการศึกษาพฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกกับลักษณะชั้นดินแบบอื่นที่นอกเหนือไปจากชั้นดินกรุงเทพฯ อีกด้วย เช่น ลักษณะชั้นดินที่เกิดกับที่ (Residual Soil) หรือดินที่เป็นทรายทั้งหมด เพื่อให้มีความเข้าใจมากขึ้นในการใช้งานสารละลายโพลีเมอร์ในชั้นดินลักษณะต่างๆ
- ควรมีการศึกษาในเชิงวิชาการเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ณรงค์ ทศนนิพันธ์, กมล สิงโตแก้ว และพรพจน์ ดันเส็ง. 2543. สารละลายเบนโทโนท์ในงาน
กำจัดดินชนิดขุดในชั้นดินกรุงเทพฯ:คุณสมบัติต่างๆและวิธีการควบคุม. การ
ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6.
- ณรงค์ ทศนนิพันธ์, เต้จ รุจิขจรเดช และพรพจน์ ดันเส็ง. 2543. การใช้โพลีเมอร์ในการก่อ
สร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา
แห่งชาติ ครั้งที่ 6.
- แมนสรวง จินจิ๋ว, มนัสพล วรสิทธิ์เศรษฐ์ และณัฐพล สุขอนันต์. 2540. การศึกษาคุณสมบัติ
ทางวิศวกรรมของชั้นดินตามแนวเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดิน. โครงการทางวิศวกรรมโยธา
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย.
- วันชัย เทพรักษ์, สันติภาพ ศิริยงค์, สุรเชษฐ์ ตันวงศ์वाल และสุธี คำแฝด. 2541. การใช้
โพลีเมอร์ในการทำเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ. โครงการทางวิศวกรรม
โยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย.
- วีระนันท์ ปิตุปกรณ. 2526. การประเมินค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม
จากการทดสอบ SPT (N). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย.
- วสท. 2520. ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

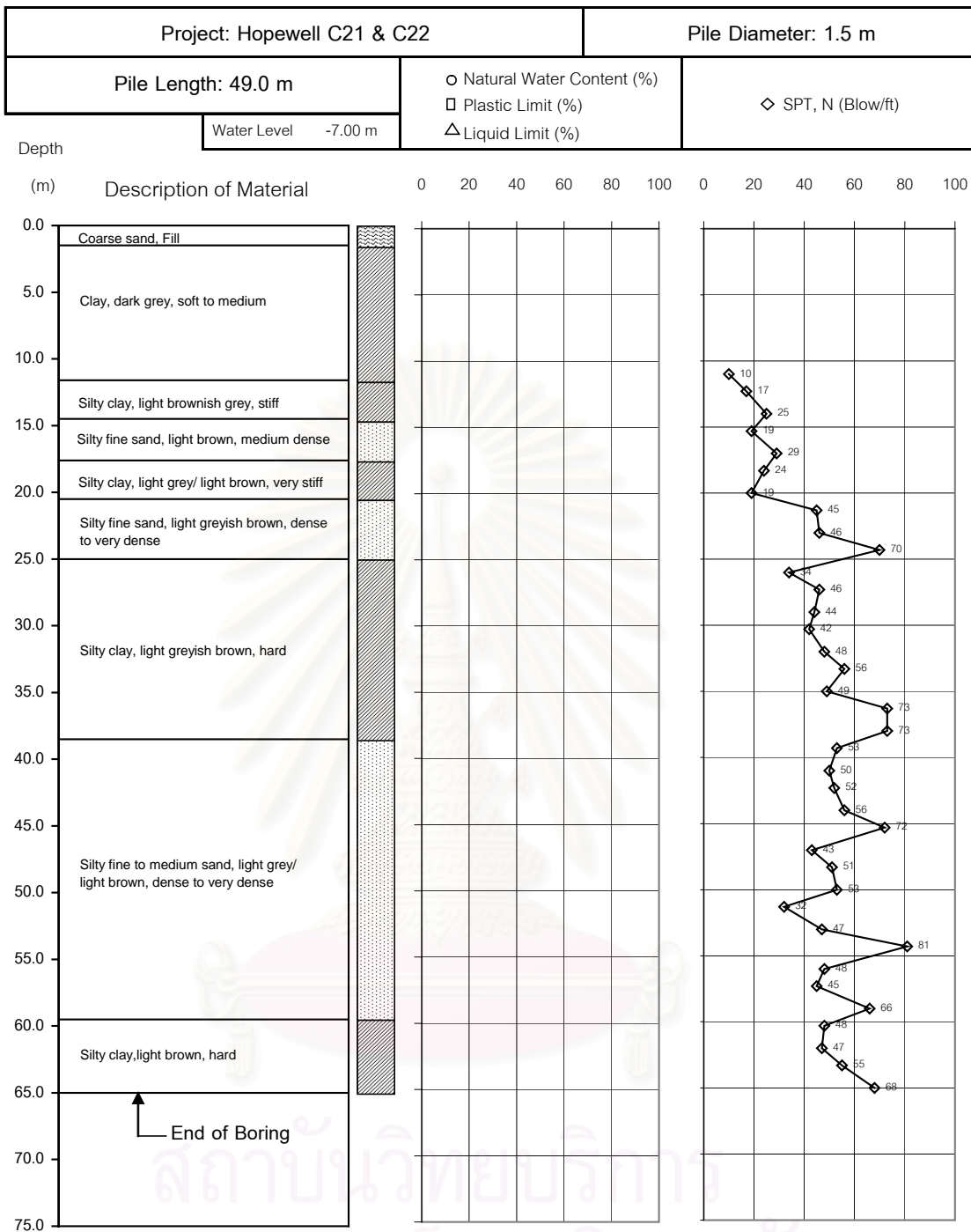
- American Petroleum Institute. 1985. Standard Procedure for Field Testing Drilling Fluids. API RP13B, American Petroleum Institute.
- Ata, A.A. and O'Neil, M.W. 1998. Side-wall Stability and Side-shear Resistance in Bored Piles Constructed with high-molecular-weight Polymer Slurry. pp 111-117. Deep foundation on Bored and Auger Piles, Rotterdam.
- Bustamante, M. et al. 1998. Performance of Polymer Slurries in large Diameter Bored Pile, pp 119-127. Deep foundation on Bored and Auger Piles, Rotterdam.
- Cernak, B. 1976. The Time Effect of Suspension on the Behavior of Piers. Proceedings, Sixth European Conference on Soil Mechanics and Found. Eng., 1.1, Vienna, March
- Coyle, H.M. and Castello, R.R. 1981. New Design Correlations for Piles in Sand. American Society of Civil Engineers, Vol. 107, No. GT7, pp. 965-986
- Das, B.M. 1998. Principle of Geotechnical Engineering. 4th: PWS Publishing Company
- Farmer, I.W., and Goldberg, M. 1969. Effect of Bentonite on the Skin Friction of Bored Piles. Internal Report, Cementation Research, Ltd.
- Holden, J.C. 1984. Construction of Bored Piles in Weathered Rocks. Part 4: Bentonite Construction Procedures," Technical Report No.69, Road Construction Authority of Victoria, Australia.
- Hutchinson, M.T. et al. 1975. Properties of Bentonite Slurries used in Diaphragm walling and their control, pp 33-39. Institution of Civil Engineers, London.
- Marcuson, W.F.III and Bieganousky, W.A. 1977. SPT and Relative Density in Coarse Sands. American Society of Engineers, Vol.103, No.11, pp. 1295-1309
- Majano, R.E. and O'neil, M.W. 1993. Effect of Mineral and Polymer Slurries on Perimeter Load Transfer in Drilled Shafts. ADSC: The International Association of Foundation Drilling, University of Houston

- Meyerhof, G.G. 1976. Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation. American Society of Civil Engineers, Vol. 102, No. GT3, pp. 197-228
- O'Neil, M. W., and Reese, L. C. 1970. Behavior of Axially Loaded Drilled Shafts in Beaumont Clay. Report No. 89-8, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, TX, Dec.
- Peck, R.B., Hanson, W.E., and Thornburn, T.H. 1974. Foundation Engineering. New York: John Wiley&Sons.
- Potyondy, J.G. 1961. Skin friction between various soils and construction materials. Geotechnique 11 No.4: 339-353.
- Poulos, H.G., and Davis, E.S. 1980. Pile Foundation Analysis and Design. New York: John Wiley&Sons.
- Subba Rao, K.S., Allam, M.M. and Robinson, R.G. 1998. Interfacial friction between sands and solid surfaces. Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering 131 (April): 75-82
- Teparaksa, W. 1994. Newly Developed toe-Grouted Bored Pile in Soft Bangkok Clay. Performance and Behavior. Int. Conf. On Design and Construction of Deep Foundation, Orlando, Florida.
- Teparaksa, W. 1999. Principle and Application of Instrumentation for the First MRTA Subway Project in Bangkok. 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Singapore, November, pp. 411-416
- Teparaksa, W and Boonyarak, B. 2001. Performance and Behavior of Polymer Slurry in Wet Process Bored Pile in Bangkok Subsoils. Proceeding of the fourteenth KKNN Seminar on Civil Engineering, Kyoto, November, pp. 439-444
- Tucker, K. L. and Reese, L. C. 1984. The Effect of Bentonitic Slurry on Drilled Shafts. Research Report 351-1F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, TX
- Vesic, A.S. 1967. Ultimate Load and Settlement of Deep Foundation in Sand. Proceedings, Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Duke University, Durham, N.C., p. 53

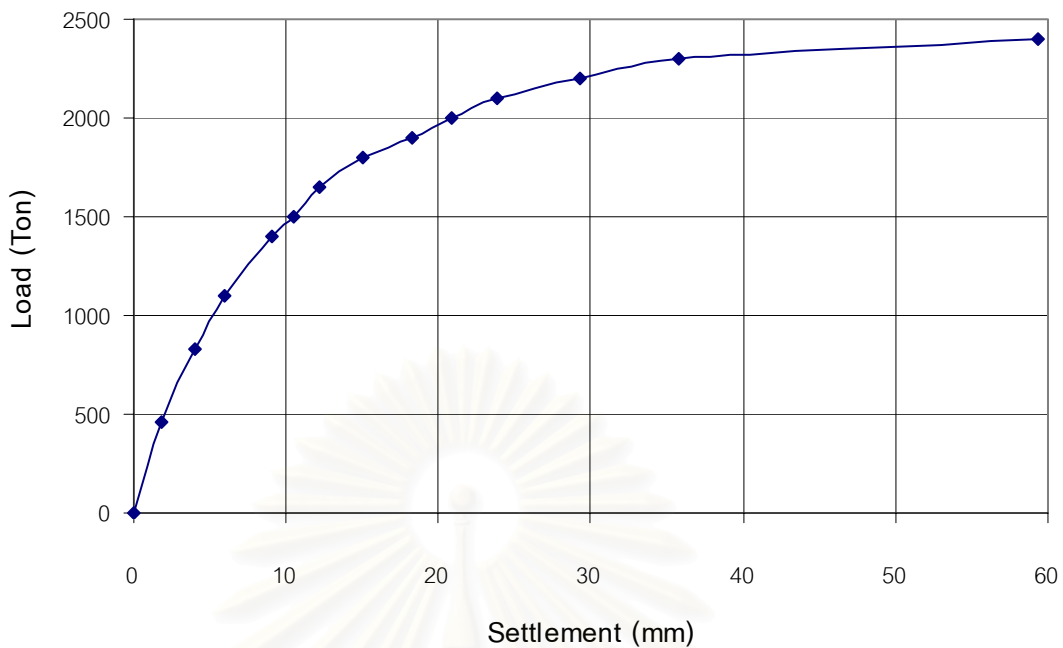


ภาคผนวก

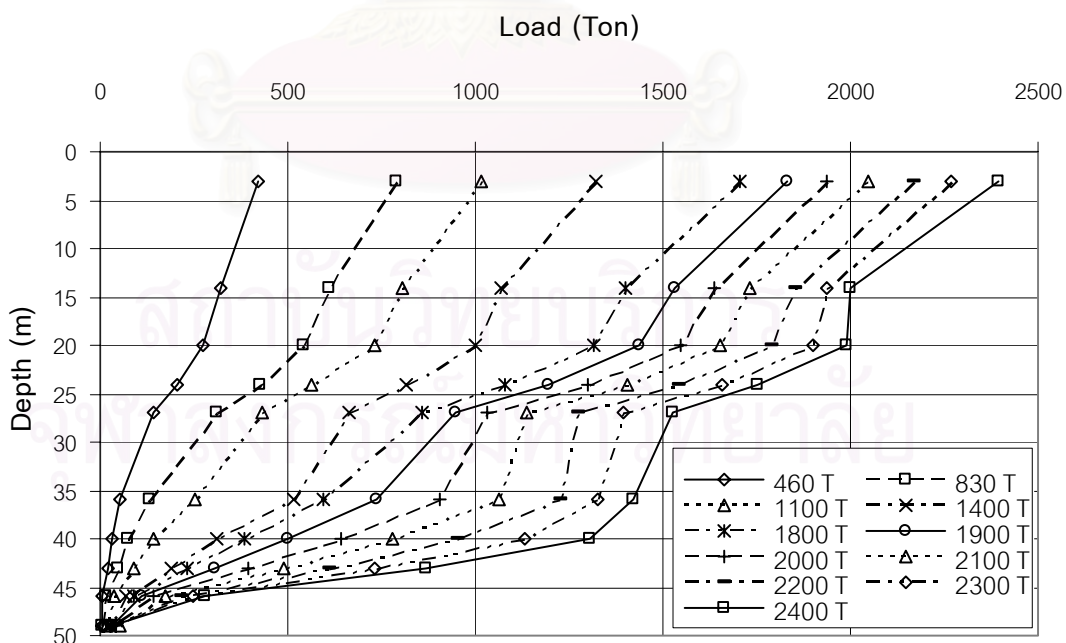
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



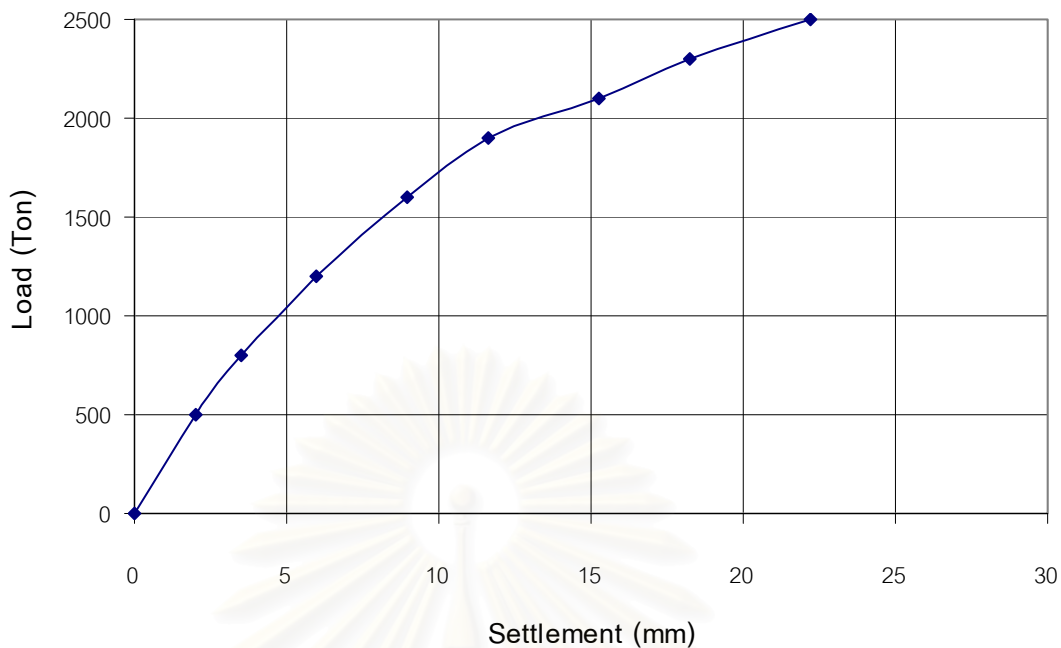
ข้อมูลดินจากโครงการ: Hopewell C21 และ C22



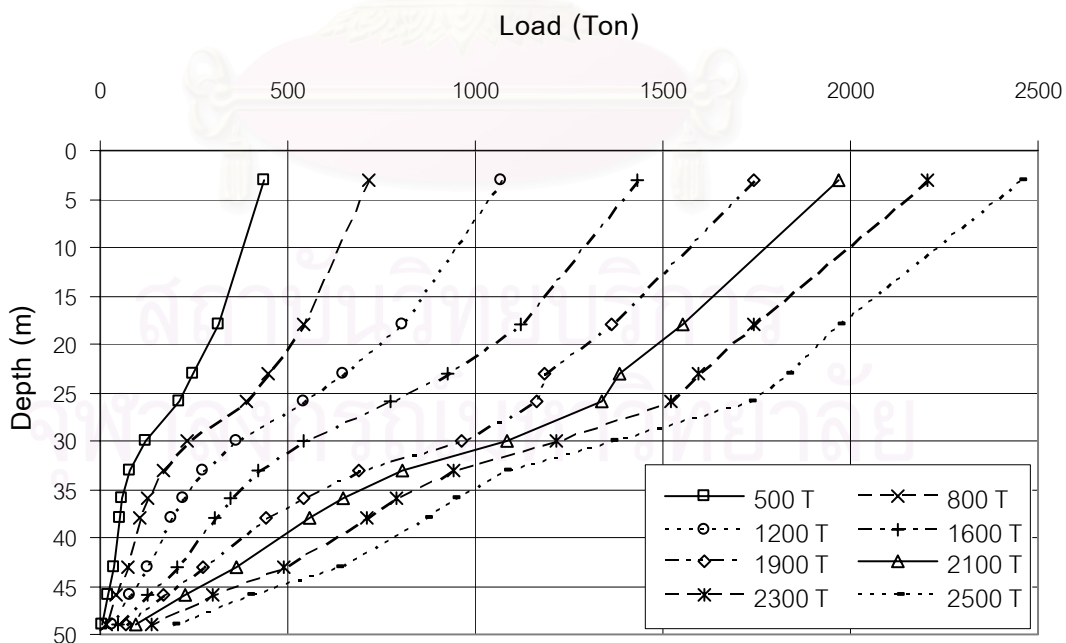
ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับ น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม	สถานที่ทดสอบ: โครงการ Hopewell C21
---	------------------------------------



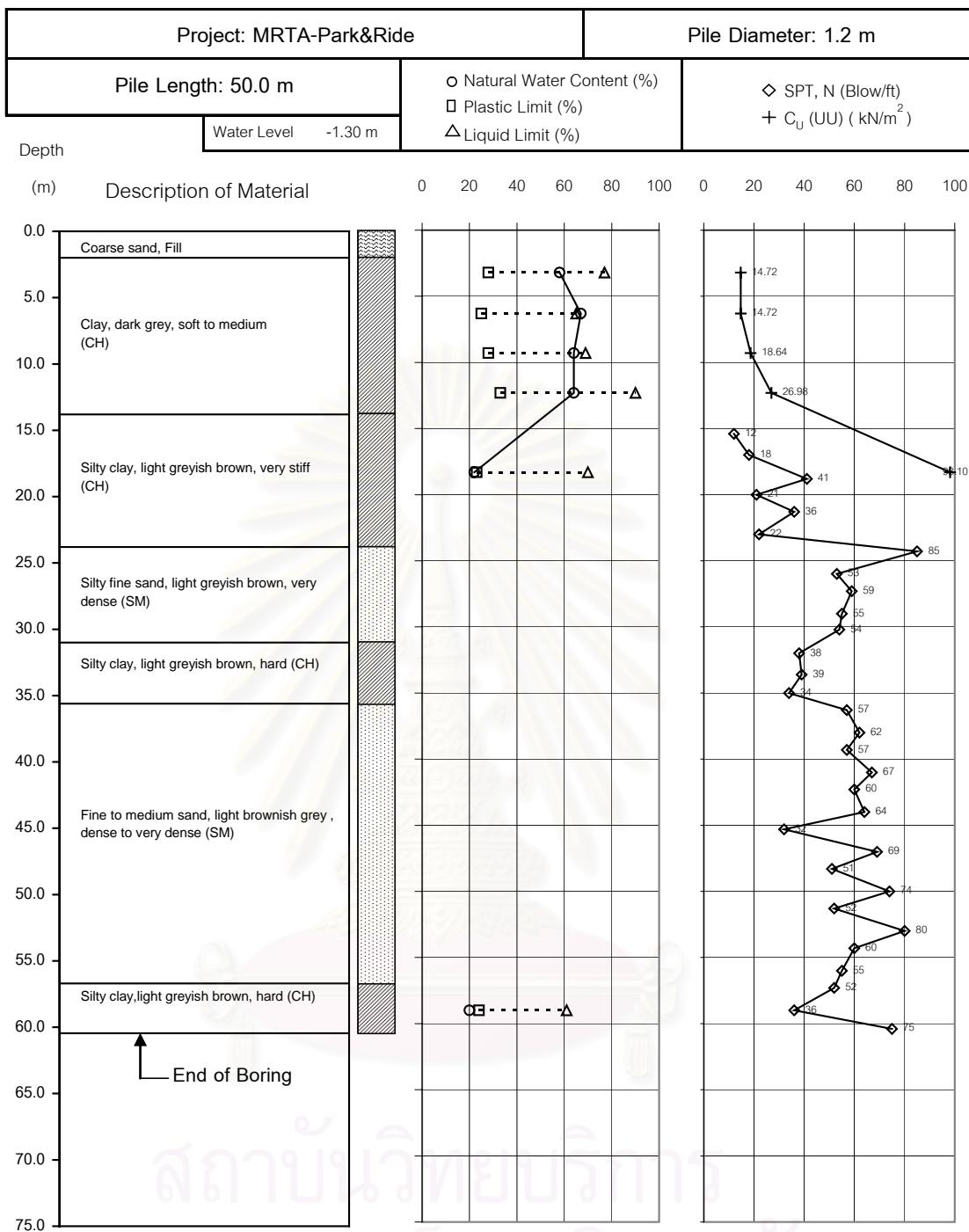
การกระจายแรงในชั้นดินที่ความลึกต่างๆ	สถานที่ทดสอบ: โครงการ Hopewell C21
--------------------------------------	------------------------------------



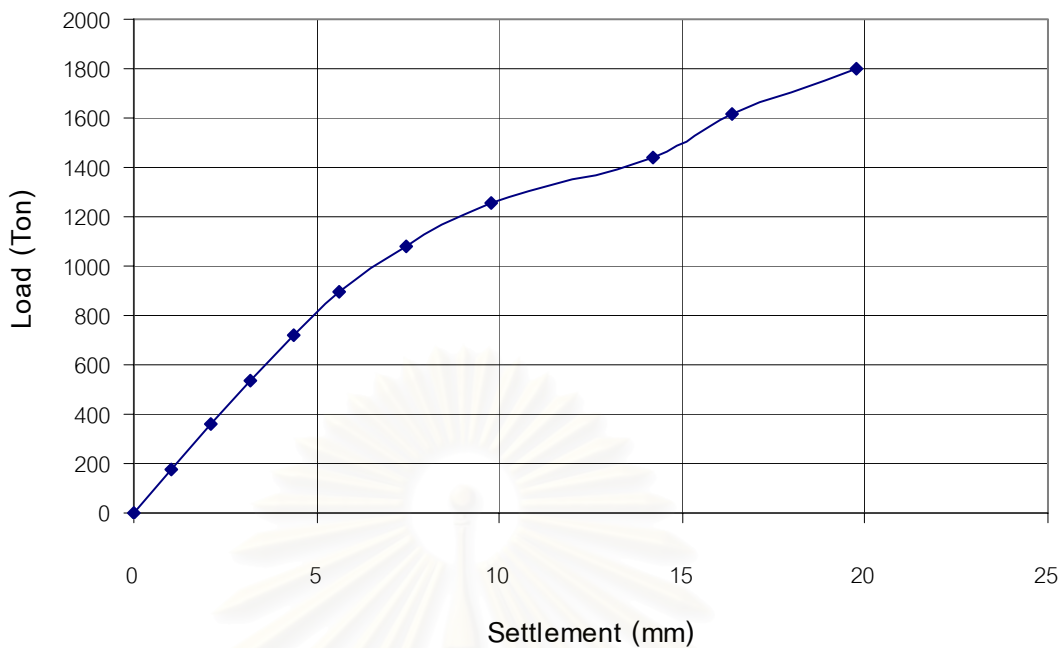
ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับ น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม	สถานที่ทดสอบ: โครงการ Hopewell C22
---	------------------------------------



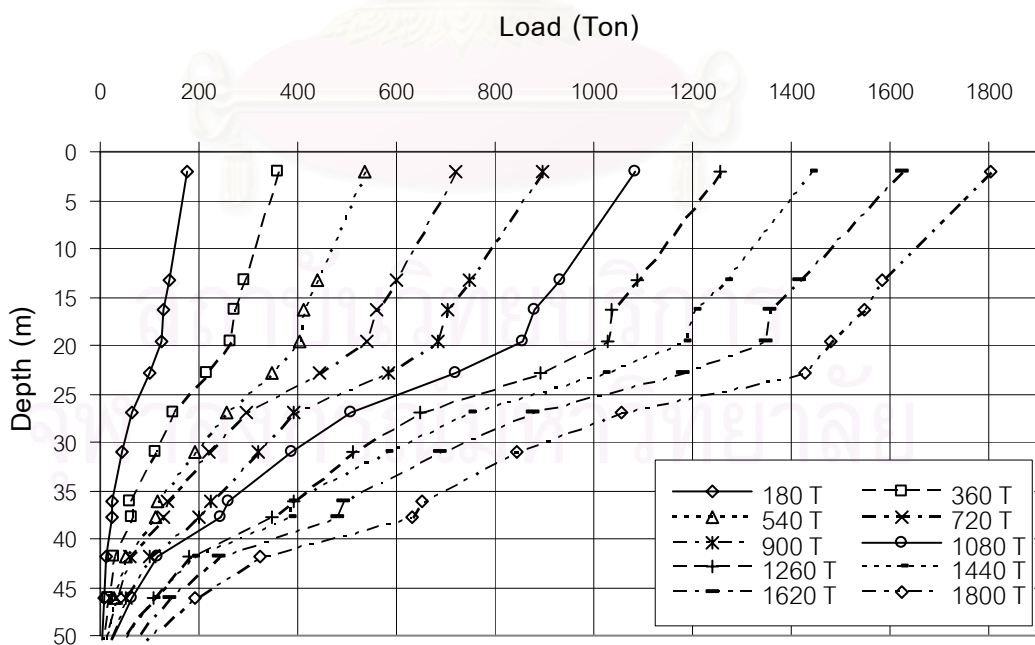
การกระจายแรงในชั้นดินที่ความลึกต่างๆ	สถานที่ทดสอบ: โครงการ Hopewell C22
--------------------------------------	------------------------------------



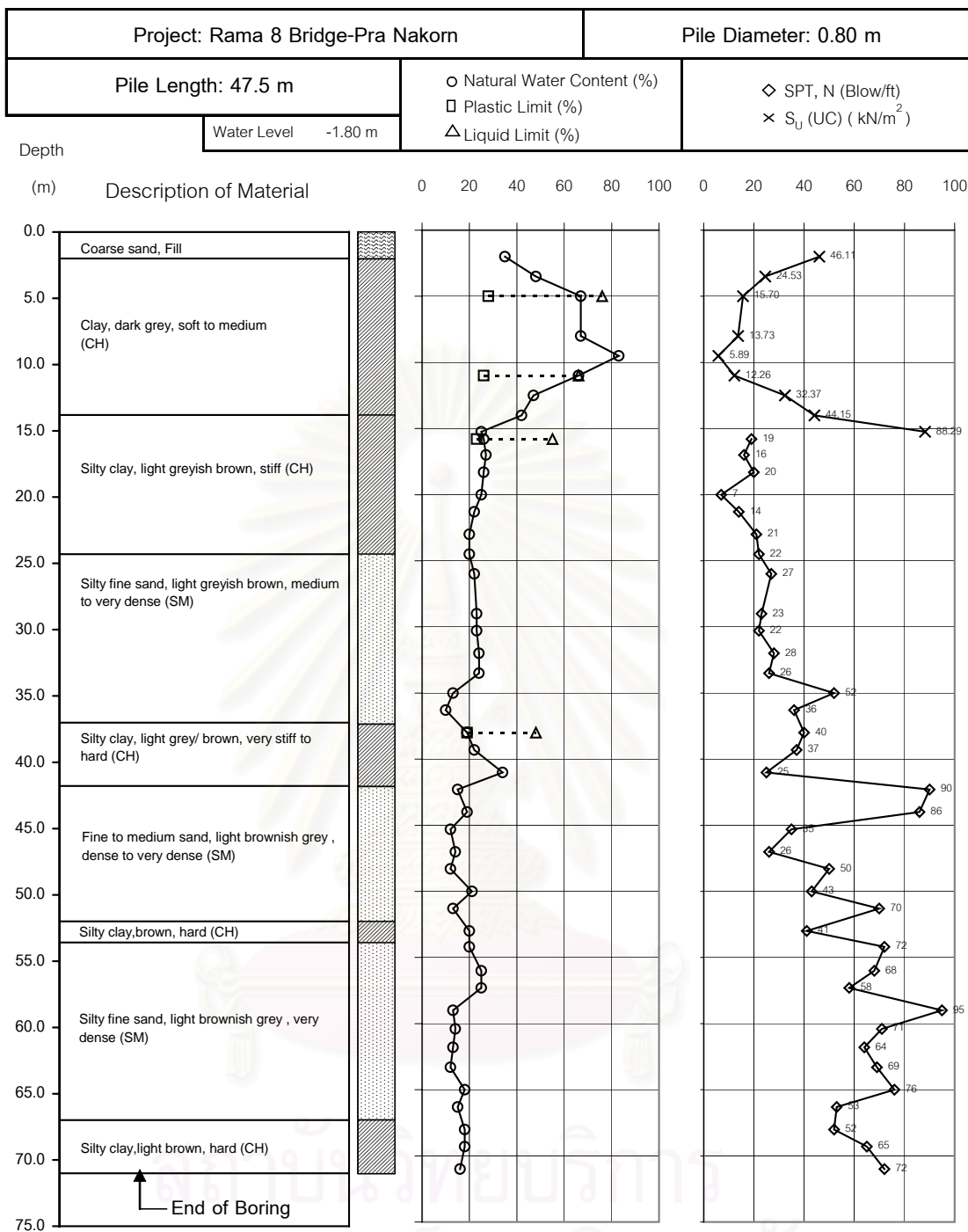
ข้อมูลดินจากโครงการ: MRTA อาคาร Park&Ride



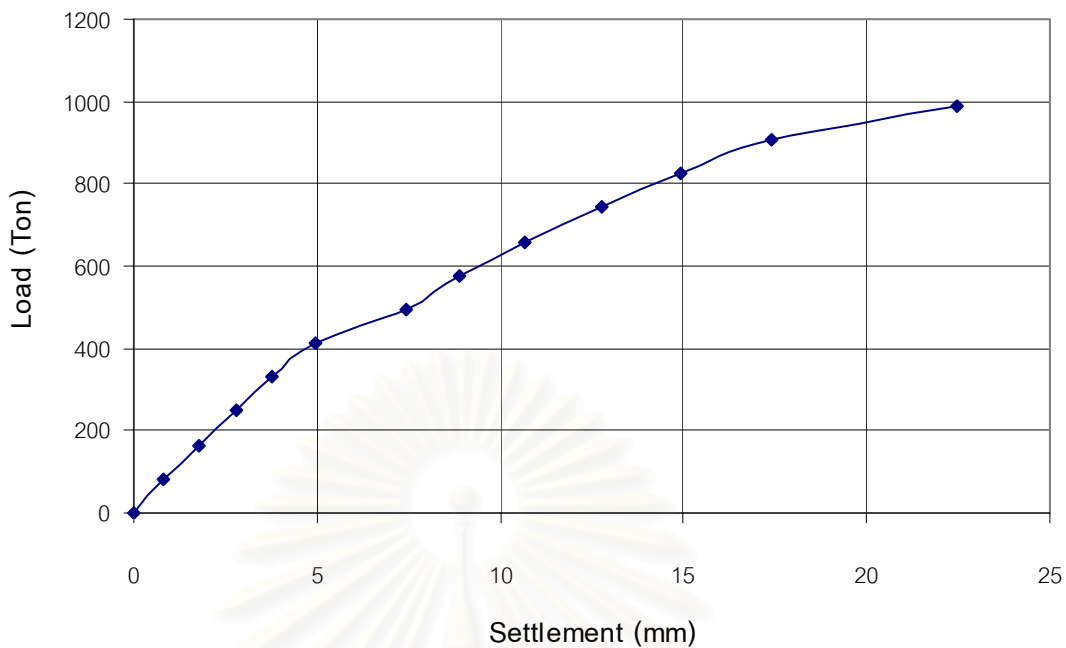
ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับ น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม	สถานที่ทดสอบ: อาคาร Park&Ride
---	-------------------------------



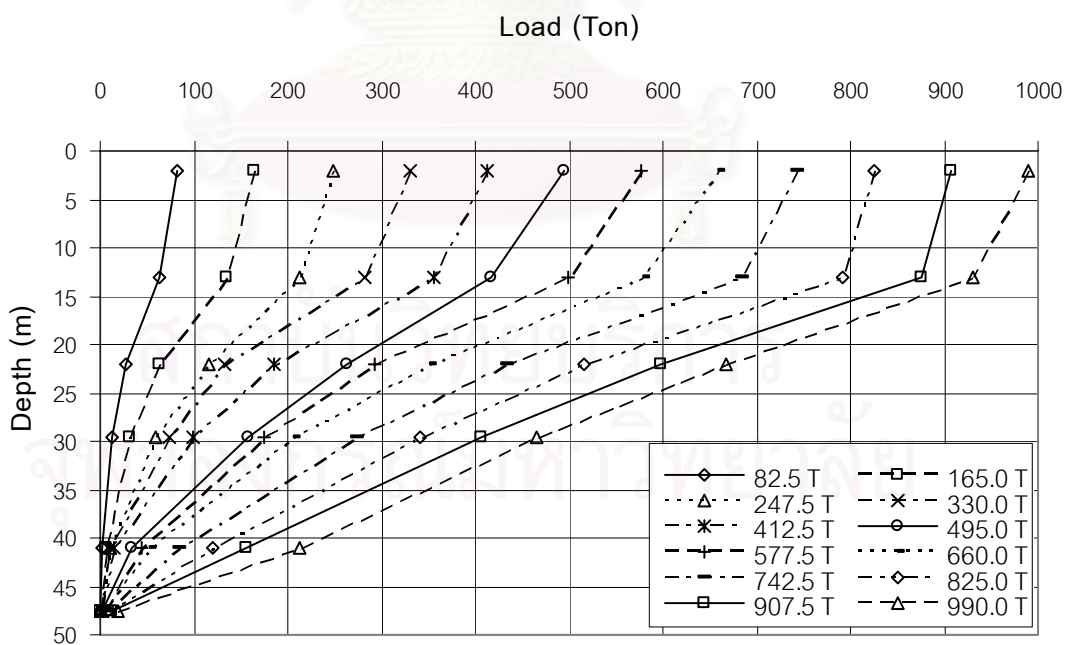
การกระจายแรงในชั้นดินที่ความลึกต่างๆ	สถานที่ทดสอบ: อาคาร Park&Ride
--------------------------------------	-------------------------------



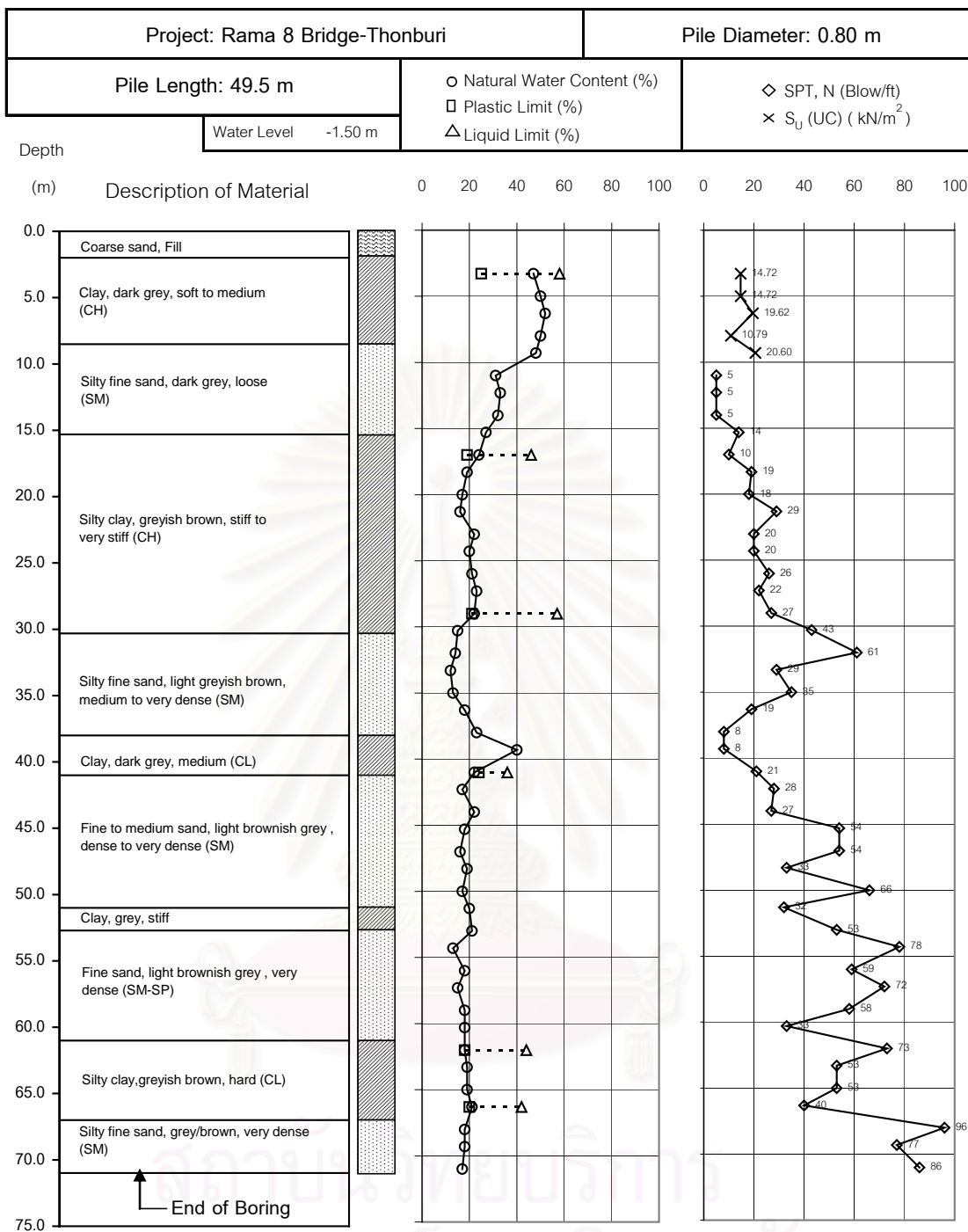
ข้อมูลดินจากโครงการ: สะพานพระราม 8 ฝั่งพระนคร



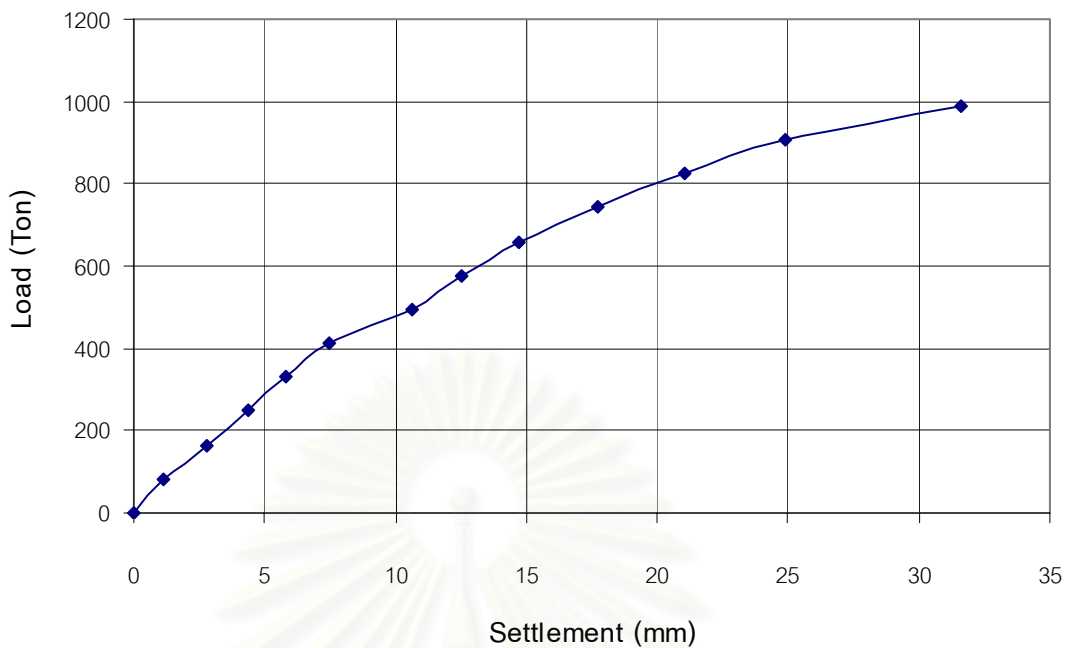
ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับ น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม	สถานที่ทดสอบ: สะพานพระราม 8 ฝั่งพระนคร
---	---



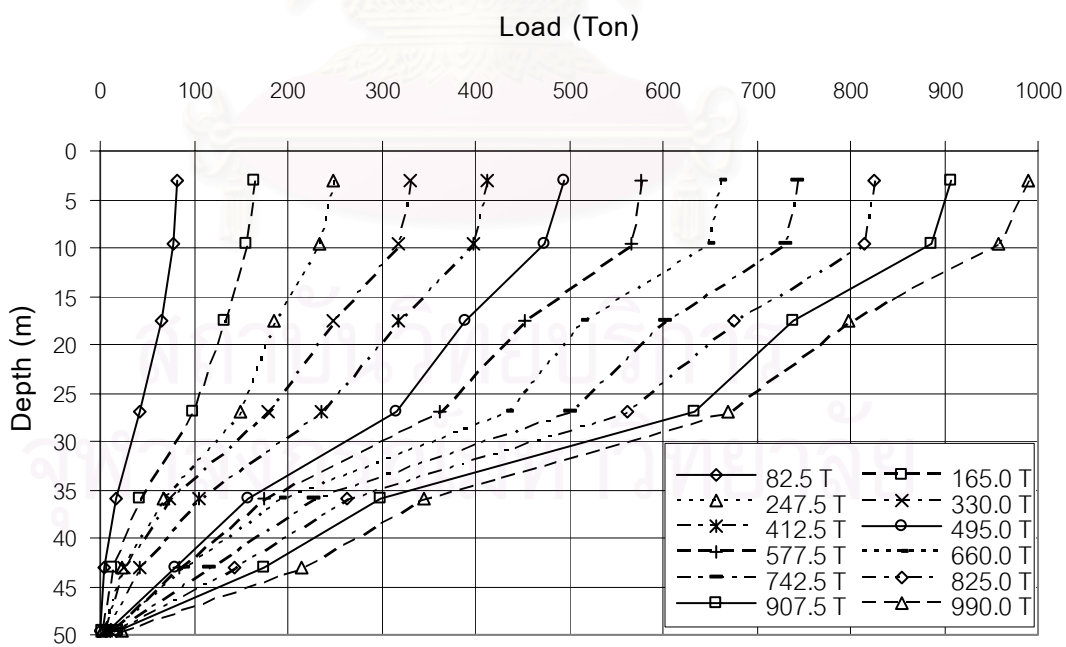
การกระจายแรงในชั้นดินที่ความลึกต่างๆ	สถานที่ทดสอบ: สะพานพระราม 8 ฝั่งพระนคร
--------------------------------------	---



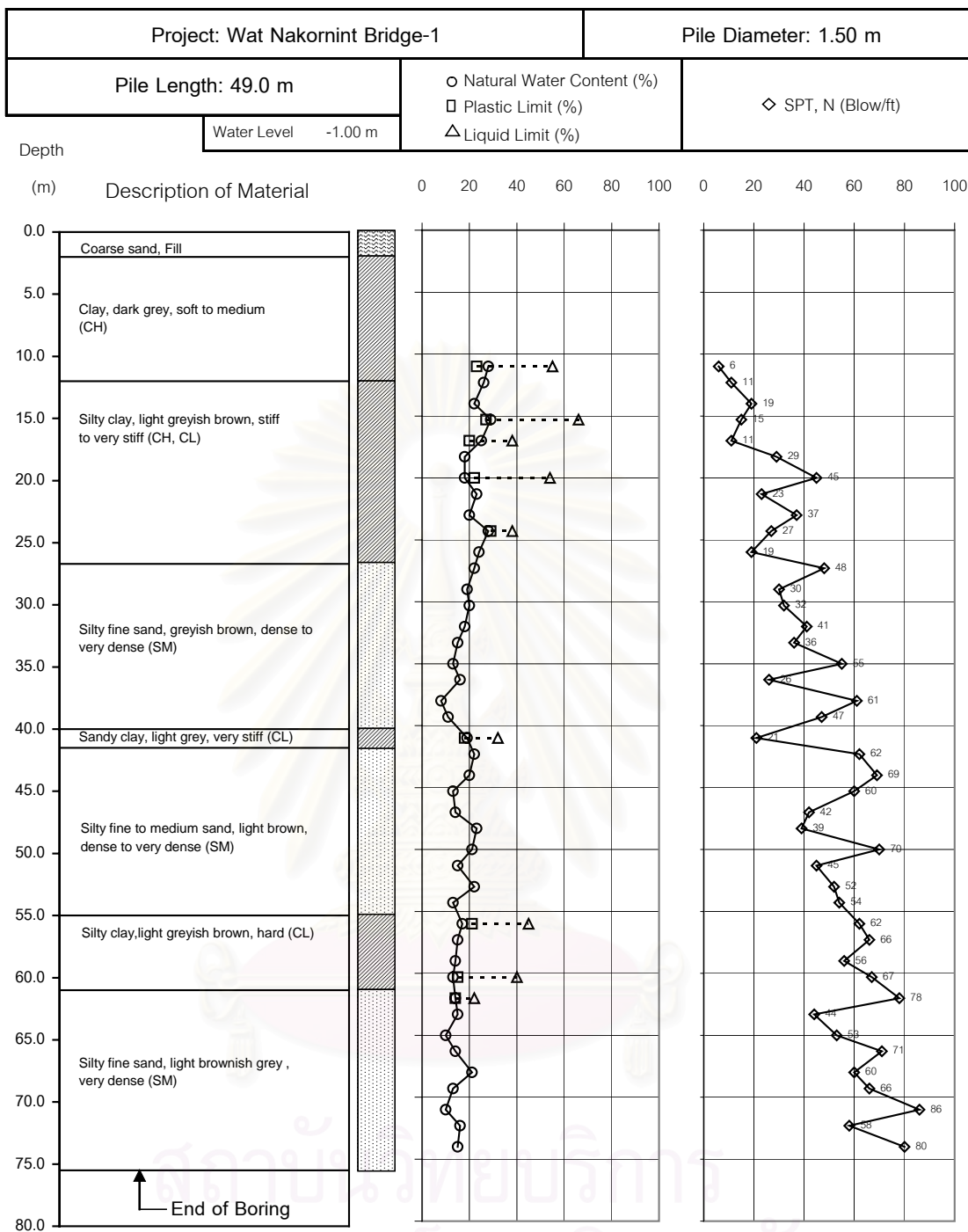
ข้อมูลดินจากโครงการ: สะพานพระราม 8 ฝั่งธนบุรี



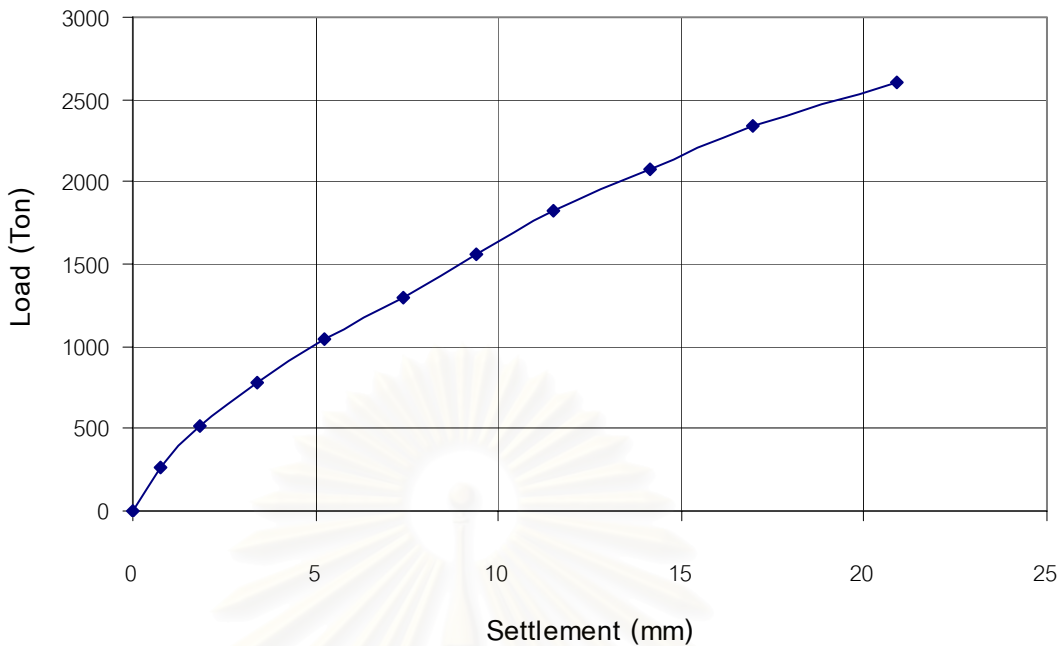
ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับ น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม	สถานที่ทดสอบ: สะพานพระราม 8 ฝั่งธนบุรี
---	---



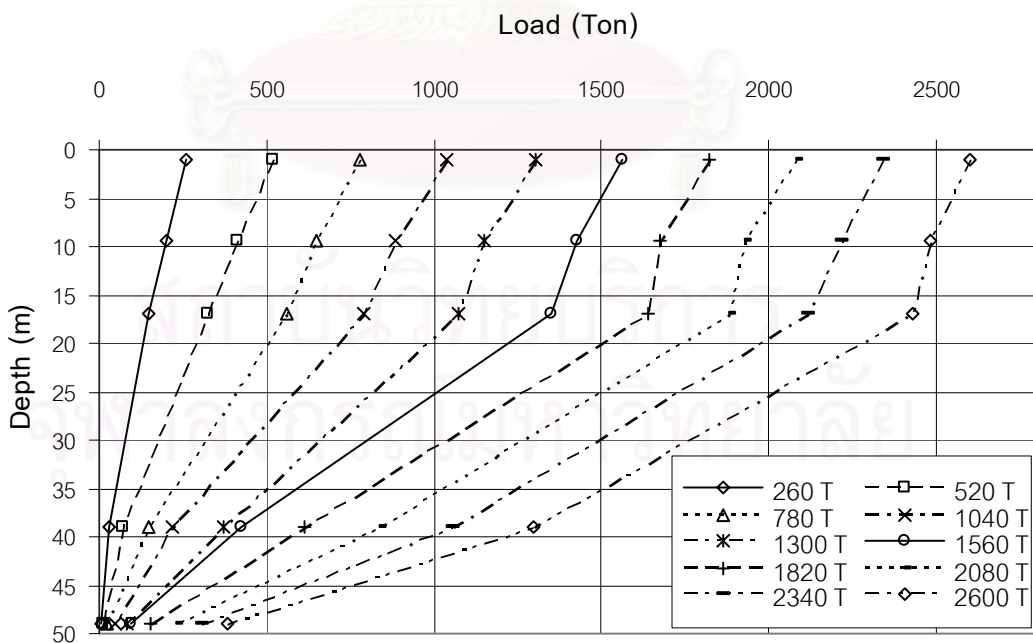
การกระจายแรงในชั้นดินที่ความลึกต่างๆ	สถานที่ทดสอบ: สะพานพระราม 8 ฝั่งธนบุรี
--------------------------------------	---



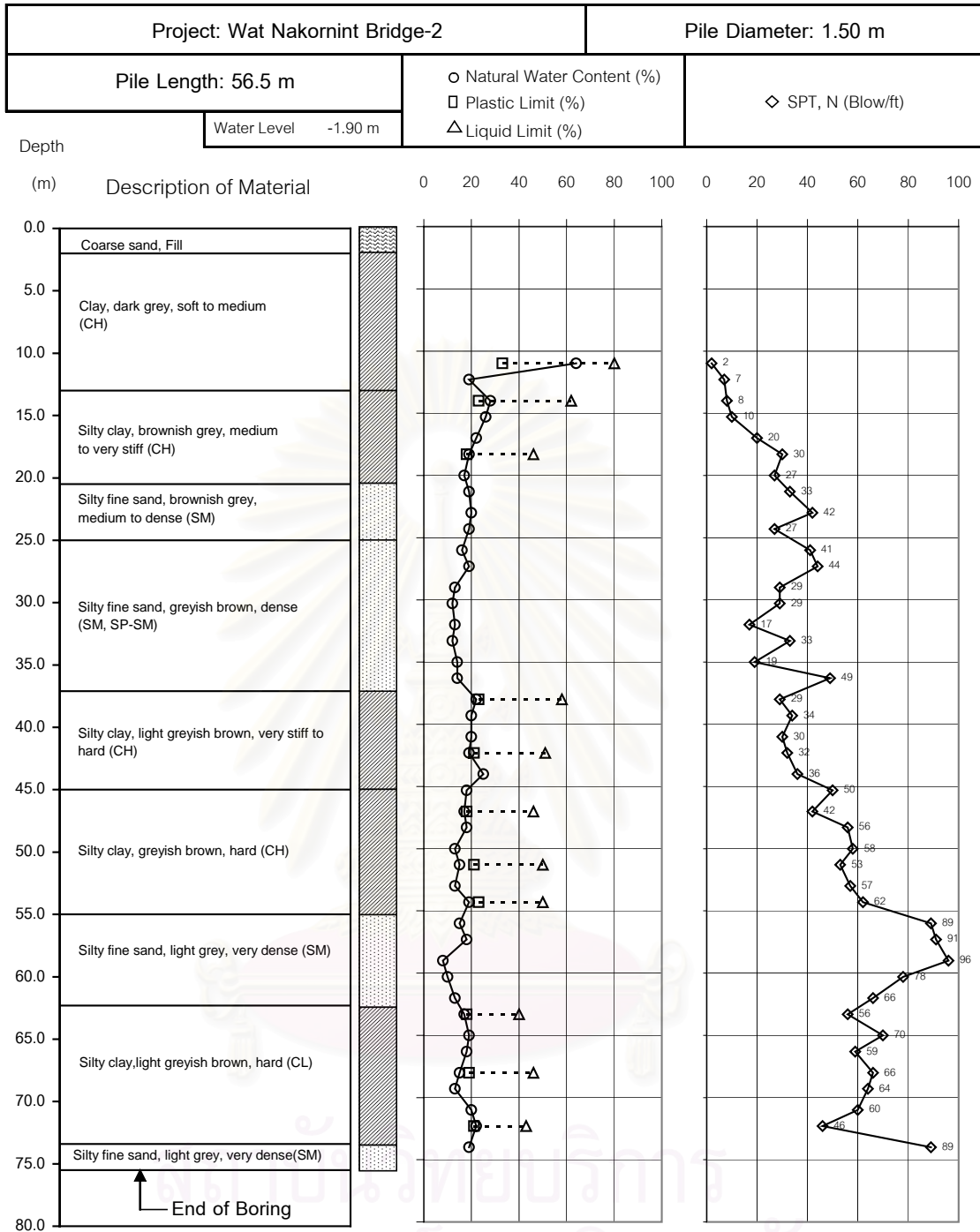
ข้อมูลดินจากโครงการ: สะพานวัดนครอินทร์-1



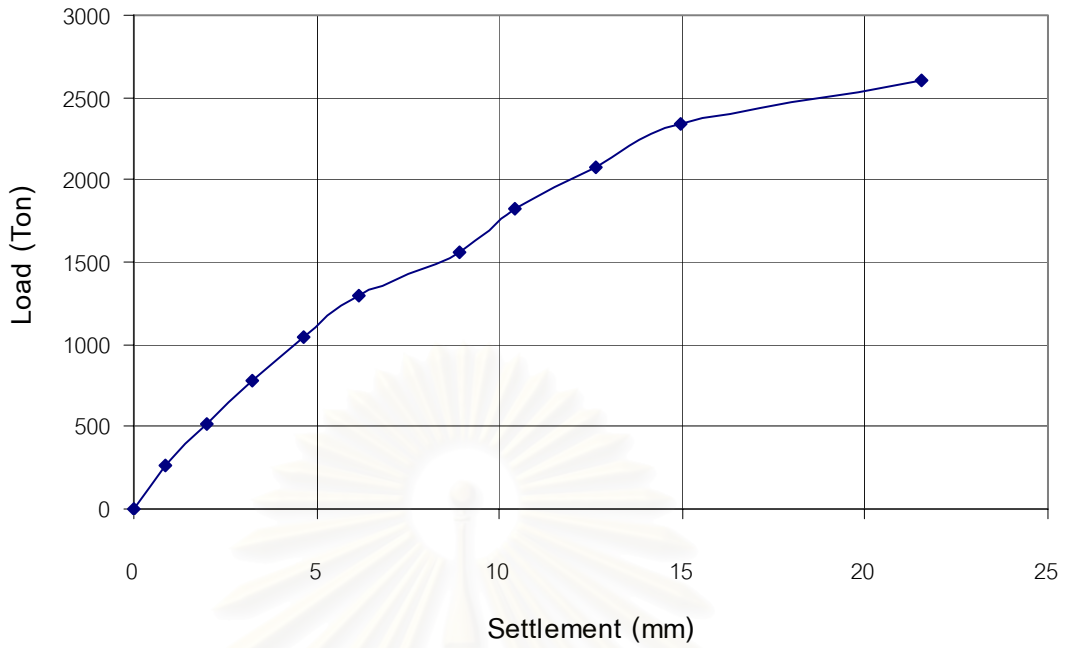
ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับ น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม	สถานที่ทดสอบ: สะพานวัดนครินทร์-1
---	----------------------------------



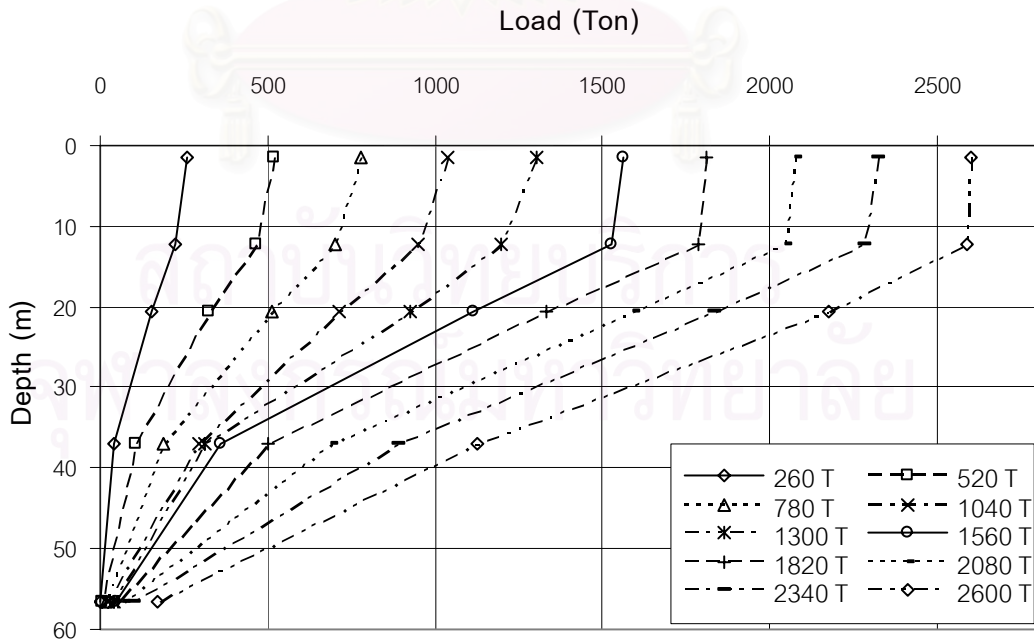
การกระจายแรงในชั้นดินที่ความลึกต่างๆ	สถานที่ทดสอบ: สะพานวัดนครินทร์-1
--------------------------------------	----------------------------------



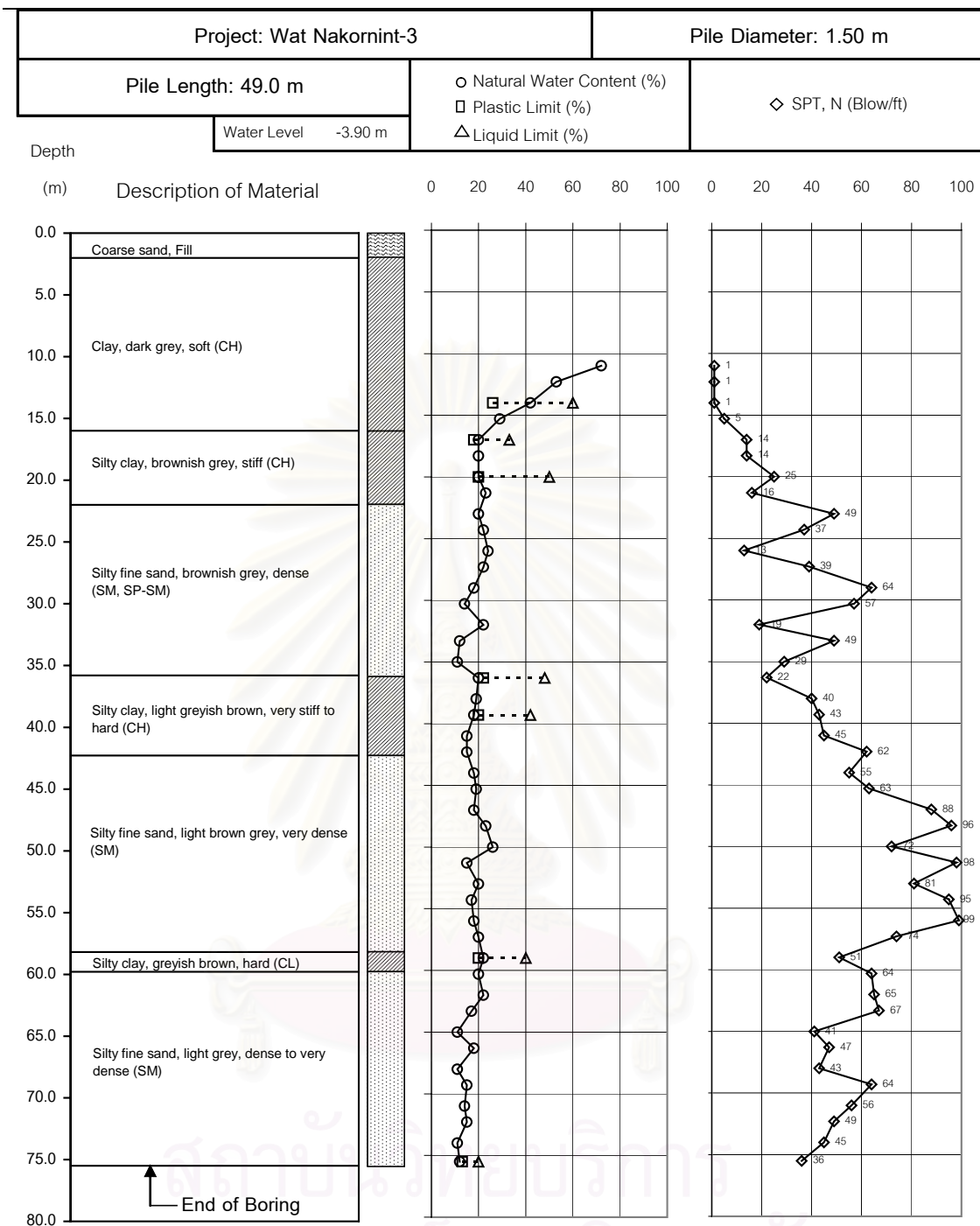
ข้อมูลดินจากโครงการ: สะพานวัดนครอินทร์-2



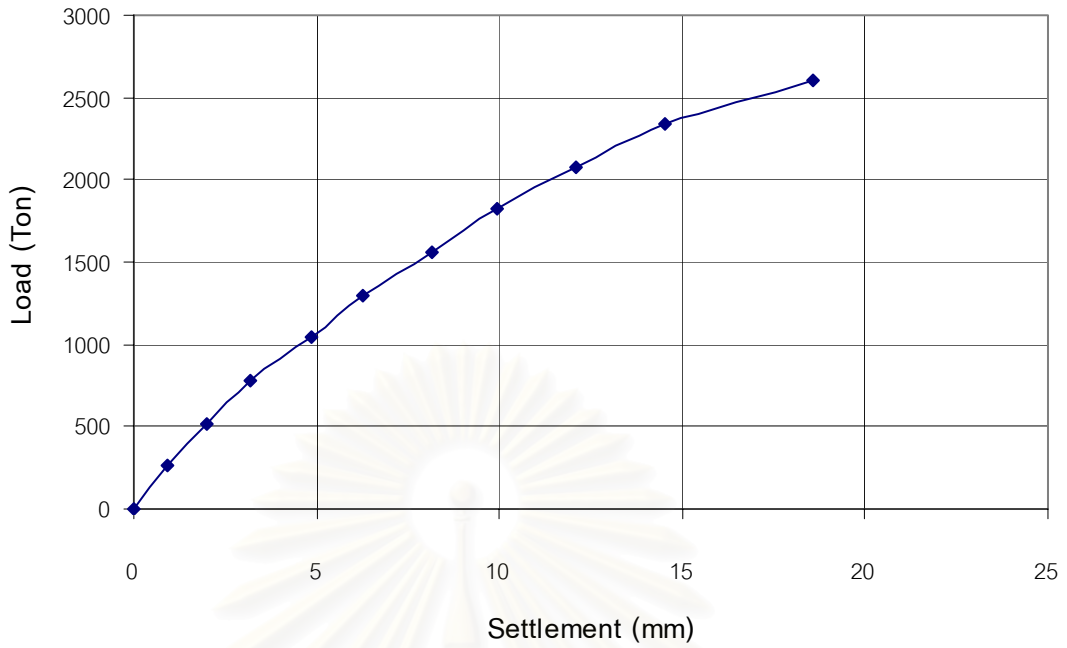
ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับ น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม	สถานที่ทดสอบ: สะพานวัดนครินทร์-2
---	----------------------------------



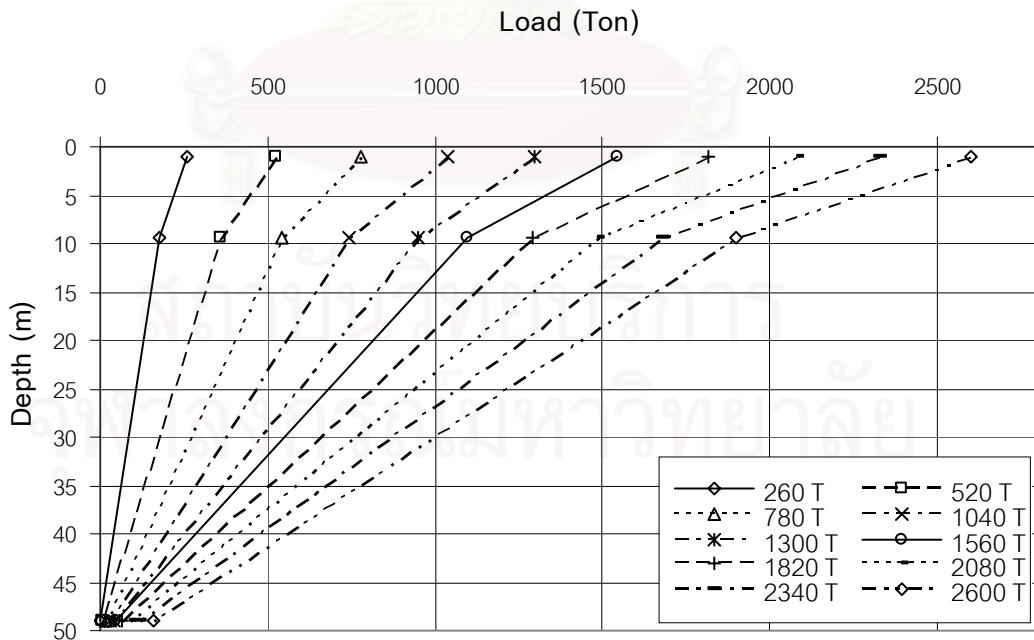
การกระจายแรงในชั้นดินที่ความลึกต่างๆ	สถานที่ทดสอบ: สะพานวัดนครินทร์-2
--------------------------------------	----------------------------------



ข้อมูลดินจากโครงการ: สะพานวัดนครอินทร์-3



ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับ น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม	สถานที่ทดสอบ: สะพานวัดนครินทร์-3
---	----------------------------------



การกระจายแรงในชั้นดินที่ความลึกต่างๆ	สถานที่ทดสอบ: สะพานวัดนครินทร์-3
--------------------------------------	----------------------------------

ประวัติผู้วิจัย

นาย ทยานันท์ บุญยรักษ์ เกิดวันที่ 28 มกราคม พ.ศ. 2519 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เมื่อปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย