

พฤติกรรมเสาะเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ



นายวุฒิชัย ชื่นศิริญ

## ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PERFORMANCE OF BORED PILE USING POLYMER BASE SLURRY IN BANGKOK  
SUBSOILS



Mr. Wuttichai Chuenhirun

คุณย์วิทยธรพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Academin Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสาร  
รักษาเสถียรภาพหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ

โดย

นาย วุฒิชัย ชื่นศิริวัณ

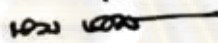
สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์

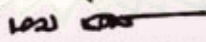
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แก่นักศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวัณวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



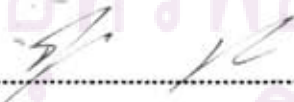
.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวัณวงศ์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์)



.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. จีรวัดิต บุญญะฐิติ)



.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

นายวุฒิชัย ชื่นศิริบุญ : พฤติกรรมเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลิเมอร์เป็นสารรักษา  
เสถียรภาพหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ. (PERFORMANCE OF BORED PILE USING  
POLYMER BASE SLURRY IN BANGKOK SUBSOILS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
รศ. ดร. วันชัย เทพวัชร, 81 หน้า.

ปัจจุบันสารละลายโพลิเมอร์ได้ถูกใช้เป็นสารละลายรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะขณะทำ  
การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในกรุงเทพฯ สารละลายเบนโทไนท์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ  
ก่อให้เกิดแผ่นโคลนข้างหลุมเจาะและก่อให้เกิดการสูญเสียกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสียดทานผิว  
และปลายเสาเข็ม สารละลายโพลิเมอร์มีประโยชน์ไม่เพียงแต่จะเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสียด  
ทานผิว แต่ยังเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกปลายเสาเข็ม เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายเบน  
โทไนท์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประมาณค่า adhesion factor ( $\alpha$ ), friction factor ( $\beta$ ) และ  
 $N_q$  ในการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม งานวิจัยฉบับนี้ได้รวบรวมผลการ  
ทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลิเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพ  
ของหลุมเจาะและมีการติดตั้งเครื่องมือวัดในพื้นที่กรุงเทพฯ ในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมาจนถึง  
ปัจจุบัน เพื่อทำการประมาณค่าพารามิเตอร์  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $N_q$  และการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในแต่ละ  
ชั้นดิน โดยคำนึงถึงความเครียด และความเค้นของเสาเข็มในแต่ละขั้นตอนของการถ่ายน้ำหนัก  
บรรทุกสูงสุด ค่าพารามิเตอร์  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $N_q$  ได้นำเสนอในรูปความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงเฉือนของ  
ดินเหนียว และมุมเสียดทานภายในของทราย ตามลำดับ ผลการวิจัยนี้ได้นำไปสู่การประมาณ  
ความสัมพันธ์ของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกและการทรุดตัวของเสาเข็ม

# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา: วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต: กชกร อึ้งไฉน  
สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: วันชัย เทพวัชร  
ปีการศึกษา: 2551

## 4970585221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : BORED PILE/ POLYMER SLURRY/ BENTONITE SLURRY

WUTTICHAJ CHUENHIRUN : PERFORMANCE OF BORED PILE USING  
POLYMER BASE SLURRY IN BANGKOK SUBSOILS. THESIS PRINCIPAL  
ADVISOR: ASSOC. PROF. WANCHAI TEPARAKSA, D. Eng., 81 pp.

The polymer based slurry is recently used as the hole stabilized fluid during construction of wet process bored pile in Bangkok. The bentonite slurry creates a thick cake film during bored pile construction and reduce the skin friction as well as end bearing capacity of the bored pile. The polymer slurry shows the advantage in increasing of not only skin friction but also end bearing capacity of pile compared to using bentonite slurry. This research aims to verify the adhesion factor( $\alpha$ ), friction factor ( $\beta$ ) and  $N_q$  parameters for estimating bored pile capacity. The data of pile load tests with fully instrumentations were collected in the past 10 years for estimated the  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $N_q$  value as well as the pile displacement in each soil layers. Load transfer was carefully considered based on stress strain relationship with fully mobilization stage. The designed parameters of  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $N_q$  are proposed in terms of undrained shear strength of clay and angle of friction of sand. The approach for prediction of pile capacity and settlement of pile is also discussed and presented.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department: ..... Civil Engineering ..... Student's signature: *Wuttichai Chuenhirun*  
Field of Study: ..... Civil Engineering ..... Advisor's signature: *Wanchai Teeparak*  
Academic year: ..... 2008 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้ที่เกี่ยวข้องในด้านต่างๆ ผู้วิจัยขอแสดงความขอบพระคุณ อันได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรัักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ และ คำปรึกษา แก่ไขจุดบกพร่อง ตลอดจนตรวจตรวจสอบผลงานวิจัยที่ได้ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิระวัตร บุญญะฐิติ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ต่างๆให้กับผู้วิจัย และขอขอบพระคุณ คุณ ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ บริษัท ซีพีแฉับ จำกัด (มหาชน), บริษัท เอสทีเอส อินสตรูमेंท์ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ทำยนี้ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และ คุณปิยมภรณ์ กุลเจษฎากาญจน์ที่คอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ และ ใคร่ขอขอบคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือทุกท่านที่มีได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

คุณย์วิทย์ทรัพย์ากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฑ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ต
บทที่	

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	5
2 ทฤษฎีแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 สภาพัฒนดินกรุงเทพฯ.....	6
2.1.1 ลักษณะัฒนดินกรุงเทพฯ.....	6

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่

2.1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ.....	8
2.1.2.1 ดินเหนียว.....	8
2.1.2.2 ดินทราย.....	10
2.2 ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้ในงานวิจัย.....	14
2.2.1 เสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Base Slurry)	
เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ.....	15
2.2.2 เสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลิเมอร์ (Polymer Base Slurry)	
เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ.....	16
2.2.3 เสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูน (Base Grouted Pile).....	17
2.3 พฤติกรรมของสารรักษาเสถียรภาพ.....	20
2.3.1 พฤติกรรมของเบนโทไนท์.....	20
2.3.2 พฤติกรรมของโพลิเมอร์.....	22
2.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดในเสาเข็มเจาะ.....	25
2.4.1 เกจวัดความเครียด (Vibrating Wire Strain Gage, VWSG).....	26
2.4.2 เครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer).....	27
2.5 การส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากเสาเข็มสู่ดินรอบๆเสาเข็ม.....	28



บทที่

2.5.1 การหาแรงตามแนวแกนโดยเกจวัดความเครียด (Vibrating Wire Strain Gage, VWSG).....	28
2.5.2 การหาแรงตามแนวแกนโดยเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer).....	29
2.6 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว.....	29
2.6.1 วิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method).....	30
2.6.1.1 แรงเสียดทานรอบๆผิวของเสาเข็ม.....	30
2.6.1.1-1 แรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว.....	30
2.6.1.1-2 แรงเสียดทานในชั้นทราย.....	32
2.6.1.2 แรงต้านที่ปลายของเสาเข็ม.....	33
2.6.1.2-1 แรงต้านที่ปลายของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว.....	34
2.6.1.2-2 แรงต้านที่ปลายของเสาเข็มในชั้นทราย.....	35
2.6.2 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Pile Load Test).....	36
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	40
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
3.1.1 เสาเข็มเจาะ.....	41

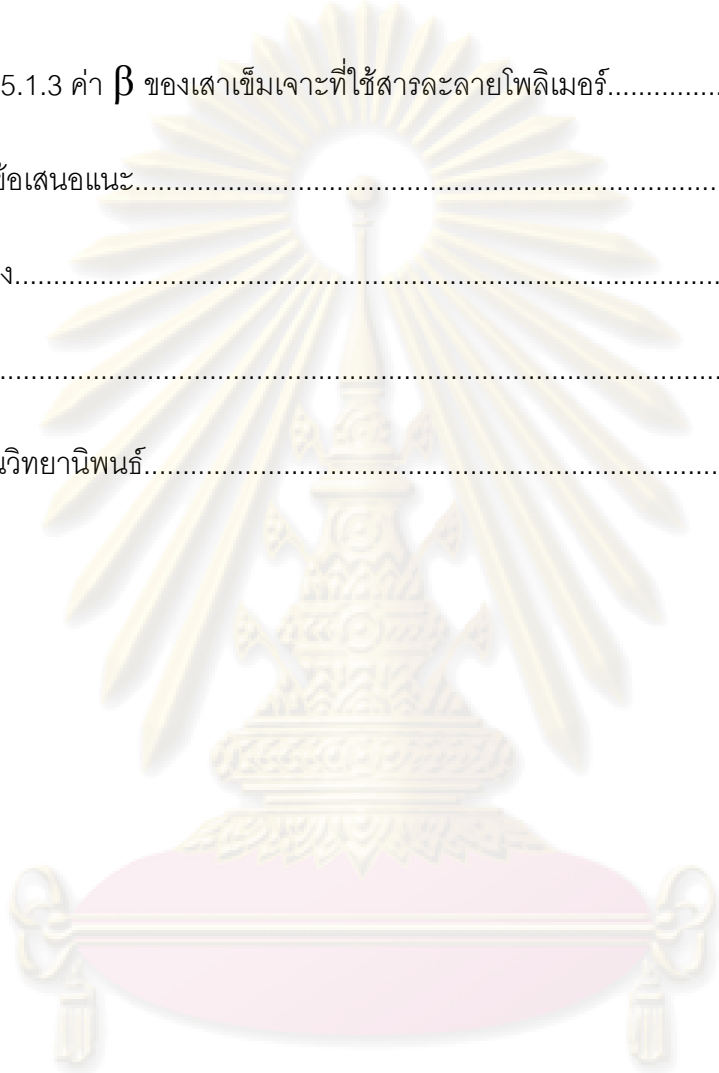
บทที่

3.1.2	ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน.....	42
3.1.3	วิธีการวิเคราะห์และข้อจำกัดในการวิเคราะห์.....	42
3.2	การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม.....	42
3.2.1	ชั้นดินเหนียว.....	42
3.2.2	ชั้นดินทราย.....	43
3.3	การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายของเสาเข็ม.....	43
4	การวิเคราะห์และอภิปรายผลการวิจัย.....	45
4.1	การแปรผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม.....	45
4.2	การประมาณแรงเสียดทานด้านข้าง.....	45
4.2.1	ชั้นดินเหนียว.....	45
4.2.1.1	เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลาย ของเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง .....	46
4.2.1.2	เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลาย ของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง.....	47
4.2.2	ชั้นดินทราย.....	48
4.2.2.1	เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลาย ของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่สอง.....	48

4.2.2.2	เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลาย ของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง.....	49
4.3	การประมาณค่าแรงต้านที่ปลายเข็ม.....	50
4.3.1	เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลาย ของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่สอง.....	51
4.3.2	เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลาย ของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง.....	51
4.4	การประมาณค่า Load – Deformation เบื้องต้นสำหรับเสาเข็มเจาะ ที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ....	52
4.5	การเปรียบเทียบและการอภิปรายค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็ม.....	61
4.5.1	ค่า adhesion factor ( $\alpha$ ).....	61
4.5.2	ค่า friction factor ( $\beta = K_s \tan \delta$ ).....	63
4.5.3	ค่าสัมประสิทธิ์รับแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นทราย ( $N'_q$ ).....	64
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	65
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	65
5.1.1	การแปรผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม.....	65

บทที่

5.1.2 ค่า $\alpha$ ของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์.....	65
5.1.3 ค่า $\beta$ ของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
รายการอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	81



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าของ $K_s$ ในกรณีต่างๆ.....	32
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุม เจาะที่รวบรวมได้.....	40
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Bearing Capacity, $N'_c$ .....	52
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	58

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (ว.ส.ท. 2520).....	6
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนครั้งในการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (N) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Su) ของชั้นดินกรุงเทพฯ (แมนสรวง, มนัสพลและณัฐพล, 2540).....	9
รูปที่ 2.3 แรงดันน้ำในมวลดินสำหรับกรุงเทพฯ เมื่อมีการสูบน้ำบาดาล (พ.ศ. 2542).....	11
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนครั้งต่อการทดสอบทะลุมาตรฐานที่ปรับแก้แล้ว (NCR) กับ ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน ( $\phi'$ ) (Peck, Hanson & Thornburn , 1974).....	13
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_N$ กับค่า $\sigma'_{vi}$ (Peck, Hanson & Thornburn , 1974).....	14
รูปที่ 2.6 ระบบการอัดฉีดน้ำปูนแผ่นราบ (Flat Plate).....	18
รูปที่ 2.7 ระบบการอัดฉีดน้ำปูนแบบท่ออยู่ (Tube-A-Manchette หรือ U-Tube).....	19
รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของเบนโทไนท์ผงและเมื่อผสมกับน้ำ.....	21
รูปที่ 2.9 วงน้ำ (Double Layer) ของอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle), ทยานันท์ (2544).....	21
รูปที่ 2.10 การเกิดเยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake) ในชั้นทรายของสารละลายเบนโทไนท์.....	22
รูปที่ 2.11 โพลีเมอร์แบบผง (Powder Polymer).....	23
รูปที่ 2.12 โพลีเมอร์แบบผง (Powder Polymer) เมื่อผสมกับน้ำ.....	23
รูปที่ 2.13 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อสารละลายโพลีเมอร์อยู่ในหลุมเจาะ.....	24

หน้า

รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับการเคลื่อนตัวที่แรงดันเซลล์  
(Confining Pressure) ต่างๆ ของเสาเข็มจำลอง (Farmer and Goldberg, 1969)...25

รูปที่ 2.15 ลักษณะของเกจวัดความเครียด (Vibrated Wire Strain Gage, VWSG).....26

รูปที่ 2.16 การติดตั้งเกจวัดความเครียด (VWSG) ที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงชั้นดิน.....27

รูปที่ 2.17 ลักษณะของเครื่องมือวัดการทอดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer).....27

รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) ของดินเหนียวกรุงเทพฯ กับค่า  
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเหนียว ( $\alpha$ ), ทยานันท์ 2544.....31

รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{\tan} \delta$  กับมุม  $\phi'$  ของชั้นทรายกรุงเทพฯ (ชาญชัย,  
2542).....33

รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็ม  $N'_q$   
กับค่ามุมแรงเสียดทานภายใน  $\phi'$  (Pimpasugdi, 1989).....36

รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็ม  $N'_q$   
กับค่ามุมแรงเสียดทานภายใน  $\phi'$  (ชาญชัย, 2542).....36

รูปที่ 2.22 วิธีการหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของ Bulter & Hoy (1977).....37

รูปที่ 2.23 วิธีการหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของ Mazurkiewicz (1972).....38

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า adhesion factor,  $\alpha$  กับ Undrained Shear Strength,  $S_u$   
ของเสาเข็มที่ไม่มีการอัด ฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นทราย  
ชั้นที่สอง.....46

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า adhesion factor,  $\alpha$  กับ Undrained Shear Strength,  $S_u$  ของเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง.....47

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับ  $\phi'$  ของเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่สอง.....49

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับ  $\phi'$  ของเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง.....50

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N'_q$  กับ  $\phi'$  ของเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่สอง.....51

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานกับความเครียดในแต่ละชั้นดินสำหรับเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ.....54

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเข็มกับความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณหัวเข็มสำหรับเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ.....57

รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบระหว่างผลการประมาณค่า Load – Deformation กับค่าที่บันทึกได้.....59



- รูปที่ 4.9 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  กับ  $S_u$  ของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์  
และสารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุม โดยที่ปลายของเสาเข็ม  
ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนและอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง.....62
- รูปที่ 4.10 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  กับ  $S_u$  ของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์  
และสารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุม โดยที่ปลายของเสาเข็ม  
ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนและอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง.....62
- รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่า  $\phi'$  สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน  
ที่ปลายเข็มในชั้นทรายชั้นที่สองในชั้นดินกรุงเทพฯ.....63
- รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N'_c$  กับค่า  $\phi'$  สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน  
ที่ปลายเข็มในชั้นทรายชั้นที่สองในชั้นดินกรุงเทพฯ.....64

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$A$	=	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม
$A_s$	=	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม
$A_g$	=	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม
$(AE)_p$	=	ค่าสติฟเนสเทียบเท่ากับเสาเข็ม (Equivalent Pile Stiffness)
$B$	=	ความชันของเส้นโมดูลัสสัมผัส (tangent modulus line)
$C$	=	จุดตัดแกน $y$ ของเส้นโมดูลัสสัมผัส (tangent modulus line) คือค่าโมดูลัสสัมผัสเริ่มแรก (initial tangent modulus)
$C_N$	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง
$D$	=	ระดับความลึกที่พิจารณา
$D_b$	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ปลายเข็ม
$E_s$	=	โมดูลัสเฉพาะจุดของวัสดุประกอบ (secant modulus of composite pile material)
$E_{st}$	=	อีลาสติกโมดูลัสของเหล็กเสริม
$E_c$	=	อีลาสติกโมดูลัสของคอนกรีต
$f_s$	=	หน่วยแรงเสียดทาน
$K_s$	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างระหว่างเสาเข็มกับทราย
$L$	=	ความยาวเสาเข็ม
$P$	=	น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดการทรุดตัว

$P_i$	=	แรงตามแนวแกน ณ จุดที่ทำการติดตั้ง VWSG ที่ระดับ $i$
$Q_f$	=	แรงเสียดทานรอบๆของผิวเสาเข็ม
$Q_e$	=	แรงต้านที่ปลายของเสาเข็ม
$Q_{ult}$	=	ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย
$q_e$	=	หน่วยแรงกำลังต้านทานที่ปลายเข็ม
$N$	=	จำนวนครั้งในการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value)
$N_{CR}$	=	ค่า $N$ ที่ได้ทำการปรับแก้แล้ว
$N'_c$	=	สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว (Bearing Capacity Factor)
$N'_q$	=	สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นดินทราย (Bearing Capacity Factor)
$OCR$	=	อัตราส่วนอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidated Ratio)
$S_u$	=	ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
$u$	=	แรงดันน้ำในมวลดิน
$w_n$	=	ปริมาณความชื้น (Water Content)
$W_p$	=	น้ำหนักของเสาเข็ม
$\sigma_{v0}$	=	หน่วยแรงรวมประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical Total Stress)
$\sigma'_{v0}$	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical Effective Stress)
$\sigma'_{vi}$	=	หน่วยแรงประสิทธิผลที่กึ่งกลางชั้นดินที่ทำการพิจารณา

- $\alpha$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเหนียว (adhesion factor)
- $\beta$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของทราย (friction factor)
- $\delta$  = มุมเสียดทานระหว่างทรายกับเสาเข็ม
- $\phi'$  = มุมต้านทานภายในของดิน (Angle of Internal Resistance)
- $\epsilon_i$  = ค่าความเครียดที่วัดได้ (measured strain) ณ จุดที่ทำการติดตั้ง WSG ที่ระดับ i



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและปัญหา

ปัจจุบันการก่อสร้างเสาเข็มมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี และเทคนิคการก่อสร้างไปมาก ซึ่งนิยมนำเสาเข็มมาใช้เพื่อเป็นฐานรากอาคารทั้งในกรุงเทพฯ และต่างจังหวัด การก่อสร้างอาคารในปัจจุบันนิยมที่จะทำอาคารสูง ซึ่งทำให้เสาเข็มที่จะมารองรับฐานรานั้นมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถรองรับน้ำหนักได้มาก และเกิดการทรุดตัวน้อย ดังนั้นเสาเข็มเจาะระบบเปียกจึงถูกนำมาเลือกใช้ แต่ด้วยความที่เมื่อเสาเข็มเจาะทำการเจาะไปได้ถึงระดับที่หลุมเจาะไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของตัวเองได้ ทางเทคนิคการก่อสร้างจึงจำเป็นต้องใส่สารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะลงไป เพื่อที่จะทำให้หลุมเจาะมีเสถียรภาพ ไม่เกิดการพังทลาย

ในอดีตนั้นการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกนิยมนำที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ แต่เนื่องจากสารละลายเบนโทไนท์นั้นมีข้อเสียคือทำให้เกิดเยื่อที่บับน้ำ (Filter Cake) ในชั้นทราย และถ้าเยื่อที่บับน้ำมีความหนามากและถ้าความแข็งของเยื่อที่บับน้ำมีค่าสูงกว่าแรงครูดของคอนกรีตที่ทำการเทเสาเข็มเจาะใต้น้ำ (Tremie Method) จะทำให้เยื่อที่บับน้ำลงเหลืออยู่ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้แรงเสียดทานด้านข้าง (Unit Skin Friction) ของเสาเข็มลดลง ทำให้การรับกำลังของเสาเข็มนั้นลดลง มีปัญหาในด้านความยุ่งยากในการใช้งานในสนามจริง และนอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหา Soft Base (Teparaksa, 1999) อีกด้วย ดังนั้นต่อมาจึงได้มีการนำสารละลายโพลีเมอร์มาใช้เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะแทน (Teparaksa, 2001)

สารละลายโพลีเมอร์นั้นจะไม่ก่อให้เกิดชั้นเยื่อที่บับน้ำ (Filter Cake) ขึ้นในชั้นทราย และสารละลายโพลีเมอร์นั้นจะมีโครงสร้างบางส่วนเข้าไปช่วยให้ทรายมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้นชั่วคราว ดังนั้นจึงทำให้กำลังรับแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มมีค่าสูงกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

สารละลายเบนโทไนท์ และสารละลายโพลีเมอร์ จะมีความแตกต่างกันอีกเรื่องคือวิธีการที่จะทำการกำจัดตะกอนก้นหลุม ซึ่งสารละลายเบนโทไนท์นั้นจะทำให้ทรายละเอียดเกิดการ

แขวนลอย จึงจำเป็นเมื่อมีการเทคอนกรีตจะต้องทำการเทไล่ตะกอนก้นหลุมให้ขึ้นมาโดยการใช้อุปกรณ์เป่าลม (Air Lift) และจะต้องนำสารละลายเบนโทไนท์ที่ขึ้นมามาผ่านเครื่องกรองทราย (Desander) เพื่อทำการแยกตะกอนออกไปจากสารละลายเบนโทไนท์ ก่อนที่จะนำสารละลายเบนโทไนท์กลับไปใช้ใหม่อีกครั้ง แต่ส่วนมากตะกอนที่ถูกทำการกรองออกจากสารละลายนั้นก็จะมีบางส่วนที่ล่องเหลือ หรือตกค้างอยู่ทำให้คุณสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ค่อยๆเปลี่ยนแปลงไป และเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีกหลายครั้งก็จะทำให้คุณสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน จึงจำเป็นที่จะต้องทิ้งสารละลายนั้นไป และดินที่ถูกขุดขึ้นมาโดยใช้สารละลายเบนโทไนท์ในการเจาะนั้นจะอยู่ในสภาพเหลวมาก ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากต่อการขนย้าย แต่ในส่วนของสารละลายโพลีเมอร์นั้น เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์นั้นจะทำการจับตัวกับทรายละเอียดทำให้มีขนาดเม็ดใหญ่ขึ้น จนเกิดการตกตะกอนลงมาที่ก้นหลุม ทำให้ในการทำความสะอาดตะกอนจึงใช้เพียงแค่ถังเก็บตะกอน (Cleaning Bucket) ในการกำจัดตะกอน และในการกรองทรายออกนั้น เนื่องจากปริมาณทรายที่รวมอยู่กับสารละลายนั้นมีปริมาณน้อยมาก เพราะส่วนใหญ่ทรายจะถูกสารละลายโพลีเมอร์จับ และตกตะกอนไปแล้ว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะต้องทำการกรองทรายออกจากสารละลายโพลีเมอร์ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เรื่อยๆ เพียงแต่ต้องทำการตรวจสอบคุณสมบัติและการปรับแต่งคุณภาพของสารละลายโพลีเมอร์ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเป็นประจำ ก่อนที่จะนำกลับไปใช้ใหม่ และดินที่ถูกขุดขึ้นมาที่อยู่ในสภาพของดินที่เปียกน้ำ จึงทำให้ง่ายต่อการขนย้ายมากกว่าการใช้สารละลายโพลีเมอร์

ในด้านการใช้งานในสนามนั้นสารละลายโพลีเมอร์นั้นจะใช้ปริมาณที่น้อยกว่าสารละลายเบนโทไนท์มาก ประมาณ 40 – 50 เท่า จึงทำให้การใช้สารละลายโพลีเมอร์นั้นประหยัดทั้งค่าใช้จ่ายในการซื้อ การขนส่ง การขนย้าย และพื้นที่ในการจัดเก็บ แต่ในการใช้งานจริงไม่สามารถที่จะใช้สารละลายโพลีเมอร์เพียงอย่างเดียวได้เนื่องจากจะเกิดการสูญหายไปในพื้นที่ทรายเป็นจำนวนมาก จึงจำเป็นที่จะต้องมีการผสมสารเบนโทไนท์เข้าไปเพื่อให้เกิดเยื่อหุ้มที่บับน้ำ (Filter Cake) ขึ้นเพื่อป้องกันการสูญหายของสารละลายโพลีเมอร์

ในด้านการออกแบบเสาเข็มเจาะเพื่อกำหนดหน้าตัด และความยาวของเสาเข็มนั้นให้เหมาะสมกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ และค่าการหลุดตัวที่เกิดขึ้นยอมรับได้และสภาพชั้นดินของบริเวณที่จะก่อสร้าง จำเป็นที่จะต้องอาศัยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ค่า adhesion factor ( $\alpha$ ),



2. เพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์หากลัจากเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ กับ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ(ชาญชัย, 2542)

3. เสนอความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์  $\alpha$  กับ  $\beta$  เสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

เนื่องจากในการวิเคราะห์หาแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม (Skin Friction) และแรงต้านที่ปลายเข็ม (End Bearing Resistance) จากข้อมูลการทดสอบนั้นกระทำได้ยากมาก เพราะจะต้องมีทฤษฎีมากมายในการรองรับ ดังนั้นสิ่งจำเป็นที่สุดคือการหาฐานข้อมูล (Data Base) ที่ดีก่อน โดยจะต้องทำการกำหนดขอบเขตของฐานข้อมูลที่จะทำการศึกษา ซึ่งฐานข้อมูลที่ถูกต้องนั้นจะต้องนำมาจากข้อมูลของเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดครบถ้วน (Fully Instrumented Pile)

งานวิจัยนี้จึงได้มีการกำหนดขอบเขตของข้อมูลโดยการรวบรวมข้อมูลของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะย้อนหลังไป 10 ปี โดยเลือกเฉพาะข้อมูลของเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดทางธรณีเทคนิคที่สมบูรณ์เท่านั้น และงานวิจัยนี้จึงเกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมการส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ โดยมีการติดตั้งเครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิคที่สมบูรณ์ภายในตัวของเสาเข็ม เพื่อวัดค่าแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในเสาเข็มในขณะที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำอยู่บนเสาเข็ม แล้วทำการแยกหาค่าแรงเสียดทานด้านข้าง และแรงต้านทานที่ปลายของเสาเข็ม เพื่อนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด จะมี 3 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้



1. การวิเคราะห์หาแรงที่เกิดขึ้นภายในเสาเข็มนั้นจะทำการวิเคราะห์กลับมาจากการหา สติฟเนสของเสาเข็ม (Pile Stiffness) โดยใช้วิธีของ Fellenius 's Method, 1989 แล้ว จึงทำการคำนวณกลับหาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในเสาเข็ม
2. นำเสนอค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม เจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะซึ่งได้แก่ค่า adhesion( $\alpha$ ), friction factor( $\beta$ ) และค่า Bearing Capacity Factor ( $N_q$ ) แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากงานวิจัยของเสาเข็มเจาะที่ใช้ สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ(ชาญชัย, 2542)
3. ประมาณค่า Load – Deformation เบื้องต้นสำหรับเสาเข็มเจาะที่มีปลายในชั้นดินเหนียว และดินทรายในชั้นดินกรุงเทพฯ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาข้อมูลในการส่งถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะโดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดอย่างสมบูรณ์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ(ชาญชัย, 2542) ซึ่งภายหลังจากการวิเคราะห์ผลตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยจะสามารถทราบรายละเอียดในแต่ละประเด็นดังนี้

- ทราบพฤติกรรมการส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากเสาเข็มเจาะสู่ดินรอบๆ ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบเสาเข็มเจาะได้เหมาะสมมากขึ้น
- สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ และการคำนวณระบบฐานรากเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ
- ทำให้ทราบว่าในการใช้สารละลายต่างชนิดกันในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ นั้นมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

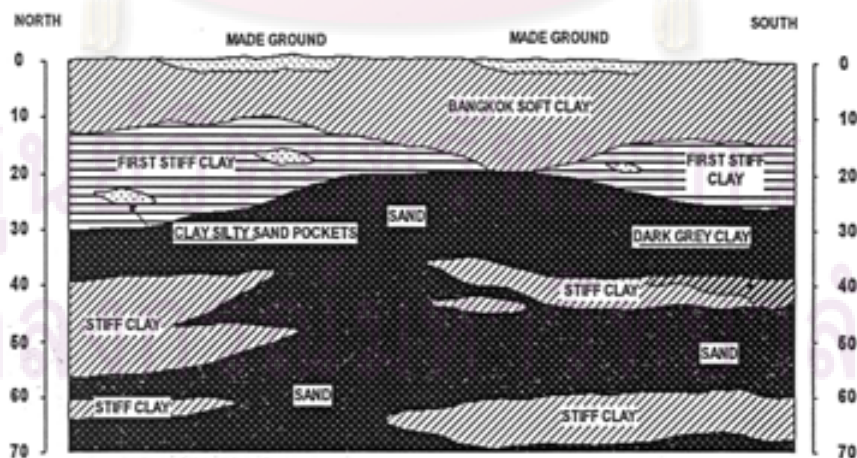
#### 2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพฯ

สภาพของชั้นดินกรุงเทพฯ นั้นจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ เนื่องจากดินกรุงเทพฯ เกิดจากการตกตะกอนของดิน (Transported Soil) ซึ่งประกอบไปด้วยตะกอนทะเล (Marine Deposit) และตะกอนปากแม่น้ำ (Alluvial) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชั้นดินราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา

ตัวเมืองกรุงเทพฯ นั้นจะตั้งอยู่บนสองฝั่งของแม่น้ำเจ้าพระยา โดยอยู่ห่างจากอ่าวไทยประมาณ 20 กิโลเมตร ซึ่งมีระยะทางจากเหนือถึงใต้ 250 กิโลเมตร และจากตะวันออกไปถึงตะวันตกประมาณ 200 กิโลเมตร พื้นที่รวมประมาณ 53,400 ตารางกิโลเมตร (ว.ส.ท., 2520)

##### 2.1.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ

ลักษณะของชั้นดินกรุงเทพฯ นั้นที่ผ่านมามีการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติทางวิศวกรรม และทางกายภาพของชั้นดินกรุงเทพฯ เอาไว้มากมาย ซึ่งสามารถที่จะสรุปลักษณะของชั้นดินแต่ละชั้นจากผิวดิน ได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (ว.ส.ท. 2520)

1. ดินชั้นบน (Top Soil or Weathered Bangkok Clay) มีลักษณะเป็นดินเหนียวสีเทา และน้ำตาล มีความหนาของชั้นดินประมาณ 1-2 เมตร เนื่องจากดินชั้นนี้ถูกแปรสภาพมากโดยกระบวนการเสื่อมสลาย (Aging) จึงมีสภาพความแข็งปานกลาง และจะไม่ค่อยพบดินลักษณะนี้ในบริเวณพื้นที่อ่าวไทย
2. ชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงแข็งปานกลาง (Very Soft to Medium Stiff Marine Clay) มีลักษณะเป็นดินเหนียวสีเทาเข้มหรือเทาปนเขียว มีความหนาของชั้นดินประมาณ 10-15 เมตร และมีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) ประมาณ 1-2 ตันต่อตารางเมตร เนื่องจากดินชั้นนี้เกิดจากการตกตะกอนในทะเลจึงทำให้มีค่าความไวตัว (Sensitivity) สูง และมีค่าความชื้นในมวลดินสูงจนเกือบใกล้เคียงกับค่าความชื้นที่ขีดเหลว (Liquid Limit)
3. ชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (Stiff to Very Stiff Clay) มีลักษณะเป็นดินเหนียวสีเทา และสีน้ำตาล มีความหนาของชั้นดินประมาณ 5-15 เมตร และมีค่ากำลังรับแรงแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) ประมาณ 5-15 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งชั้นดินนี้จะมีมีความหนาของชั้นดินน้อยในส่วนกลางของกรุงเทพฯ และมีค่าปริมาณความชื้นประมาณ 20-30 %
4. ชั้นทรายชั้นแรก (First Silty Sand Layer) ในชั้นนี้ทรายจะมีความหนาไม่แน่นอนและจะมีลักษณะเป็นทรายเม็ดละเอียด หรืออาจจะเป็นดินเหนียวหรือทรายแป้ง (Silt) ปนอยู่ ซึ่งทรายในชั้นนี้จะมีค่ามุมต้านทานภายใน ( $\phi'$ ) ประมาณ  $32^\circ$ - $35^\circ$  โดยจะพบอยู่ที่ความลึกประมาณ 22-25 เมตร และจะมีความหนาของชั้นประมาณ 5-15 เมตร
5. ชั้นดินเหนียวแข็งมากถึงชั้นดินเหนียวแข็งดินดาน (Very Stiff to Hard Clay) โดยชั้นดินนี้จะอยู่ถัดลงมาจากชั้นทรายชั้นแรก แต่ในบางพื้นที่ของกรุงเทพฯ อาจจะไม่พบชั้นดินชั้นนี้ และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) มากกว่า 15 ตันต่อตารางเมตร เนื่องจากลักษณะของดินนั้นมีสภาพการอัดแน่นเกินตัว (OCR) มีค่าใกล้เคียงสภาพอัดแน่นปกติ คือมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง
6. ชั้นทรายชั้นที่สอง (Second Sand Layer) ในชั้นนี้ส่วนใหญ่จะพบที่ความลึกมากกว่า 50 เมตรลงไป และอาจจะมีดินเหนียวหรือทรายแป้ง (Silt) ผสมปนอยู่ด้วย ซึ่งทรายในชั้นนี้จะมีค่ามุมต้านทานภายใน ( $\phi'$ ) ประมาณ  $33^\circ$ - $36^\circ$  และเป็นชั้นดินทรายที่มีสภาพแน่นมาก

## 2.1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ

ในด้านการคาดคะเนน้ำหนักบรรทุกนั้น พารามิเตอร์ที่สำคัญในการคาดคะเนโดยทั่วไปคือ ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure:  $\sigma'_{vo}$ ) ส่วนในชั้นดินเหนียว คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength:  $S_u$ ) และในชั้นทรายคือค่า มุมต้านภายใน (Angle of Internal Friction:  $\phi'$ )

ค่าต่างๆในข้างต้นที่ได้กล่าวมา ในบางค่าสามารถหาได้จากการทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และบางค่าก็ไม่สามารถหาได้จากการทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จึงต้องอาศัยความสัมพันธ์แบบสูตรสำเร็จ (Empirical) ที่ไม่มีฐานรากมาจากทฤษฎี ซึ่งจะใช้ได้เฉพาะบางพื้นที่เป็นส่วนใหญ่ สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯนั้นได้เคยมีการวิจัยค่าต่างๆและหาค่าต่างๆเหล่านี้ ซึ่งจะมีรายละเอียดโดยสังเขปดังต่อไปนี้

### 2.1.2.1 ดินเหนียว

สำหรับดินเหนียวนั้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) จะสามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดแรง (Unconfined Compression Test, UC) หรือโดยการทดสอบแรงอัดสามแนวแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Unconsolidated Undrained Triaxial Test, UU) และจากการทดสอบในสนาม โดยการทดสอบแบบใบพัดสนาม (Field Vane Test, FV) แต่จะกระทำได้ในชั้นดินเหนียวอ่อนหรือแข็งปานกลาง ส่วนในชั้นดินเหนียวแข็งจะหาได้จากความสัมพันธ์แบบสูตรสำเร็จ (Empirical) ระหว่างค่าจำนวนครั้งในการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (N) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ )

สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯในชั้นแรกนั้น วีระนันท์ (2526) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งในการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (N) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) เอาไว้ดังต่อไปนี้

- สำหรับดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง (Clay of High Plasticity, CH)

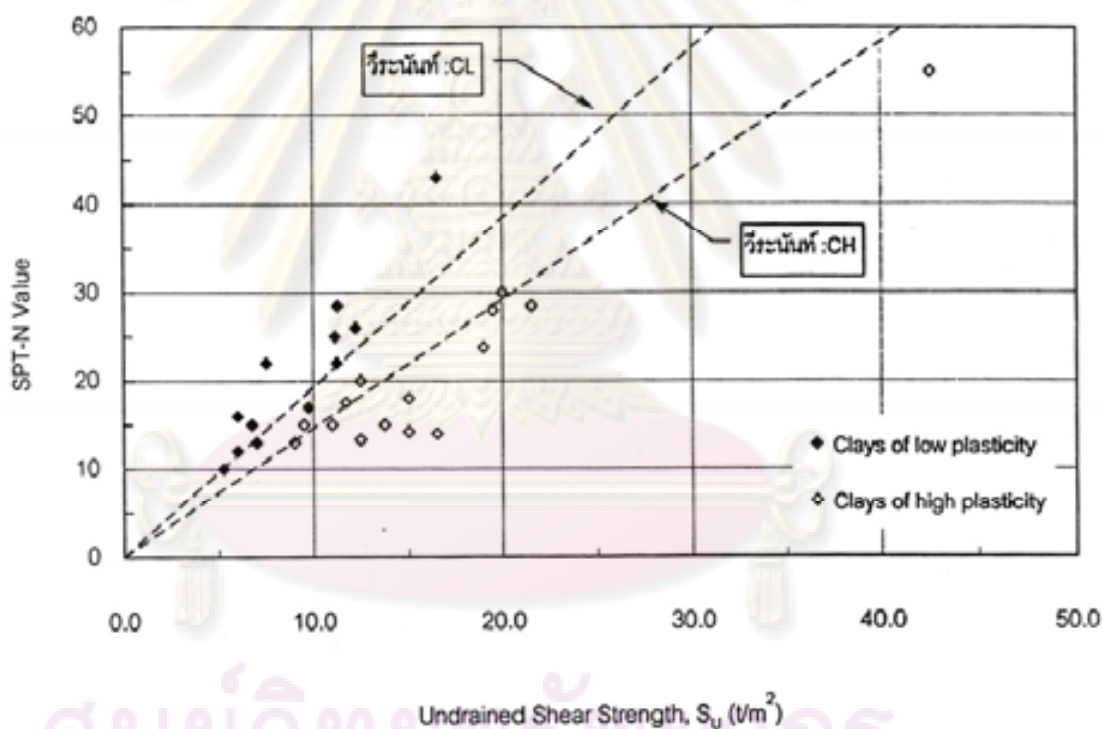
$$S_{u(CH)} = 0.685N$$

- สำหรับดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกต่ำ (Clay of Low Plasticity, CL)

$$S_{u(CL)} = 0.520N$$

เมื่อ :  $N$  = จำนวนครั้งในการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน โดยยังไม่มีกำรปรับแก้ มีหน่วยเป็น ครั้งต่อฟุต และค่าที่ใช้ควรมากกว่า 8

วีระนันท์ (2526) ได้ใช้การจำแนกดินในระบบยูนิไฟด์ (Unified Soil Classification) และจากผลวิเคราะห์เพิ่มเติมจากการศึกษาของแมนสรวง, มนัสพลและณัฐพล (2540) พบว่าค่าความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างค่าจำนวนครั้งในการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน ( $N$ ) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) มีผลสอดคล้องกับผลวิจัยของวีระนันท์ (2526) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนครั้งในการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน ( $N$ ) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) ของชั้นดินกรุงเทพฯ (แมนสรวง, มนัสพลและณัฐพล, 2540)

### 2.1.2.2 ชั้นทราย

สำหรับในชั้นทราย เนื่องจากในบริเวณพื้นที่ของกรุงเทพฯมีการสูบน้ำบาดาลมาใช้เป็นจำนวนมาก จึงทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure,  $\sigma'_{vi}$ ) ในมวลดินผิวดินที่เพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) ที่ระดับความลึกมากกว่า 10 เมตรมีการเปลี่ยนแปลงไป

- ในการคิดค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure,  $\sigma'_{vi}$ ) นั้นจะต้องรู้ค่าหน่วยน้ำหนักรวมของมวลดิน (Total Unit Weight of Soil,  $\gamma$ ) ในแต่ละชั้นดิน และจะต้องทราบถึงลักษณะของชั้นดิน ความลึก และค่าแรงดันน้ำในมวลดิน ณ จุดที่จะทำการพิจารณา (Pore Water Pressure at a Particular Depth) โดยหาได้จากการวัดในสนามหรือการใช้ค่าความสัมพันธ์แบบสูตรสำเร็จ (Empirical) ตามที่ได้มีการศึกษาเอาไว้

ส่วนในด้านการคิดค่าแรงดันน้ำในมวลดิน (Pore Water Pressure) สำหรับพื้นที่ของกรุงเทพฯนั้น จำเป็นจะต้องพิจารณาในกรณีที่มีการสูบน้ำบาดาลด้วย เพราะในการสูบน้ำบาดาลนั้นจะส่งผลให้แรงดันน้ำในมวลดินมีค่าต่ำกว่าแรงดันน้ำสถิตย (Hydrostatic Pore Water Pressure) ที่ระดับความลึกมากกว่า 10 เมตร ซึ่ง NG (1983) ได้เสนอความสัมพันธ์เอาไว้ดังต่อไปนี้

$$u = 0.747 (D-15)$$

เมื่อ :  $u$  = แรงดันน้ำในมวลดิน (ตัน/ตารางเมตร)

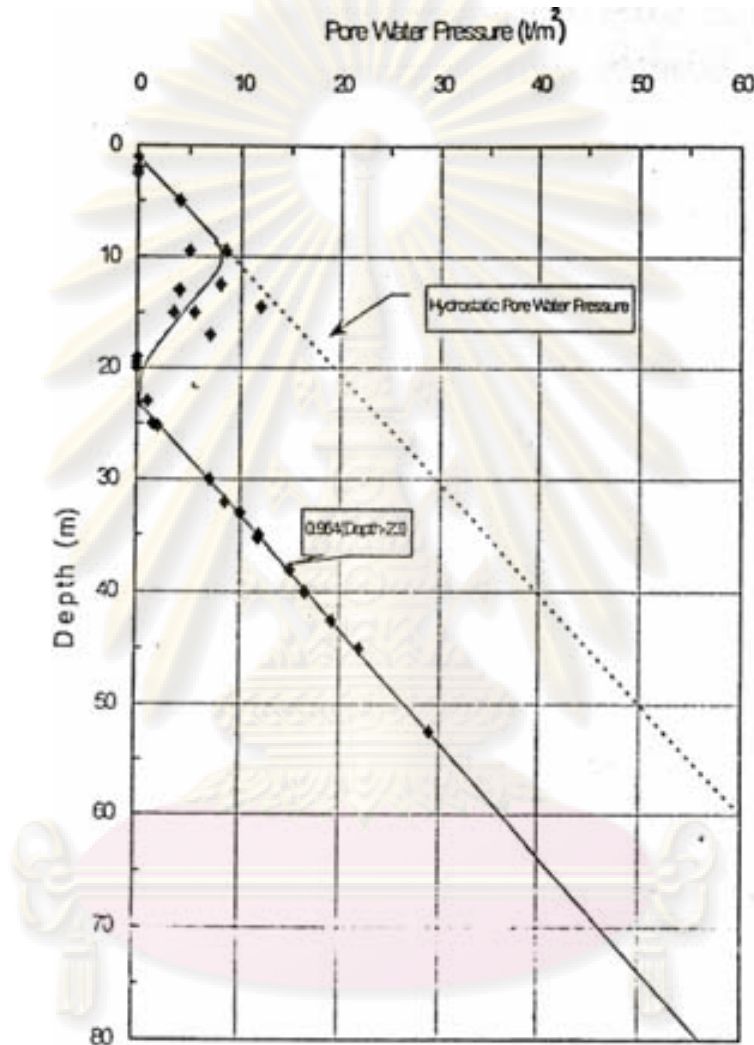
$D$  = ระดับความลึกที่พิจารณา (เมตร)

ในปี พ.ศ. 2542-2544 นั้นได้มีโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ามหานคร จึงได้มีการวัดค่าแรงดันน้ำใต้ดิน และผลจากข้อมูลที่ได้จากการวัดนั้นพบว่าผลของการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่กรุงเทพฯเปลี่ยนแปลงไปจาก NG (1983) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งค่าแรงดันน้ำใต้ดินในพื้นที่กรุงเทพฯสามารถหาได้จากสมการ

$$u = 0.984 (D-23), D \geq 23$$

เมื่อ :  $u$  = แรงดันน้ำในมวลดิน (ตัน/ตารางเมตร)

$D$  = ระดับความลึกที่พิจารณา (เมตร)



รูปที่ 2.3 แรงดันน้ำในมวลดินสำหรับกรุงเทพฯ เมื่อมีการสูบน้ำบาดาล (พ.ศ. 2542)

- ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน (Angle of Internal Friction,  $\phi'$ ) สำหรับชั้นทราย นั้นจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress,  $\sigma'_{vi}$ ) ในรูปของมุม  $\phi'$  โดยในการหามุม  $\phi'$  นั้นสามารถหาได้สองทางคือ สามารถหาได้จากการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) หรือจากการทดสอบแรงอัด

สามแนวแกนแบบระบายน้ำ (Consolidated Drained Triaxial Test, CD) แต่เนื่องจากทรายนั้นมีความลำบากในการเก็บตัวอย่างให้ไม่เกิดการถูกรบกวน (Disturbed Sample) และเมื่อนำตัวอย่างมาใช้ในการทดสอบแรงอัดสามแนวแกนแบบระบายน้ำ ก็ยังมีปัญหาในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้อยู่ในรูปทรงกระบอก และยังต้องทำการใช้ membrane ที่มีขนาดหนากว่าปกติอีก จึงมีความยุ่งยากมากที่จะทำการทดสอบ และอีกทางคือการหาค่าของมุม  $\phi'$  โดยใช้วิธีการทดสอบในสนามในรูปแบบความสัมพันธ์แบบสูตรสำเร็จ (Empirical)

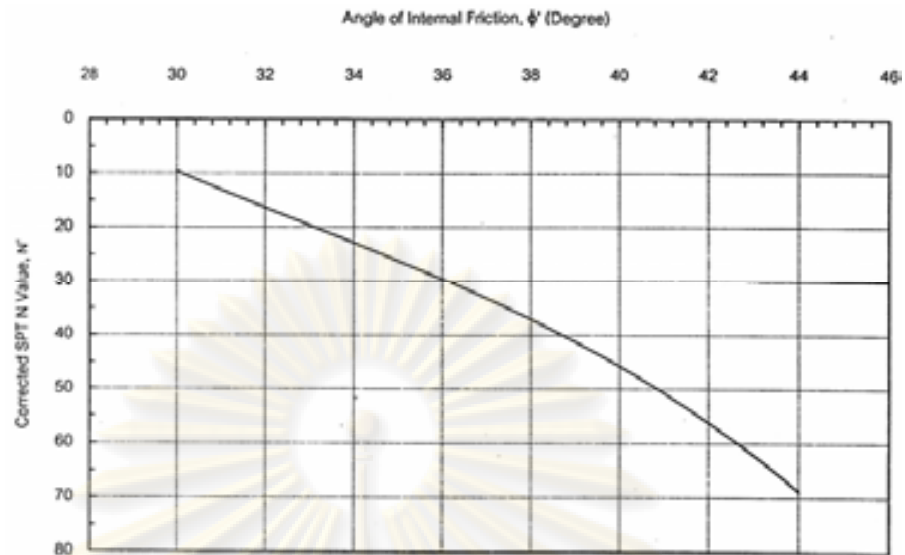
วิธีการทดสอบในสนามแบบสูตรสำเร็จ (Empirical) นั้น มีผู้เสนอไว้อย่างมากมาย เช่น วีระนันท์(2526) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนครั้งในการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (N) กับค่ามุมต้านทานแรงเฉือน ( $\phi'$ ) ในดินทรายปนดินเหนียว โดยหาได้จากกราฟวิเคราะห์กลับจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ ดังต่อไปนี้

$$\phi' = 12.041 N^{0.162}$$

เมื่อ : N = จำนวนครั้งในการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน โดยยังไม่มี การปรับแก้ มีหน่วยเป็นครั้งต่อฟุต

สำหรับทรายละเอียดที่มีทรายแป้งปนอยู่บ้าง แต่ไม่มีดินเหนียวปนอยู่ Peck, Hanson & Thornburn (1974) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนครั้งต่อการทดสอบทะลุมาตรฐานที่ปรับแก้แล้ว ( $N_{CR}$ ) กับ ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน ( $\phi'$ ) โดยค่า N ที่ได้จากการทดสอบจะต้องนำมาทำการปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress,  $\sigma'_{vt}$ ) ให้กลายเป็น  $N_{CR}$  ดังแสดงในรูป 2.4





รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนครั้งต่อการทดสอบทะลุมาตรฐานที่ปรับแก้แล้ว ( $N_{CR}$ ) กับ ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน ( $\psi'$ ) (Peck, Hanson & Thornburn , 1974)

สำหรับค่า  $N$  ที่ได้จากการทดสอบ และต้องมาทำการปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress,  $\sigma'_{vi}$ ) ให้กลายเป็น  $N_{CR}$  ซึ่งได้นำเสนอการปรับแก้โดย Peck, Hanson & Thornburn (1974) ดังรูปที่ 2.5 นั้นมีสมการการปรับแก้ดังต่อไปนี้

$$N_{CR} = C_N \cdot N$$

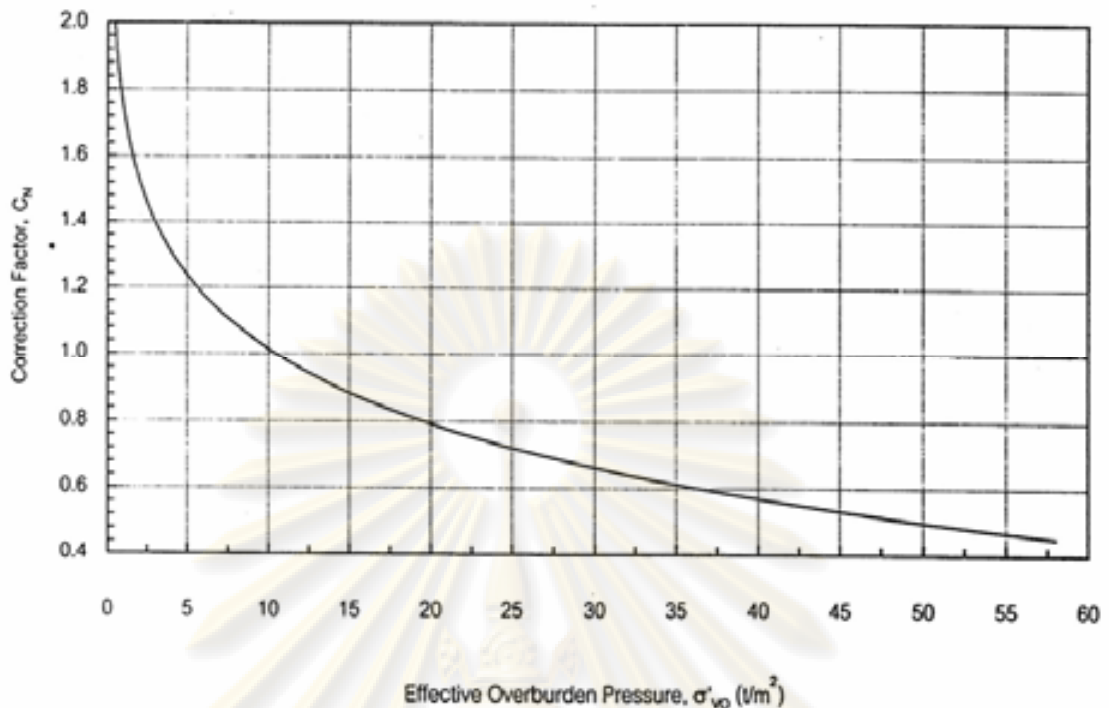
$$C_N = 0.77 \log \left( \frac{20}{\sigma'_{v0}} \right)$$

เมื่อ :  $N$  = จำนวนครั้งในการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน มีหน่วยเป็นครั้งต่อฟุต

$N_{CR}$  = ค่า  $N$  ที่ได้ทำการปรับแก้แล้ว

$C_N$  = ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง ( $\sigma'_{vi}$ )

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



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_N$  กับค่า  $\sigma'_{vi}$  (Peck, Hanson & Thornburn , 1974)

## 2.2 ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้ในงานวิจัย

เสาเข็มเจาะที่ใช้ในการศึกษาของงานวิจัยนี้ โดยทั้งหมดจะเป็นเสาเข็มเจาะระบบเปียก (Bored Pile use Wet Process) ซึ่งเสาเข็มชนิดนี้จะไม่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินในขณะที่ทำการก่อสร้าง แต่ในการก่อสร้างนั้นเสาเข็มเจาะแบบเปียกนั้นจำเป็นต้องมีการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ โดยในช่วงของชั้นดินเหนียวอ่อนนั้นจะใช้ปลอกเหล็กกันดินชั่วคราว (Casing) มาช่วยในการป้องกันการพังทลายของดินในชั้นดินนี้ และเมื่อทำการขุดถึงชั้นทรายชั้นแรกก็จะต้องทำการใส่สารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ (Drilling Slurry) โดยทั่วไปจะใช้สารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะเป็น เบนโทไนท์ หรือ โพลีเมอร์ ซึ่งในการเลือกใช้สารละลายแต่ละแบบนั้นจะส่งผลถึงขั้นตอนการก่อสร้างที่แตกต่างกันออกไป และในบางโครงการก็จะมีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็ม (Base Grouting) เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing Resistance) อีกด้วย ดังนั้นรายละเอียดของขั้นตอนการก่อสร้าง รวมทั้งวิธีการก่อสร้างมีดังนี้

### 2.2.1 เส้าเซ็่มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Base Slurry) เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ

โครงการก่อสร้างโดยทั่วไปนั้นการก่อสร้างเส้าเซ็่มเจาะระบบเปียกจะต้องมีปลายของเส้าเซ็่มหยั่งลงไปในระดับชั้นที่หนึ่งหรือชั้นที่สอง โดยจะใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ เนื่องจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะนั้น จะก่อให้เกิดเยื่ออุทกที่น้ำขึ้นในบริเวณชั้นทราย และทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายแรงดันจากสารละลายไปยังผนัง เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวหน้าของทรายเกิดการหลุดร่วงและพังทลายลงไปหลุมเจาะ ซึ่งเส้าเซ็่มเจาะส่วนใหญ่ที่มีการก่อสร้างนั้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 0.8 – 1.5 เมตร ซึ่งจะรับน้ำหนักปลอดภัยอยู่ที่ประมาณ 300 – 1000 ตัน ขึ้นอยู่กับขนาดและความยาวของเส้าเซ็่ม

ขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขปสำหรับเส้าเซ็่มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Base Slurry) เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ มีดังต่อไปนี้

1. ทำการผสมเบนโทไนท์กับน้ำ โดยอัตราส่วนการผสมคือ 3-6 % โดยน้ำหนัก แล้วสูบขึ้นไปกับในถังเก็บ (Silo) ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เบนโทไนท์เกิดการดูดน้ำให้เต็มที (Fully Hydrated)
2. ทำการลงปลอกเหล็กกันดินชั่วคราว (Casing) โดยใช้ค้อนสั่น (Vibro Hammer) เป็นตัวดันให้ปลอกเหล็กกันดินชั่วคราวลงไป เพื่อป้องกันชั้นดินเหนียวอ่อนพังทลายลงมา โดยส่วนใหญ่ความยาวของปลอกเหล็กกันดินชั่วคราว (Casing) นั้นมีความยาวประมาณ 14-18 เมตร ขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นดินในสนามที่จะทำการก่อสร้าง
3. ทำการขุดดินในปลอกเหล็กกันดินชั่วคราว โดยใช้สว่าน (Auger) เจาะไปจนใกล้ถึงระดับของชั้นทรายชั้นแรก
4. ทำการเติมสารละลายเบนโทไนท์ที่ผสมไว้ลงไปหลุมเจาะ ในขณะที่เดียวกันก็ทำการเปลี่ยนหัวเจาะจากแบบสว่าน (Auger) เป็นหัวเจาะแบบถัง (Bucket)
5. ทำการเจาะด้วยหัวเจาะแบบถัง (Bucket) และเติมสารละลายเบนโทไนท์ไปด้วยพร้อมๆกันในขณะที่ทำการขุดเจาะ จนกระทั่งถึงระดับที่ต้องการ

6. ทำความสะอาดกันหลุม โดยใช้เครื่องเป่าลม (Air Lift)
7. ลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีตได้นำผ่านทางท่อเท (Tremie Pipe)
8. ทำการสูบลูบสารละลายเบนโทไนท์ในหลุมเจาะขึ้นมา แล้วนำไปผานกระบวนการกรองทรายด้วยเครื่องกรองทราย (Desander) จากนั้นจึงทำการปรับแต่งสารละลายอีกครั้งก่อนที่จะนำไปพักในถังเก็บ (Silo) แล้วนำมาใช้ใหม่อีกครั้ง
9. ทำการถอนปลอกเหล็กกันดินชั่วคราว (Casing) ออก

## 2.2.2 เสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลิเมอร์ (Polymer Base Slurry) เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

ในการใช้สารละลายโพลิเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะนั้น วิธีการก่อสร้างจะแตกต่างออกไปบ้างจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์ แต่การใช้สารละลายโพลิเมอร์นั้นจะต้องมีการเติมเบนโทไนท์เข้าไปบางส่วน เพื่อลดการซึมผ่านที่เกิดขึ้น เนื่องจากสารละลายเบนโทไนท์จะช่วยให้เกิดเยื่อหุ้มที่น้ำ (Filter Cake) ทำให้สารละลายโพลิเมอร์นั้นไม่สามารถซึมผ่านไปในพื้นที่ทรายได้ และยังจะช่วยเพิ่มแรงดันในสารละลายให้สูงขึ้น แต่พฤติกรรมส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นนั้นจะถูกควบคุมโดยสารละลายโพลิเมอร์มากกว่าที่จะเป็นสารละลายเบนโทไนท์

สารละลายเบนโทไนท์นั้นจะทำให้เม็ดดินเกิดการแขวนลอยอยู่ในสารละลาย แต่สำหรับสารละลายโพลิเมอร์นั้นจะทำให้เม็ดดินขนาดเล็กรวมตัวกันจนมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอน ซึ่งจะเห็นว่าสารละลายเบนโทไนท์ทำให้เม็ดดินเกิดการแขวนลอย แต่สำหรับสารละลายโพลิเมอร์นั้นทำให้เม็ดดินตกตะกอน ดังนั้นขั้นตอนในการทำความสะอาดกันหลุมจึงมีความแตกต่างกันออกไป

ขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขปสำหรับเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลิเมอร์ (Polymer Base Slurry) เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ มีดังต่อไปนี้

1. ทำการผสมเบนโทไนท์ในอัตราส่วนตามลักษณะชั้นดิน กับน้ำ จากนั้นจึงทำการใส่โพลิเมอร์เข้าไป แต่ไม่จำเป็นต้องทิ้งเอาไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เบนโทไนท์ดูดน้ำจนอิ่มตัว เพราะเบนโทไนท์ที่ใช้มีปริมาณน้อย อาจจะใช้เวลาประมาณ 30-45

นาที่ เพื่อให้เบนโทไนท์ทำการดูดน้ำและโพลิเมอร์เกิดการละลาย แล้วจึงทำการสูบสารละลายขึ้นไปไว้ในถังเก็บ (Silo)

2. ทำการลงปลอกเหล็กกันดินชั่วคราว (Casing) ดั้งขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ
3. ทำการเจาะดินโดยใช้สว่าน (Auger) เจาะไปจนถึงระดับของชั้นทรายชั้นแรก
4. เติมสารละลายโพลิเมอร์ที่ผสมไว้ลงในหลุมเจาะ และทำการเปลี่ยนหัวเจาะเป็นแบบถัง (Bucket) แล้วทำการเจาะต่อไปยังระดับความลึกที่ต้องการ
5. เมื่อถึงระดับความลึกที่ต้องการจะต้องทำการทิ้งหลุมเจาะเอาไว้ประมาณ 60-90 นาที เพื่อให้เม็ดดินนั้นตกตะกอนเต็มที่ แล้วจึงใช้ถังเก็บตะกอน (Cleaning Bucket) มาทำความสะอาดกันหลุม โดยการตักตะกอนที่เกิดขึ้น
6. ลงเหล็กเสริม และทำการเทคอนกรีตได้น้ำโดยใช้ท่อเท (Tremie Pipe)
7. สูบสารละลายออกจากหลุมเจาะไปไว้ในถังพักน้ำยา (Sediment Tank) แล้วจึงทำการปรับแต่งคุณสมบัติให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน ก่อนที่จะสูบขึ้นไปไว้ในถังเก็บ (Silo) เพื่อรอที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการกรองทราย (Desanding) เพราะมีทรายน้อยมากๆ ที่จะหลงเหลืออยู่ในสารละลายโพลิเมอร์
8. ทำการถอนปลอกเหล็กกันดินชั่วคราว (Casing) ออก

### 2.2.3 เสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลาย (Base Grouted Pile)

โดยทั่วไปการก่อสร้างเสาเข็มเจาะทั้งที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ และสารละลายโพลิเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะนั้น จะมีการทำความสะอาดกันของหลุมเจาะก่อนที่จะทำการลงเหล็กเสริม แต่เนื่องจากการลงเหล็กเสริมนั้นใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ซึ่งในช่วงเวลาเหล่านี้จะทำให้เกิดตะกอนขึ้นมาที่ก้นหลุมได้ แต่ก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพของการก่อสร้างด้วย เช่น ถ้าใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะนั้น สารละลายเบนโทไนท์จะทำให้เม็ดดินเกิดการแขวนลอยอยู่ในสารละลาย และถ้าเราทำความสะอาดกันหลุมโดยการเป่าลม (Air Lift) ไม่ได้นั้นก็ทำให้เกิดตะกอนตกค้างที่ก้นหลุมเป็นจำนวนมาก ส่วนถ้าใช้สารละลายโพลิ

เมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมนั้น สารละลายโพลีเมอร์จำเป็นต้องใช้เวลาสักกระยะหนึ่งก่อนถึง จะเกิดการตกตะกอนเต็มที่ แต่ถ้าไม่ใช้เวลาในการตกตะกอนกับสารละลาย หรือให้เวลาน้อย เกินไปก็จะทำให้เกิดตะกอนตกค้างที่ก้นหลุมได้เหมือนกัน

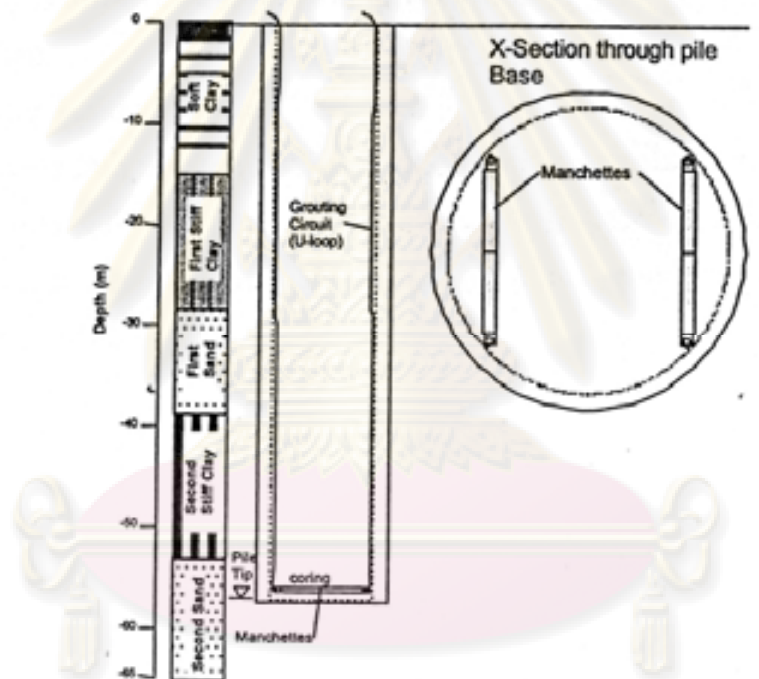
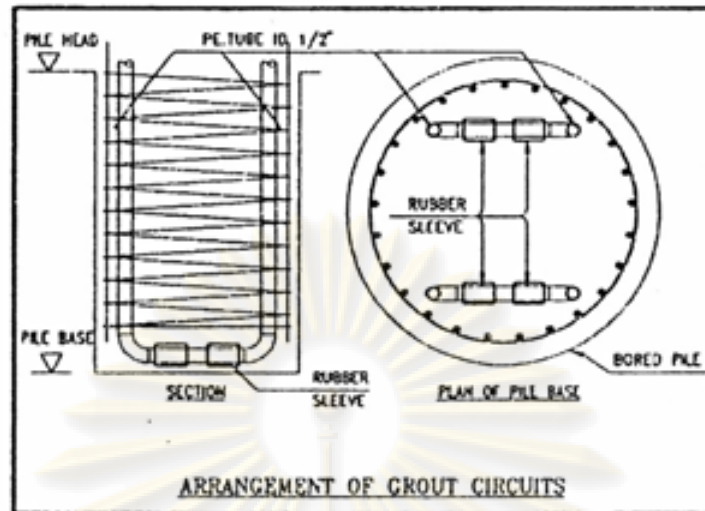
การเกิดตะกอนตกค้างก้นหลุมนั้นเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานที่ ปลายเสาเข็ม (End Bearing Resistance) นั้นลดลง และก่อให้เกิดค่าการทรุดตัวที่ปลายเสาเข็ม มาก ดังนั้นในการแก้ไขจึงได้มีการนำเอาระบบการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม (Base Grouted Pile) เข้ามาใช้เพื่อเพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing Resistance) ให้มี ค่ามากขึ้น และลดการทรุดตัวที่ปลายเข็มเมื่อทำการรับน้ำหนักบรรทุก

โดยทั่วไปวิธีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่นิยมใช้จะมีอยู่ 2 ระบบ ได้แก่ ระบบแผ่น ราบ (Flat Plate) และระบบท่อยู (Tube-A-Manchette หรือ U-Tube) โดยระบบแผ่นราบ (Flat Plate) นั้นจะประกอบด้วยการติดตั้งแผ่นราบ (Flat Plate) ไว้บริเวณที่ปลายเสาเข็มและทำการ ติดตั้งแม่แรง (Flat Jack) หรือท่อทางเดียว (One-Way Valve) ที่แผ่นราบ (Flat Plate) และทำการ ต่อท่อขึ้นมาโดยทำการยึดติดกับโครงเหล็กดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ระบบการอัดฉีดน้ำปูนแผ่นราบ (Flat Plate)

อีกระบบหนึ่งนั้นคือระบบท่อยู (U-Tube) ซึ่งจะประกอบไปด้วยท่อที่ยึดติดอยู่กับโครง เหล็กเสริม โดยที่ท่อนี้จะทำการต่ออยู่กับท่ออัดน้ำปูน (Grout หรือ Manchette) ที่วางอยู่ที่ปลาย ของก้นหลุมเจาะ และท่อนี้จะทำการต่ออยู่กับแกนท่ออัดน้ำปูน (Manchette) ทั้ง 2 ข้าง ดังรูปที่



รูปที่ 2.7 ระบบการอัดฉีดน้ำปูนแบบท่อยู (Tube-A-Manchette หรือ U-Tube)

ตามปกติที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่นำมาผสมใช้เป็นน้ำปูนจะให้อยู่ที่ประมาณ 0.50-0.55 โดยทำการควบคุมแรงดันในการอัดฉีดให้อยู่ระหว่าง 20-40 บาร์ หรือ 2000 – 4000 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร การเลือกให้แรงดันนั้นขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นดินที่จะทำการอัดฉีดเพื่อให้น้ำปูนแทรกเข้าไปในชั้นดินได้ และการอัดฉีดน้ำปูนนั้นจะกระทำหลังจากการทดสอบกริตเสร็จประมาณ 12-24 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนโดยสังเขปดังนี้

1. ทำการล้างท่อที่จะทำการอัดฉีดด้วยน้ำสะอาด (Water Flushing) เพื่อป้องกันการอุดตันอันเนื่องมาจากการตะกอนกริต ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง
2. จากนั้นจึงทำการอัดน้ำด้วยแรงดันสูง เพื่อทำการเปิดคอนกรีตที่ปลายเข็ม จะกระทำต่อเมื่อคอนกรีตมีอายุ 12-24 ชั่วโมง
3. ทำการอัดฉีดน้ำปูนลงไปปลายเข็ม
4. จากนั้นทำความสะอาดท่อด้วยการอัดฉีดน้ำสะอาด เพื่อเตรียมที่จะทำการอัดฉีดน้ำปูนในรอบต่อไป
5. ในการอัดฉีดรอบนี้จะใช้น้ำปูนเพื่อเปิดคอนกรีตที่ปลายเข็ม และทำการอัดฉีดเหมือนในขั้นตอนที่ 3
6. ทำความสะอาดท่อด้วยน้ำสะอาด และทำการอัดฉีดเหมือนขั้นตอนที่ 5 จนครบรอบของการอัดฉีดตามที่ทำการออกแบบเอาไว้

## 2.3 พฤติกรรมของสารรักษาเสถียรภาพ

### 2.3.1 พฤติกรรมของเบนโทไนท์

ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกเมื่อทำการเจาะจนถึงระดับที่มีน้ำใต้ดินซึมเข้ามา หรือว่าหลุมเจาะไม่สามารถรักษาสภาพด้วยตัวเองได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใส่สารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะลงไปเพื่อป้องกันหลุมพังทลาย

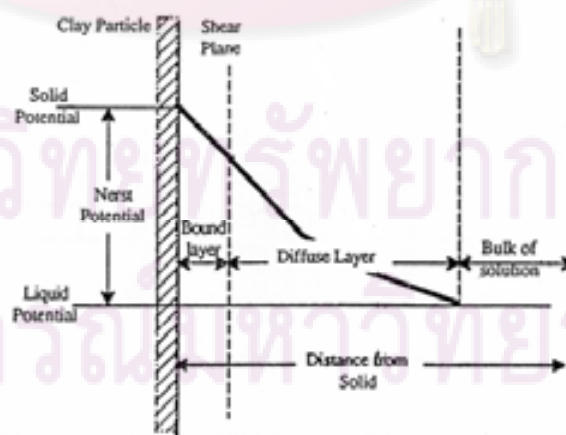
เบนโทไนท์เป็นสารประเภทสารประกอบดินเหนียว (Clay Mineral) ที่สามารถขยายตัวได้มากเมื่อผสมกับน้ำโดยจะมีคุณสมบัติเป็นสารประเภทคอลลอยด์ รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของเบนโทไนท์ผงและเมื่อผสมกับน้ำ และคุณสมบัติของเบนโทไนท์ก็สามารถที่จะปรับปรุงจนอยู่ในช่วงที่ต้องการได้โดยเลือกอัตราส่วนของเบนโทไนท์ ซึ่งสามารถเลือกใช้กับงานเจาะเสาเข็มหรือการก่อสร้างกำแพงกันดินก็ได้ พฤติกรรมของเบนโทไนท์ในหลุมเจาะสามารถอธิบายได้ดังนี้





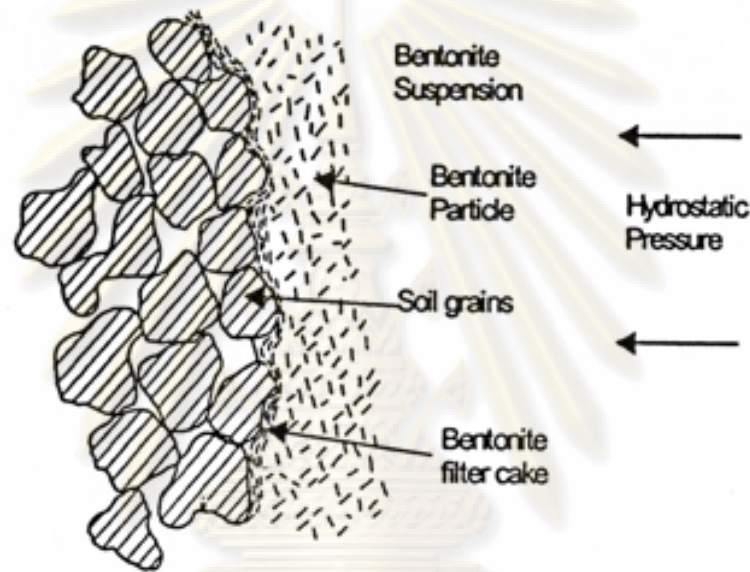
รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของเบนโทไนท์ผงและเมื่อผสมกับน้ำ

เบนโทไนท์ที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยนั้นสามารถผลิตขึ้นเองได้ในประเทศ และจัดอยู่ในประเภทเบนโทไนท์ที่เติมโซเดียม (Sodium-activated Bentonite) ซึ่งผงเบนโทไนท์ประกอบไปด้วยอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) ที่เรียกว่าโซเดียมมอนทอร์มิลโลไนท์ (Na-Montmorillonite) ซึ่งมีขนาดเล็กมาก เมื่อผสมผลเบนโทไนท์ลงในน้ำจะเกิดการดูดน้ำ (Hydrated) เนื่องจากประจุบวกในน้ำจะถูกดึงดูดด้วยประจุลบที่ผิว (Face) ของอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) เรียกว่าวงน้ำ (Double Layer หรือ Diffuse Layer) วงน้ำนี้จะเป็ระยะที่อนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) สามารถดูดน้ำได้ทำให้ขนาดของอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) สามารถขยายออกได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 สำหรับเบนโทไนท์ที่ดูดน้ำแล้ว (Hydrated Na-Montmorillonite) นั้นวงน้ำ (Double Layer) จะมีขนาดใหญ่มากทำให้มีการขยายตัวได้อย่างมาก, ทยานันท์ (2544)



รูปที่ 2.9 วงน้ำ (Double Layer) ของอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle), ทยานันท์ (2544)

สำหรับในชั้นทรายนั้นหรือชั้นดินที่มีค่าการซึมผ่านสูง สารละลายเบนโทไนท์จะเกิดพฤติกรรมที่เรียกว่าการเกิดเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเยื่อที่บดน้ำจะเกิดขึ้นเมื่อของเหลวในสารละลายซึมผ่านดิน และทิ้งให้ส่วนที่เป็นของแข็งในสารละลายสะสมตัวเป็นแผ่นขึ้นและจะทำให้ส่วนที่เป็นของเหลวซึมผ่านดินได้น้อยลง ทำให้แรงดันจากสารละลายเบนโทไนท์ถ่ายผ่านเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake) ไปที่ดินได้ ซึ่งความแข็งแรงของเยื่อที่บดน้ำจะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากผิวหน้าของทราย

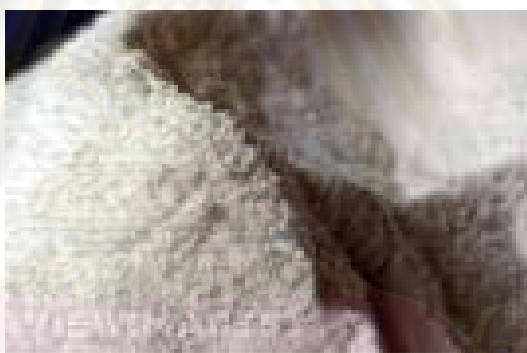


รูปที่ 2.10 การเกิดเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake) ในชั้นทรายของสารละลายเบนโทไนท์

### 2.3.2 พฤติกรรมของโพลีเมอร์

สารละลายโพลีเมอร์นั้นเริ่มมีบทบาทในการใช้เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ (Drilling Slurry) ในการทำเสาเข็มเจาะระบบเปียกแทนที่สารละลายเบนโทไนท์เมื่อไม่นานมานี้ เนื่องจากการใช้สารละลายโพลีเมอร์สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์ได้หลายๆด้าน เช่น ลดปัญหาการสูญเสียกำลังรับแรงเสียดทานด้านข้าง (Unit Skin Friction) ของเสาเข็มเนื่องจากเยื่อที่บดน้ำ (Filter Cake) และ ช่วยทำให้การทำงานในสนามสะดวกมากยิ่งขึ้น

โดยทั่วไปสารละลายโพลีเมอร์ที่ใช้ในงานชุดเจาะมี 2 ประเภทคือโพลีเมอร์ธรรมชาติ (Organic Polymer) และโพลีเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymer) สำหรับการใช้งานเสาเข็มเจาะนั้นจะนิยมใช้โพลีเมอร์สังเคราะห์ประเภทพียเอชพีเอ (Partially Hydrolyzed Polyacrylamide, PHPA) มากกว่าโพลีเมอร์ธรรมชาติ เนื่องจากโพลีเมอร์ธรรมชาติไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้งและยังอาจเกิดการเน่าเสียได้หากทิ้งไว้เป็นระยะเวลานาน ลักษณะของโพลีเมอร์จะอยู่ใน 2 รูปแบบคือ แบบผงดังแสดงในรูปที่ 2.11 และแบบเหลวการใช้งานโพลีเมอร์แบบเหลวสามารถใช้งานได้สะดวกกว่า แต่เนื่องจากราคาต่อหน่วยของโพลีเมอร์แบบเหลวแพงกว่าแบบผงมาก ทำให้โพลีเมอร์ชนิดผงเป็นที่นิยมมากกว่าโพลีเมอร์แบบผงมีลักษณะเป็นผงสีขาว สามารถละลายในน้ำได้ดี โดยมีความสามารถในการละลายน้ำที่ 1% โดยน้ำหนัก รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของโพลีเมอร์เมื่อผสมกับน้ำ, ทยานันท์ (2544)

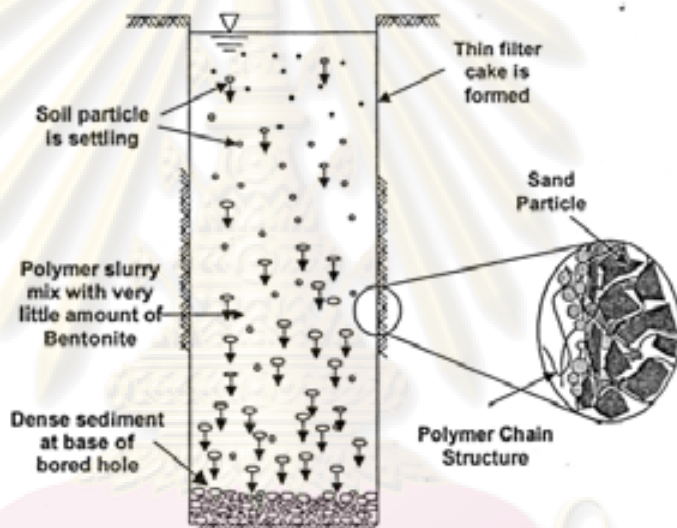


รูปที่ 2.11 โพลีเมอร์แบบผง (Powder Polymer)



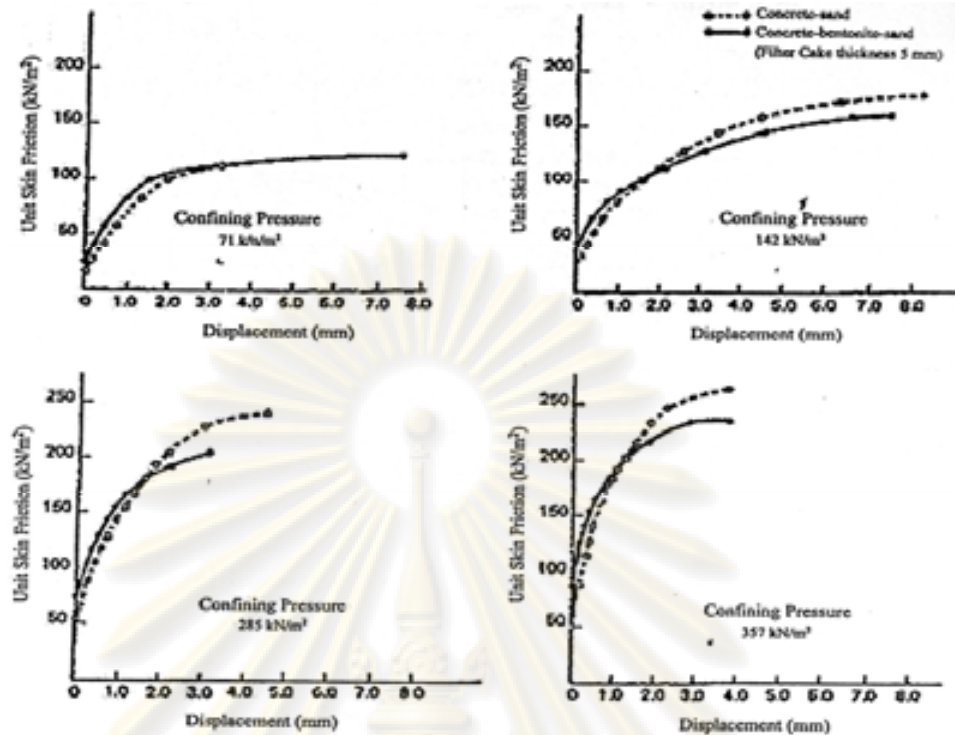
รูปที่ 2.12 โพลีเมอร์แบบผง (Powder Polymer) เมื่อผสมกับน้ำ

เมื่อโพลีเมอร์ผสมกับน้ำ ก็จะกลายมาเป็นสารละลายโพลีเมอร์ และเมื่อสารละลายโพลีเมอร์นั้นถูกใส่อยู่ในหลุมเจาะสารละลายโพลีเมอร์จะทำให้ดินเม็ดละเอียดพวกทรายละเอียดหรือทรายแป้งจับ เกิดการตัวรวมกันทำให้อนุกระทั้งมีน้ำหนักมากพอจนเกิดการตกตะกอนลงสู่ก้นหลุม ดังแสดงในรูปที่ 2.13 แต่ในการใช้งานในสนามจริงนั้นจะไม่สามารถใช้สารละลายโพลีเมอร์เพียงอย่างเดียวได้ เนื่องจากจะเกิดการสูญเสียสารละลายโดยไหลซึมผ่านชั้นทรายออกไปมาก ดังนั้นจึงต้องใช้เบนโทไนท์ผสมลงไปด้วย เพื่อให้เกิดเยื่อที่บนน้ำขึ้นในชั้นทราย ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการสูญเสียไปได้ และเนื่องจากเบนโทไนท์ที่ใช้ในการผสมนั้นมีปริมาณที่น้อย ดังนั้นพฤติกรรมหลักจึงเป็นโพลีเมอร์ที่เป็นตัวควบคุม



รูปที่ 2.13 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อสารละลายโพลีเมอร์อยู่ในหลุมเจาะ

การใช้สารละลายโพลีเมอร์นั้นจากการศึกษาของ Farmer and Goldberg (1969) ด้วยการทดสอบโดยสร้างเสาเข็มจำลองขึ้นมาในชั้นทรายโดยใช้เซลล์อัดแรงสามแกน (Triaxial Cell) พบว่าเมื่อใช้แรงดันเซลล์ (Confining Pressure) ในช่วง 10.3 ถึง 51.8 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) เสาเข็มจำลองที่ใช้เบนโทไนท์จะมีกำลังลดลงประมาณ 10% เมื่อเทียบกับเสาเข็มจำลองที่ไม่ใช้เบนโทไนท์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับการเคลื่อนตัวที่แรงดันเซลล์

(Confining Pressure) ต่างๆ ของเสาเข็มจำลอง (Farmer and Goldberg, 1969)

#### 2.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดในเสาเข็มเจาะ

โดยทั่วไปเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและติดตั้งอยู่ในเสาเข็มที่นิยมใช้จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ เกจวัดความเครียด (Vibrating Wire Strain Gage, VWSG) และเครื่องมือที่ใช้วัดระดับการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer) ซึ่งผลที่ได้จากเครื่องมือทั้งสองจะอยู่ในรูปของความเครียด (Strain) และผลที่ได้นั้นจะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นตามแนวแกนของเสาเข็ม ณ ระดับความลึกที่ได้มีการติดตั้งเครื่องมือเอาไว้ และผลที่ได้จากเครื่องมือวัดแบบ VWSG นั้นมีความน่าเชื่อถือมากกว่าแบบ Extensometer เนื่องจากจะมีความละเอียดมากกว่า รายละเอียดของเครื่องมือทั้ง 2 ชนิด มีดังต่อไปนี้

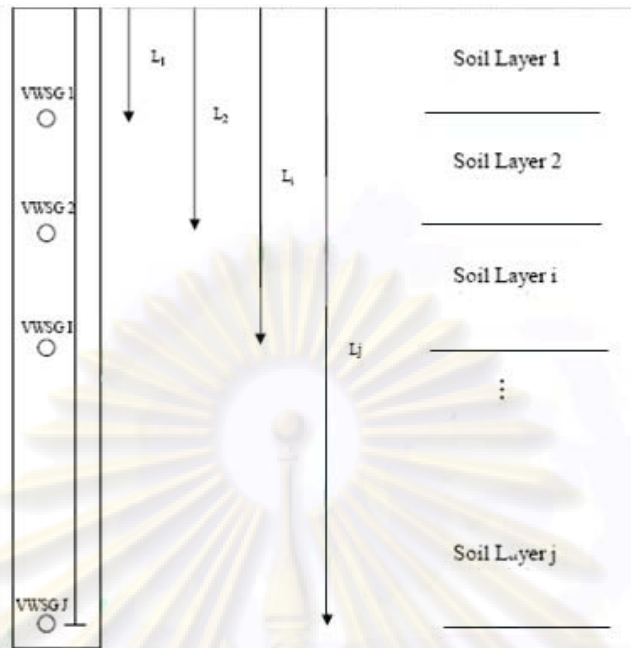
#### 2.4.1 เกจวัดความเครียด (Vibrating Wire Strain Gage, VWSG)

เกจวัดความเครียด (VWSG) นั้นจะให้ผลออกมาเป็นค่าของความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความลึกนั้นๆ ที่ได้ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด (VWSG) เอาไว้ ซึ่งผลที่ได้จะต้องนำไปวิเคราะห์หาค่ากลับออกมาอยู่ในรูปของแรงตามแนวแกนของเสาเข็มที่ระดับความลึก ณ ที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด (VWSG) เอาไว้ โดยทั่วไปในการติดตั้งเกจวัดความเครียด (VWSG) นั้นควรจะทำการติดตั้งเป็นจำนวน 3-5 ตัว ในเหล็กเสริมยื่นของเสาเข็ม และจะต้องติดตั้งอยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของชั้นดิน ดังรูป 2.15 และ 2.16 โดยสามารถที่จะดูข้อมูลของดินจากหลุมทดสอบ (Boring Log ) ประกอบ เพื่อกำหนดระดับความลึกที่จะทำการติดตั้ง



รูปที่ 2.15 ลักษณะของเกจวัดความเครียด (Vibrated Wire Strain Gage, VWSG)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.16 การติดตั้งเกจวัดความเครียด (VWSG) ที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงชั้นดิน

#### 2.4.2 เครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer)

เครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer) ดังรูปที่ 2.17 นั้นส่วนใหญ่ จะทำการติดตั้งเพื่อวัดการหดที่ส่วนต่างๆของเสาเข็มระหว่างหัวของเสาเข็ม (Pile Head) กับระดับ ความลึกที่ต้องการ โดยจะทำการติดตั้งติดกับโครงเหล็กเสริมยื่นของเสาเข็ม และค่าการหดตัวที่ได้ นั้นสามารถที่จะนำมาวิเคราะห์หาค่ากลับเพื่อคำนวณหาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นได้



ก. Rod Extensometer



ข. Magnetic Extensometer

รูปที่ 2.17 ลักษณะของเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer)

## 2.5 การส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากเสาเข็มสู่ดินรอบๆเสาเข็ม

ในการศึกษาการส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากเสาเข็มสู่ดินรอบๆเสาเข็ม จำเป็นจะต้องอาศัยข้อมูลการทดสอบเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดภายในตัวของเสาเข็ม เพื่อสามารถวิเคราะห์หาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในตัวของเสาเข็มได้ ตามระดับความลึกที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดเอาไว้

### 2.5.1 การหาแรงตามแนวแกนโดยเกจวัดความเครียด (Vibrated Wire Strain Gage, VWSG)

ในการหาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นนี้จะพิจารณาจากจุดที่มีการติดตั้งเครื่องมือเกจวัดความเครียด (VWSG) เอาไว้ โดยจะใช้ Fellenius 's Method (1989) ในการหาค่าแรงตามแนวแกนของเสาเข็ม โดยใช้สมการคือ

$$P_i = (E_s \times A)\epsilon = (0.5B\epsilon + C)\epsilon_i$$

เมื่อ :  $E_s$  = โมดูลัสเฉพาะจุดของวัสดุประกอบ (secant modulus of composite pile material)

$P_i$  = แรงตามแนวแกน ณ จุดที่ทำการติดตั้ง VWSG ที่ระดับ  $i$

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

$\epsilon_i$  = ค่าความเครียดที่วัดได้ (measured strain) ณ จุดที่ทำการติดตั้ง VWSG ที่ระดับ  $i$

$B$  = ความชันของเส้นโมดูลัสสัมผัส (tangent modulus line)

$C$  = จุดตัดแกน  $y$  ของเส้นโมดูลัสสัมผัส (tangent modulus line) คือค่าโมดูลัสสัมผัสเริ่มแรก (initial tangent modulus)



## 2.5.2 การหาแรงตามแนวแกนโดยเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer)

เครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer) นี้จะสามารถคำนวณหาแรงตามแนวแกนตลอดช่วงในการพิจารณา โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$P_i = (AE)_p \times \epsilon_i$$

เมื่อ :  $P_i$  = แรงตามแนวแกนจากหัวของเสาเข็ม (Pile Head) จนถึงระดับความลึกที่พิจารณา

$(AE)_p$  = ค่าสติฟเนสเทียบเท่ากับเสาเข็ม (Equivalent Pile Stiffness)

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

$A_s$  = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

$A_g$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

$$n = E_{st} / E_c$$

$E_{st}$  = อีลาสติกโมดูลัสของเหล็กเสริม

$E_c$  = อีลาสติกโมดูลัสของคอนกรีต

$\epsilon_i$  = ค่าความเครียดที่วัดได้ (measured strain) ณ จุดที่ทำการติดตั้ง VWSG ที่ระดับ  $i$

## 2.6 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มเดี่ยว

ในการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มเดี่ยวนั้นที่นิยมใช้จะแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. วิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method)
2. วิธีทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม (Pile Load Test)

ซึ่งในแต่ละวิธีนั้นจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.6.1 วิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method)

วิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method) เป็นวิธีการที่ใช้ในการคาดคะเนน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยอาศัยหลักสมดุลของแรง กล่าวคือ ผลรวมของแรงเสียดทานรอบผิวของเสาเข็ม และแรงต้านจากปลายของเสาเข็ม ลบออกด้วยน้ำหนักของเสาเข็ม จะเท่ากับ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ( $Q_{ult}$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{ult} = Q_f + Q_e - W_p$$

เมื่อ :  $Q_f$  = แรงเสียดทานรอบๆผิวของเสาเข็ม

$Q_e$  = แรงต้านที่ปลายของเสาเข็ม

$W_p$  = น้ำหนักของเสาเข็ม

จากสมการด้านบนจะต้องแยกในการพิจารณาตามลักษณะของชั้นดินดังต่อไปนี้

#### 2.6.1.1 แรงเสียดทานรอบๆผิวของเสาเข็ม

จะแบ่งการพิจารณาโดยการพิจารณาจากผิวของเสาเข็มที่สัมผัสกับชั้นดิน โดยทั่วไปจะพิจารณาออกเป็น 2 ประเภท คือ ผิวของเสาเข็มสัมผัสกับชั้นดินเหนียว และผิวของเสาเข็มสัมผัสกับชั้นดินทราย เนื่องจากการเกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวของเสาเข็มกับดินแต่ละชนิดจะแตกต่างกันออกไป

#### 2.6.1-1 แรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว

สำหรับชั้นดินเหนียวนั้นในการวิเคราะห์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของเสาเข็มกับดินเหนียวนั้น จะเกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของดินเหนียว (Adhesion) ซึ่งจะทำการ

วิเคราะห์โดยอยู่บนพื้นฐานของหน่วยแรงรวม (Total Stress) โดยใช้หลักการ มุมต้านทานภายใน ( $\phi$ ) เท่ากับ 0 ซึ่งจะได้ว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) มีค่าเท่ากับค่า Cohesion หรือที่เราเรียกกันโดยทั่วไปคือวิธีแอลฟา ( $\alpha$ -Method) และสมการทั่วไปในการพิจารณาคือ

$$Q_f = \sum (f_s \cdot A_s)$$

$$f_s = \alpha \cdot S_u$$

เมื่อ :  $Q_f$  = แรงเสียดทานรอบๆของผิวเสาเข็ม

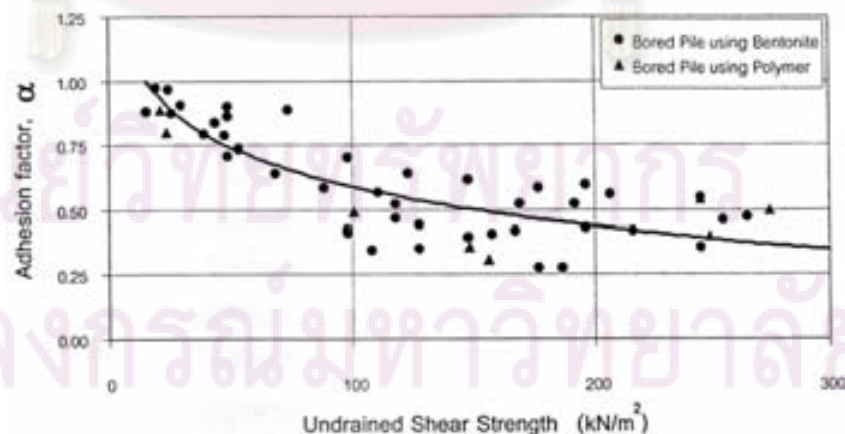
$f_s$  = หน่วยแรงเสียดทาน

$A_s$  = พื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็มกับดินในช่วงของชั้นที่พิจารณา

$\alpha$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเหนียว (Adhesion Factor)

$S_u$  = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว

สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯนั้น ธยานันท์ (2544) ได้ทำการรวบรวมผลการศึกษาของ NG 1983, Pimpasugdi 1989, สุวรรณ 2531 และชาญชัย 2542 โดยได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  กับ  $S_u$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) ของดินเหนียวกรุงเทพฯ

กับค่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเหนียว ( $\alpha$ ), ธยานันท์ 2544

### 2.6.1-2 แรงเสียดทานในชั้นทราย

สำหรับชั้นทรายนั้นในการวิเคราะห์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของเสาเข็มกับทรายนั้น จะใช้พื้นฐานของการวิเคราะห์ของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) โดยใช้หลักการของ Mohr Coulomb เนื่องจากในทรายนั้นน้ำจะซึมไหลผ่านไปได้อย่างรวดเร็ว และสมการทั่วไปในการพิจารณาคือ

$$Q_f = \sum (f_s \cdot A_s)$$

$$f_s = K_s \tan \delta \cdot \sigma'_{vi}$$

เมื่อ :  $K_s$  = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างระหว่างเสาเข็มกับทราย

$\delta$  = มุมเสียดทานระหว่างทรายกับเสาเข็ม

$\sigma'_{vi}$  = หน่วยแรงประสิทธิผลที่กึ่งกลางชั้นดินที่ทำการพิจารณา

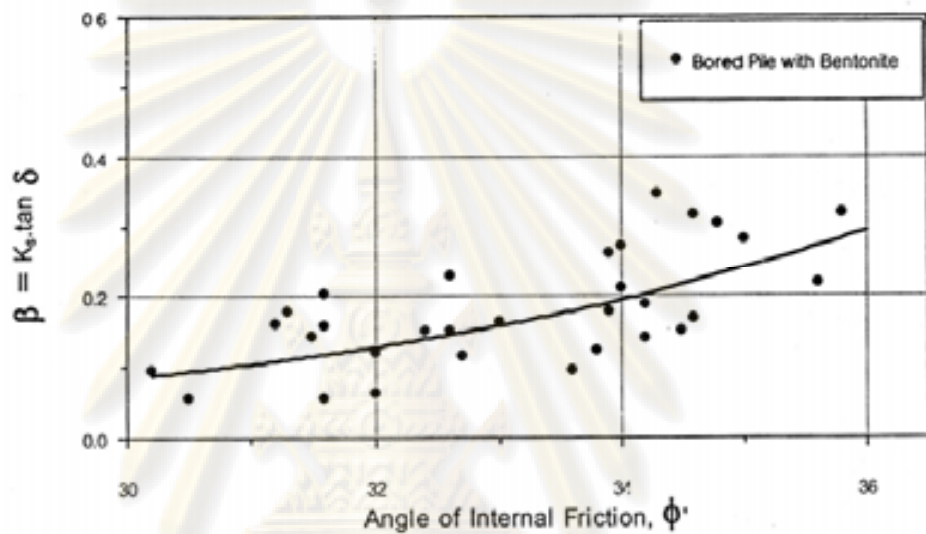
และจากค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างระหว่างเสาเข็มกับทราย ( $K_s$ ) นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามความลึก แต่ในบริเวณหัวของเสาเข็ม (Pile Head) ค่า  $K_s$  นั้นจะใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบพลาสติกของแรงคิน (Rankine Passive Earth Pressure Coefficient,  $K_p$ ) และจะลดลงตามระดับความลึก และที่ระดับความลึกมากๆ ค่าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบพลาสติกของแรงคิน ( $K_p$ ) จะลดต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาพนิ่ง (At-rest Earth Pressure Coefficient,  $K_0$ ) โดยเราสามารถแบ่งค่าของ  $K_s$  ตามกรณีได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าของ  $K_s$  ในกรณีต่างๆ

ชนิดของเสาเข็ม	$K_s$
เสาเข็มเจาะ	$\approx K_0 = 1 - \sin \phi'$
เสาเข็มสว่าน	$\approx K_0$ ถึง $1.4 K_0$
เสาเข็มตอก	$\approx K_0$ ถึง $1.8 K_0$

ค่า  $\delta$  จะขึ้นอยู่กับชนิดของผิวของเสาเข็ม, ชนิดของทรายและวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม โดยปกติค่า  $\delta$  จะมีค่าตั้งแต่  $0.5 \phi'$  ถึง  $0.8 \phi'$ , ทยานันท์ 2544

สำหรับชั้นดินกรุงเทพมหานคร ซาญชัย (2542) ได้ทำการวิจัย และรวบรวมผลการศึกษา ที่ผ่านมาของ สุวรรณ (2531) ซึ่งได้เสนอค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_s \tan \delta$  กับมุม  $\phi'$  ของเสาเข็ม เจาะระบบเปียกในกรุงเทพฯ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_s \tan \delta$  กับมุม  $\phi'$  ของชั้นทรายกรุงเทพฯ (ซาญชัย, 2542)

### 2.6.1.2 แรงต้านที่ปลายของเสาเข็ม

ในการวิเคราะห์แรงต้านที่ปลายเสาเข็มนั้น จะทำการแยกการพิจารณาเหมือนกับการพิจารณาแรงเสียดทานของเสาเข็มนั้นคือจะพิจารณาจากการที่ปลายของเสาเข็มนั้นวางอยู่ในชั้นดินแบบไหน ซึ่งในการพิจารณาก็จะแตกต่างกันออกไปด้วยขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นดิน

### 2.6.1.2-1 แรงต้านที่ปลายของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

สมการทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณแรงต้านที่ปลายของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว คือ

$$Q_e = q_e \cdot A_p$$

$$q_e = S_u \cdot N_c' + \sigma_{v0}$$

เมื่อ:  $Q_e$  = แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

$A_p$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

$S_u$  = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

$N_c'$  = สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว (Bearing Capacity Factor)

$\sigma_{v0}$  = หน่วยแรงรวมประสิทธิผลในแนวตั้งที่ระดับปลายเข็ม (Vertical Total Stress at End Pile)

สำหรับค่า  $N_c'$  ได้มีผู้ที่ทำการศึกษาเอาไว้มากมาย เช่น Sower (1961) ได้ศึกษาจากแบบจำลองพบว่าค่า  $N_c'$  นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 5.0-8.0 Whitaker and Cooke (1966) พบว่าสำหรับเสาเข็มเจาะที่มีการขยายที่ส่วนปลายของเสาเข็มและเสาเข็มเจาะปกติจะมีค่า  $N_c'$  เท่ากับ 9 ก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนตัวประมาณ 10%-15% และเมื่อมีการเคลื่อนตัว 20% ตามลำดับ Skempton (1991) ได้เสนอว่า  $N_c'$  สำหรับเสาเข็มที่มีหน้าตัดรูปทรงกลมที่มีอัตราส่วนของความลึก (L) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) มากกว่า 4 ให้ใช้ค่า  $N_c'$  เท่ากับ 9

ในดินเหนียวกรุงเทพฯนั้น Muktabhand & Suwanakui (1971) ได้ทำการศึกษาจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกพบว่าค่า  $N_c'$  นั้นต่ำกว่า 9 ชาญชัย (2542) ได้ทำการศึกษาเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะพบว่าค่า  $N_c'$  มีค่าอยู่ที่ประมาณ 4-5 สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ แต่โดยทั่วไปในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจะใช้เท่ากับ 9

### 2.6.1.2-2 แรงต้านที่ปลายของเสาเข็มในชั้นทราย

สมการทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณแรงต้านที่ปลายของเสาเข็มในชั้นทราย คือ

$$Q_e = q_e \cdot A_p$$

$$q_e = \sigma'_{vi} \cdot N'_q$$

เมื่อ:  $Q_e$  = แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

$A_p$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

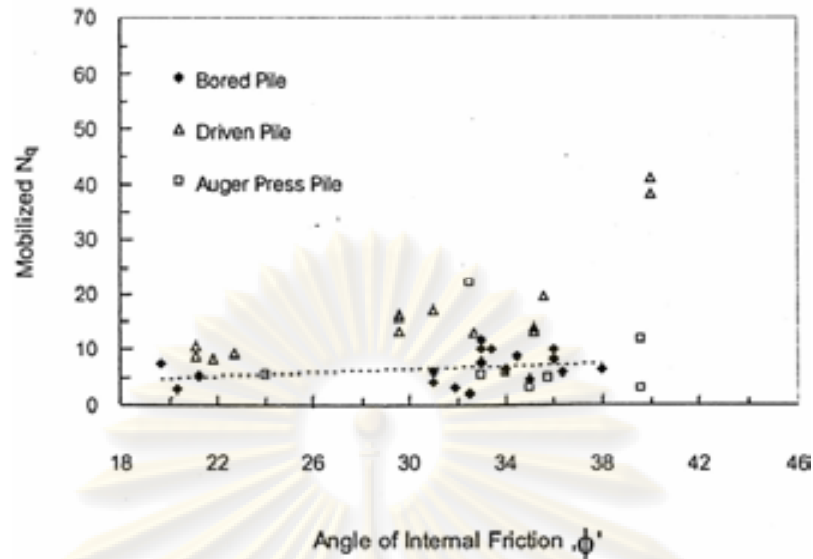
$N'_q$  = สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นดินทราย (Bearing Capacity Factor)

$\sigma'_{vi}$  = หน่วยแรงรวมประสิทธิผลในแนวตั้งที่ระดับปลายเข็ม (Vertical Total Stress at End Pile)

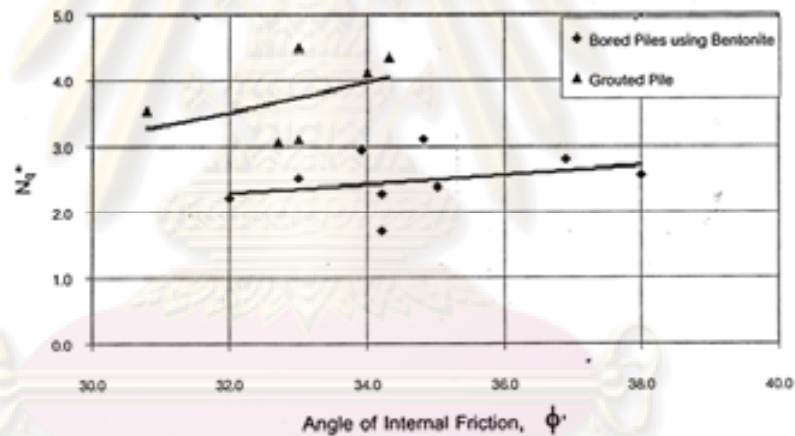
สำหรับเสาเข็มนั้นค่า  $N'_q$  จะถูกนำเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ของ  $N'_q$  กับ  $\sigma'_{vi}$  ซึ่งจะพิจารณาถึงระยะฝังสัมพัทธ์ (Relative Embedment Depth,  $D_p/B$ ) โดยในเสาเข็มเจาะค่า  $N'_q$  จะมีค่าน้อยกว่าในเสาเข็มตอกมาก เนื่องจากการขุดหลุมเจาะ และการทำความสะอาดกันหลุมที่ไม่ดีพอ

สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ นั้น Pimpasugdi (1989) ได้ทำการศึกษาและรวบรวมผลการศึกษาก่อนหน้า (NG, 1983 และสุวรรณ, 2531) ดังแสดงในรูป 2.20 ชาญชัย (2542) ได้ทำการศึกษาเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะได้เสนอค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $N'_q$  กับ  $\phi'$  โดยแบ่งเป็นกรณีเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายกับไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายดังรูป 2.21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็ม  $N_q'$  กับค่ามุมแรงเสียดทานภายใน  $\phi'$  (Pimpasugdi, 1989)



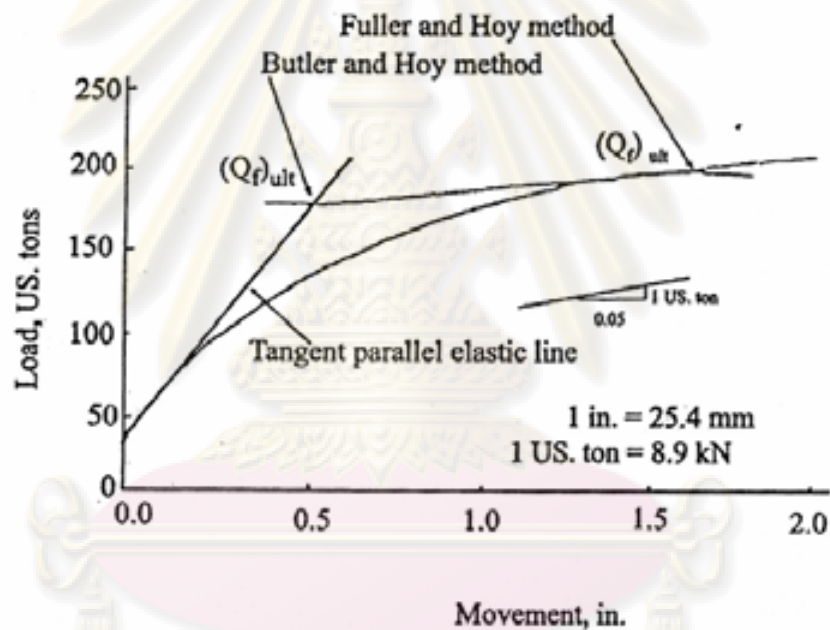
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็ม  $N_q'$  กับค่ามุมแรงเสียดทานภายใน  $\phi'$  (ชาญชัย, 2542)

## 2.6.2 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Pile Load Test)

ในการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Pile Load Test) นั้นจะได้ข้อมูล กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate Load Capacity,  $Q_{ult}$ ) และค่าการทรุดตัวของน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ในบางครั้งการทดสอบนั้นจะไม่ถึงจุดวิบัติของเสาเข็ม (Failure Load) จึงจะต้องมีการประมาณค่าของ  $Q_{ult}$  จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวของเสาเข็ม

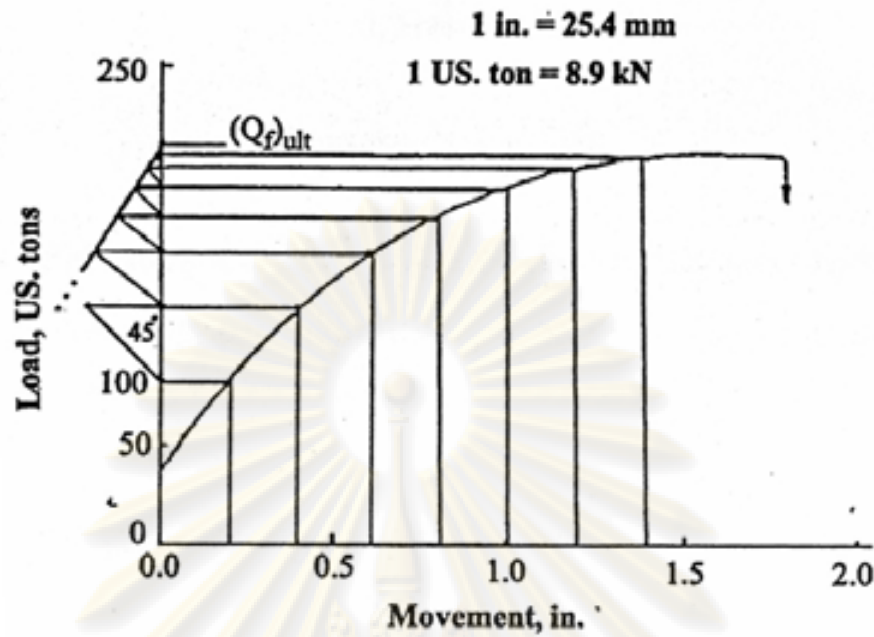


สำหรับการประมาณ  $Q_{ult}$  จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวของเสาเข็มนั้นมีหลายวิธี สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ ได้เคยมีผู้ทำการศึกษาก่อนหน้านี้ Pimpasugdi (1989), Wachiraprakarnpong (1993), Soontornsiri (1995), ชาญชัย (2542) และธยานันท์ (2544) พบว่าวิธีการคาดคะเน  $Q_{ult}$  ที่เหมาะสมกับชั้นดินกรุงเทพฯ คือ Bulter & Hoy (1977) และ Mazurkiewicz (1972) โดยวิธีของ Bulter & Hoy (1977) ดังรูปที่ 2.22 นั้นเหมาะที่จะใช้กับเสาเข็มทดสอบที่ทดสอบจนถึงจุดวิบัติ และวิธีของ Mazurkiewicz (1972) ดังรูปที่ 2.23 จะใช้กับเสาเข็มที่ทดสอบไม่ถึงจุดวิบัติ



รูปที่ 2.22 วิธีการหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของ Bulter & Hoy (1977)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.23 วิธีการหาน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของ Mazurkiewicz (1972)

โดยวัตถุประสงค์หลักของการทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเพื่อทำการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นกับวิธีทางสถิตยศาสตร์ (Static Method) โดยวิธีทำการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่จะมีวิธีการพอสังเขปดังต่อไปนี้

1. ทำการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่จะทำการทดสอบและทำหัวเสาเข็ม (Pile Cap) พร้อมด้วยเสาเข็มสมอ 4 ต้น แล้วทิ้งไว้ให้คอนกรีตมีอายุ 28 วัน
2. ทำการปรับแต่งให้ผิวสัมผัสระหว่างหัวของเสาเข็ม (Pile Cap) กับ เซลล์น้ำหนัก (Load cell) ไม่ให้เกิดเป็นผิวขรุขระ
3. ทำการติดตั้งคานอ้างอิงกับเสาสมอทั้ง 4 ต้น
4. ติดตั้งเครื่องมือวัดโดยทั่วไปที่ทำการใช้งาน
5. ทำการทดสอบโดยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกไปที่ละรอบ แล้วคณน้ำหนักเอาไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด
6. ทำการบันทึกข้อมูลในแต่ละรอบของการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนเสร็จ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ นำมาจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่เคยมีการทดสอบในเขตพื้นที่ในกรุงเทพฯ ซึ่งข้อมูลของการทดสอบของเสาเข็มนั้นจะมีการติดตั้งเครื่องมือวัดทางธรณีทั้งแบบเกจวัดความเครียด (VWSG) และเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer) แต่ในการวิเคราะห์นั้นจะไม่ใช้ผลที่ได้จากเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer) มาทำการวิเคราะห์ เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ (Extensometer) ส่วนใหญ่ติดตั้งไม่ครบทุกจุดในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงชั้นดิน แต่จะทำการติดตั้งเฉพาะเพียงจุดเดียวที่ปลายเสาเข็มหรือสองจุดเท่านั้น จึงไม่สามารถที่จะทำการวิเคราะห์หาแรงตามแนวแกนได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ผลการทดสอบที่ได้จากเกจวัดความเครียด (VWSG) ที่ติดตั้งในภายในเสาเข็มทดสอบมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาแรงตามแนวแกนของเสาเข็ม

ข้อมูลในการทดสอบนั้นได้กำหนดขอบเขตในการเก็บข้อมูลย้อนหลังไปเมื่อ 10 ปีที่แล้ว (จากพ.ศ. 2540 จนถึง ปัจจุบัน) โดยทำการรวบรวมผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ ที่มีการติดตั้งเครื่องวัดอย่างสมบูรณ์ เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยทำการรวบรวมผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ ได้จำนวน 10 ต้น ดังแสดงไว้ในตาราง 3.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 3.1 ข้อมูลของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะที่รวบรวมได้

โครงการ	หมายเลขของเสาเข็มทดสอบ	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง, มม.	ตำแหน่งของโครงการ
Amanta Condominium	16	2000	ถ.พระราม 4 กรุงเทพฯ
Embassy of Japan	CB 25	800	ถ.วิทยุ กรุงเทพฯ
Embassy of Japan	OB 53	1000	ถ.วิทยุ กรุงเทพฯ
Highway Route NO.302	STA. 10+795.75	2000	นนทบุรี
Industrial Ring Road	TP-3.1	1500	สมุทรปราการ
Southern Outer Bangkok Ring Road	BH 9	2000	สมุทรปราการ
Airfield Pavement	SPP-1	1200	สมุทรปราการ
Wat-Nakorn-IN	STA. 17+600	1500	ถ.เจริญสนิทวงศ์ 13 กรุงเทพฯ
The Met	1	1000	ถ.สาทรใต้ (ซ.7) กรุงเทพฯ
Energy Complex Group	5	1200	ถ.วิภาวดีรังสิต กรุงเทพฯ

### 3.1.1 เสาเข็มเจาะ

เสาเข็มเจาะที่ทำการรวบรวมได้นั้นมีทั้งหมด 11 ต้น ซึ่งทุกต้นนั้นได้มีติดตั้งเครื่องมือวัด และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.8 - 2.0 เมตร และมีความยาวมากกว่า 40 เมตร โดยที่จะทำการแบ่งตามลักษณะชั้นดินของปลายเสาเข็ม ซึ่งจะได้ดังนี้

- เสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่ 2  
เสาเข็มเจาะที่มีปลายหยั่งอยู่ในชั้นดินเหนียวมีจำนวน 4 ต้น คือเสาเข็มเบอร์ SPP-1, BH 9, 1 และ เบอร์ 16
- เสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายแข็งชั้นที่ 2  
เสาเข็มเจาะที่มีปลายหยั่งอยู่ในชั้นทรายมีจำนวน 6 ต้น คือ เสาเข็ม CB 25, OB 53, TP-3.1, STA. 17+600, และ 5

และจะทำการแบ่งตามปลายของเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูน และไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน ดังนี้

- เสาเข็มเจาะที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายของเสาเข็ม และปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายแข็งชั้นที่ 2  
เสาเข็มเจาะที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายของเสาเข็ม และปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายแข็งชั้นที่ 2 มีจำนวน 1 ต้น คือ STA. 17+600
- เสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายของเสาเข็ม และปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายแข็งชั้นที่ 2  
เสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายของเสาเข็ม และปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายแข็งชั้นที่ 2 มีจำนวน 5 ต้น คือ เสาเข็ม CB 25, OB 53, TP-3.1, STA. 1+987.593, และ 5
- เสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายของเสาเข็ม และปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่ 2  
เสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายของเสาเข็ม และปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่ 2 มีจำนวน 4 ต้น คือ เสาเข็ม SPP-1, BH 9, 1 และ 16

### 3.1.2 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ชั้นดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินนั้นมีความจำเป็นควบคู่ไปกับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม ในแต่ละโครงการที่ทำการก่อสร้าง เพื่อให้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แต่ข้อมูลผลการวิเคราะห์ชั้นดินส่วนใหญ่ไม่ใช่ข้อมูลของชั้นดินที่บริเวณตำแหน่งการก่อสร้างเสาเข็มทดสอบโดยตรง แต่เป็นข้อมูลของชั้นดินบริเวณพื้นที่โครงการก่อสร้างเดียวกันซึ่งจะอยู่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนไปบ้างจากความเป็นจริง

### 3.1.3 วิธีการวิเคราะห์และข้อจำกัดในการวิเคราะห์

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยอาศัยข้อมูลของการทดสอบของการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มทดสอบที่ได้มีการติดตั้งเครื่องวัดแบบเกจวัดความเครียด (VWSG) ในการวิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงเสียดทาน (Unit Skin Friction,  $f_s$ ) ที่แต่ละชั้นดินและหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Unit End Bearing Resistance,  $q_u$ ) ได้ แต่ในบางกรณีการติดตั้ง VWSG นั้นอาจจะทำการติดตั้งได้ไม่ตรงกับ การเปลี่ยนแปลงของชั้นดิน จึงทำให้ต้องตัดค่าของ VWSG นั้นทิ้งไป เพราะถ้านำมาวิเคราะห์จะทำให้ผลที่ได้ผิดเพี้ยนจากความเป็นจริงไปมาก

## 3.2. การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม

### 3.2.1 ชั้นดินเหนียว

ในการประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มจะเสนอรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion ( $\alpha$ ) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนค่า  $S_u$  สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการทดสอบ Unconfined Compression Test ส่วนชั้นดินเหนียวแข็งนั้นสามารถหาค่า  $S_u$  ได้จากความสัมพันธ์แบบสูตร

สำเร็จ (Empirical) ที่นำเสนอโดยวีระนันท์ (2526) ซึ่งเป็นการนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า SPT-N Value ที่ยังไม่ได้มีการปรับแก้ กับ ค่า  $S_u$  โดยที่เราจะทำการหาค่า Adhesion ( $\alpha$ ) จากสมการ

$$\alpha = f_s/S_u$$

เนื่องจากเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ไม่เกิดการวิบัติ ค่าหน่วยแรงเสียดทาน ( $f_s$ ) ที่ใช้จะเป็นค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ( $Q_{ult}$ )

### 3.2.2 ชั้นทราย

การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มในชั้นทราย จะเสนอรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า Friction Factor ( $\beta$ ) กับมุมเสียดทานภายในประสิทธิผล ( $\phi'$ ) โดยใช้การวิเคราะห์หาค่ากลับจากหน่วยแรงเสียดทานในชั้นทรายตามสมการต่อไปนี้

$$\beta = K_s \tan \delta = f_s/\sigma'_{vi}$$

ค่าหน่วยแรงเสียดทาน ( $f_s$ ) ในชั้นทรายทั้งชั้นที่ 1 และ 2 เนื่องจากเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ไม่เกิดการวิบัติ จะเป็นค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ( $Q_{ult}$ ) และค่า  $\sigma'_{vi}$  ที่ใช้ในการคำนวณนั้น จะทำการพิจารณาที่กึ่งกลางของชั้นทราย โดยจะพิจารณาถึงผลของการสูบน้ำบาดาลด้วย

### 3.3 การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายของเสาเข็ม

การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายของเสาเข็มที่ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายจะเสนอในรูปแบบค่าของ Mobilized Bearing Capacity,  $N'_q$  และจะแสดงความสัมพันธ์ในรูปของ  $N'_q$  กับค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) โดยที่ค่า  $N'_q$  จะสามารถหาได้จากการวิเคราะห์หาค่ากลับจากค่าหน่วยแรงที่

ปลายเสาเข็ม ( $q_e$ ) โดยที่ค่า  $q_e$  นั้นจะเป็นค่า  $q_e$  สูงสุดในชั้นทรายชั้นที่ 2 ที่ได้จากแถววัดความเครียด (VWSG) บริเวณปลายเข็ม ดังสมการ

$$N'_q = q_e / \sigma'_{vi}$$

ในการหาค่า  $\sigma'_{vi}$  ที่ใช้ในการคำนวณนั้น จะทำการพิจารณาที่กึ่งกลางของชั้นทราย โดยจะพิจารณาถึงผลของการสูบน้ำบาดาลด้วย

สำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวจะเสนอในรูปค่าของ Bearing Capacity,  $N'_c$  ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$N'_c = q_e / S_u$$

โดยที่ค่า  $q_e$  นั้นจะเป็นค่าในชั้นดินเหนียวชั้นที่ 2 เนื่องจากเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ไม่เกิดการวิบัติ ค่า  $q_e$  นั้นจะเป็นค่า  $q_e$  สูงสุดในการทดสอบ และค่า  $S_u$  นั้นจะหาจากความสัมพันธ์แบบสูตรสำเร็จ (Empirical) ระหว่างค่า SPT-N Value ที่ยังไม่ได้มีการปรับแก้ กับ ค่า  $S_u$  ที่นำเสนอโดยวีระนันท์ (2526)

อย่างไรก็ตามการถ่ายแรงในเสาเข็ม แรงเสียดทานจะเกิดขึ้นก่อนจะถ่ายลงไปที่แรงต้านที่ปลายเข็ม ทำให้เมื่อทำการวิเคราะห์ค่า  $N'_q$  อาจจะได้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 4

### การวิเคราะห์และอภิปรายผลการวิจัย

#### 4.1 การแปรผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์นั้น ได้นำทฤษฎี Fellnius 's Method, 1989 มาใช้ในการหาแรงภายในเสาเข็มที่เกิดขึ้น และ แสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับค่าการทรุด (Load – Settlement curve) ซึ่งแสดงไว้อยู่ในภาคผนวก โดยในการแปรผลการทดสอบเพื่อให้ได้น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้การพิจารณาช่วงที่เกิดน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Qult)

#### 4.2 การประมาณแรงเสียดทานด้านข้าง

การประมาณหาแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มนั้นจะนำเสนอในรูปแบบของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่า adhesion factor ( $\alpha$ ) และค่า friction factor ( $\beta$ ) ดังที่ได้นำเสนอไว้ในเรื่องการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในบทที่ 2 โดยในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องนั้น ต้องทำการวิเคราะห์หาค่ากลับ (Back Analysis) จากค่าแรงเสียดทานด้านข้าง ( $f_u$ ) กับค่าการทรุดตัวที่หัวเข็ม ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้ข้อมูลผลการวัดค่าการส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ (Load Transfer) จากหัวเข็ม

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นเป็นข้อมูลที่รวบรวมได้ในตำแหน่งที่มีการติดตั้ง VWSG ช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงชั้นดินในแต่ละชั้นดินตลอดจนถึงปลายของเสาเข็ม โดยมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 ชั้นดินเหนียว

การประมาณค่า adhesion factor ( $\alpha$ ) จากค่าแรงเสียดทานด้านข้าง ( $f_u$ ) ในงานวิจัยนี้ได้มาจากการวิเคราะห์ โดยการแปรผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ได้มีการติดตั้งเกจวัดความเครียด (VWSG) ซึ่งเสนออยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่า adhesion factor ( $\alpha$ )

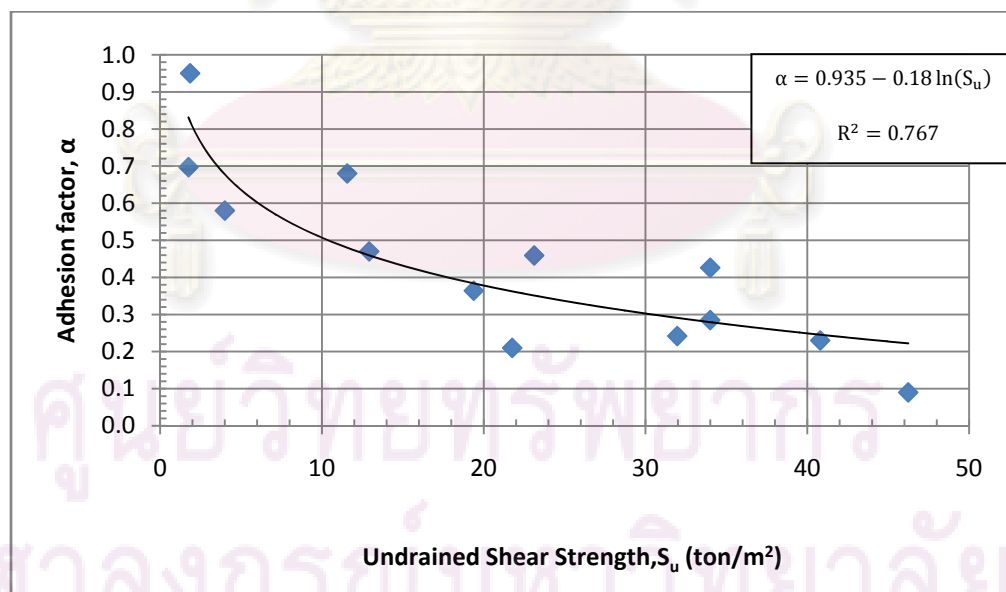
กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) ที่ได้จากการทดสอบ Unconfined Compression โดยทำการเฉลี่ยตลอดชั้นดินเหนียว โดยแบ่งประเภทของการพิจารณาดังต่อไปนี้

#### 4.2.1.1 เสาค้ำที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาค้ำโดยปลายของเสาค้ำอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า adhesion factor ( $\alpha$ ) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) นั้นได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression Analysis) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้มาจากการรวบรวมข้อมูลเสาค้ำที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดอยู่ในกรณีนี้เป็นจำนวน 5 ต้น และจากรูปที่ 4.1 สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\alpha = 0.935 - 0.18 \ln(S_u) \quad R^2 = 0.767$$

โดยที่ค่า  $\alpha$  ที่วิเคราะห์ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.95 - 0.1 เมื่อ  $S_u$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 - 46.0 ตันต่อตารางเมตร



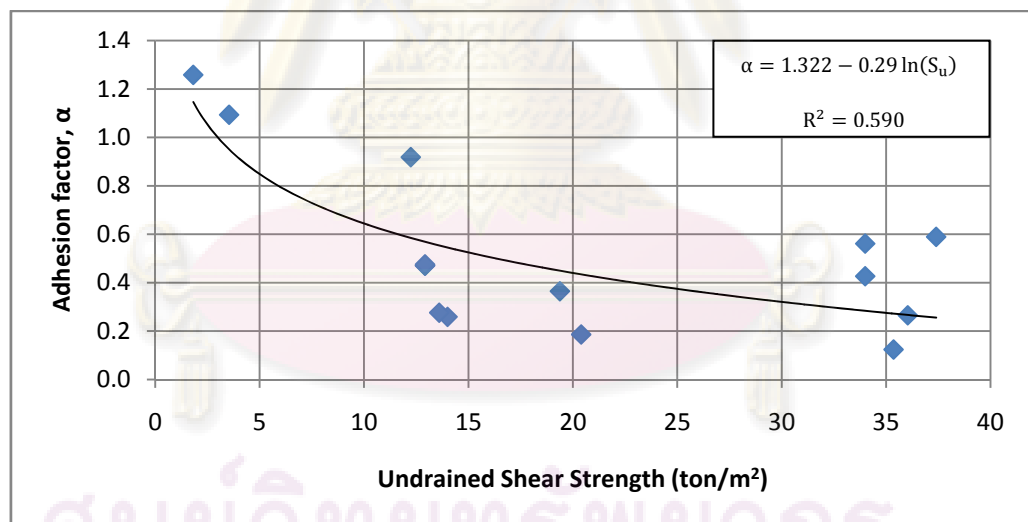
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า adhesion factor,  $\alpha$  กับ Undrained Shear Strength,  $S_u$  ของเสาค้ำที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาค้ำโดยปลายของเสาค้ำอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

#### 4.2.1.2 เสาคementที่ไม่มีกรดซัลฟิวริกที่ปลายเสาคementโดยปลายของเสาคementอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า adhesion factor ( $\alpha$ ) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) นั้นได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression Analysis) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ได้มาจากการรวบรวมข้อมูลเสาคementที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดอยู่ในกรณีนี้เป็นจำนวน 4 ต้น โดยในการวิจัยนี้ไม่ได้ทำการพิจารณาเสาคementที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่บริเวณปลายเสาคement (Wat-Nakorn-IN, STA. 17+600) เนื่องจากข้อมูลที่รวบรวมได้น้อยเกินไปจึงไม่สามารถนำมาทำการพิจารณาได้ และจากรูปที่ 4.1 สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\alpha = 1.411 - 0.33 \ln(S_u) \quad R^2 = 0.560$$

โดยที่ค่า  $\alpha$  ที่วิเคราะห์ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.1 – 0.1 เมื่อ  $S_u$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 – 36.0 ตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า adhesion factor,  $\alpha$  กับ Undrained Shear Strength,  $S_u$  ของเสาคementที่ไม่มีกรดซัลฟิวริกที่ปลายเสาคementโดยปลายของเสาคementอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

## 4.2.2 ชั้นดินทราย

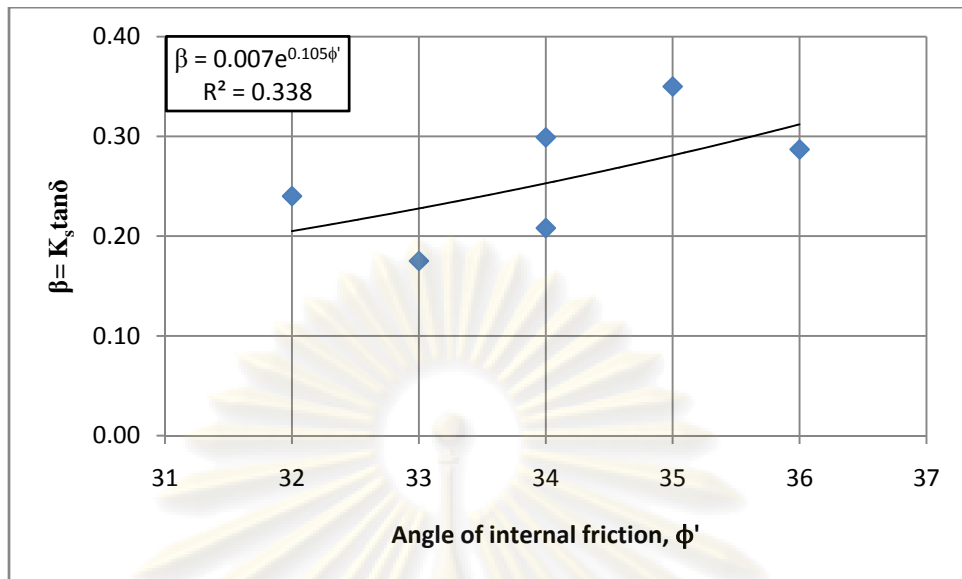
การประมาณค่า  $\beta$  (Burland, 1973) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $K_s \tan \delta$  สามารถทำการวิเคราะห์กลับจากค่าแรงเสียดทานด้านข้าง ( $f_s$ ) ของเสาเข็มในช่วงที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดกระทำ เนื่องจากเสาเข็มไม่เกิดการวิบัติ ซึ่งจะนำเสนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับมุมต้านทานภายในของทราย ( $\phi'$ ) โดยค่า Effective Overburden Pressure ( $\sigma'_v$ ) จะพิจารณาผลการ drawdown ของแรงดันน้ำใต้ดิน (Piezometric Drawdown) ซึ่งพิจารณาที่จุดกึ่งกลางของชั้นดิน

### 4.2.2.1 เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่สอง

ผลการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ  $\phi'$  สำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่สองจำนวน 5 ต้น โดยในการวิจัยนี้ไม่ได้ทำการพิจารณาเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่บริเวณปลายเสาเข็ม (Wat-Nakorn-IN, STA. 17+600) เนื่องจากข้อมูลที่รวบรวมได้น้อยเกินไปจึงไม่สามารถนำมาทำการพิจารณาได้ และจากผลการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ  $\phi'$  จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.3 และพบว่า

$$\beta = (0.007)e^{0.105\phi'} \quad R^2 = 0.338$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



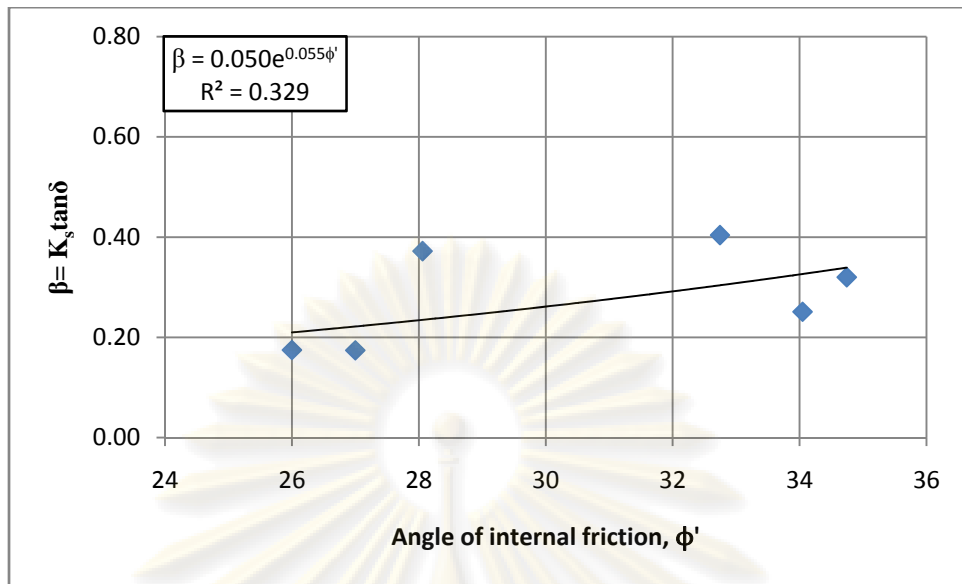
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับ  $\phi'$  ของเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่สอง

#### 4.2.2.2 เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

ผลการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ  $\phi'$  สำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สองจำนวน 4 ต้น โดยได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.4 และพบว่า

$$\beta = (0.050)e^{0.055\phi'} \quad R^2 = 0.329$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับ  $\phi'$  ของเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

#### 4.3 การประมาณค่าแรงต้านที่ปลายเข็ม

สำหรับการประมาณแรงต้านที่ปลายเข็มได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากเสาเข็มที่ได้มีการติดตั้งเครื่องเกจวัดความเครียด (VWSG) โดยที่ปลายเสาเข็มอยู่ในสถานะชั้นดินต่างกันไป 2 สถานะคือ เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนโดยที่ปลายเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง และปลายเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง ซึ่งผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ Bearing Capacity,  $N'_c$  สำหรับเสาเข็มที่ปลายอยู่ในชั้นดินเหนียว และ Bearing Capacity,  $N'_c$  สำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทราย ซึ่งได้ทำการพิจารณา Effective Overburden Pressure ( $\sigma'_{vi}$ ) ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นค่าที่ได้ทำการพิจารณาผลของการ drawdown ของแรงดันน้ำใต้ดินด้วย (Piezometric Drawdown)

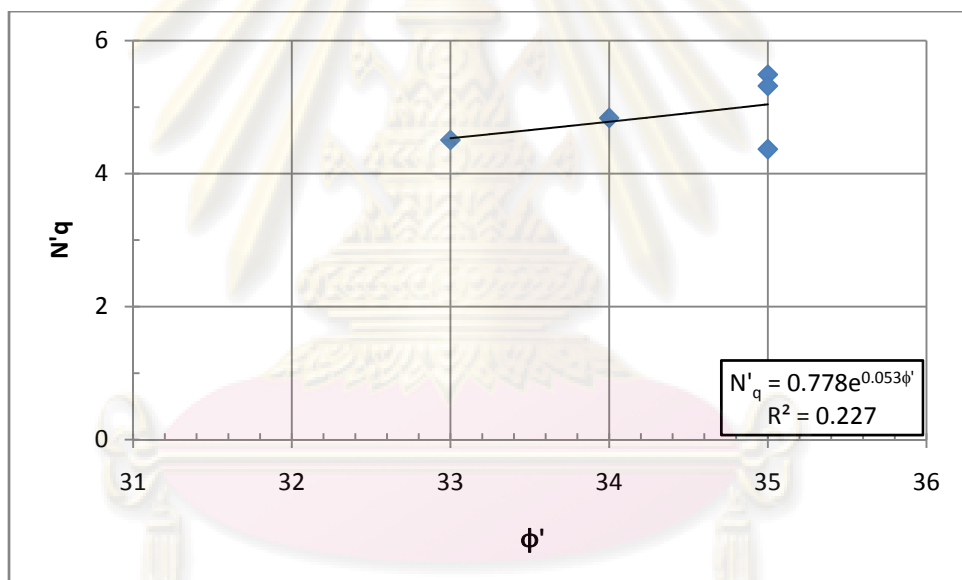
ค่า Bearing Capacity,  $N'_c$  นี้ โดยทั่วไปจะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มของมุม  $\phi'$  ซึ่งตามปกติค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานสูงสุดของเสาเข็มจะเกิดขึ้นหลังจากกำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มพัฒนาจนถึงค่าสูงสุดก่อน ส่วนเสาเข็มทดสอบที่ไม่ถึงจุดวิบัติทำให้กำลังรับน้ำหนักแบกทานของ

เสาเข็มไม่สามารถพัฒนาถึงขั้นสูงสุดได้ ดังนั้นค่า  $N'_q$  ที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าจะมีค่าต่ำเกินไป รายละเอียดผลการวิเคราะห์หาค่า  $N'_q$  และ  $N'_c$  โดยแยกตามสภาวะที่ปลายเสาเข็มได้ดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่สอง

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N'_q$  กับค่ามุม  $\phi'$  สำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่สองจำนวน 5 ต้นแสดงอยู่ในรูปที่ 4.5 และพบว่ามีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$N'_q = (0.778)e^{0.053\phi'} \quad R^2 = 0.227$$



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N'_q$  กับ  $\phi'$  ของเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม โดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่สอง

#### 4.3.2 เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

ผลการวิเคราะห์สำหรับการหาค่า Bearing Capacity,  $N'_c$  สำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สองจำนวน 4 ต้น แสดงอยู่ในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าค่า  $N'_c$  ของเสาเข็มจะอยู่ในช่วง 5.8 -6.2

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Bearing Capacity,  $N'_c$

เสาเข็ม	$S_u$ (t/m <sup>2</sup> )	$N'_c$
BH 9	37	5.86
SPP-1	35	6.03
16	38	6.27
1	36	5.93

จากการวิจัยของ Muktabhand and Suwanakul (1971) นั้นค่า  $N'_c$  มีค่าได้ไม่เกิน 8 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย

4.4 การประมาณค่า Load – Deformation เบื้องต้นสำหรับเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ

ข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดในชั้นดินกรุงเทพฯ สำหรับงานวิจัยนี้ถือว่ามีพอประมาณสำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม (Normal Bored Pile) ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่แต่ละการทดสอบวันนั้นๆ

ลักษณะโดยทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ โดยรวมที่ประเมินจากผลการเจาะสำรวจ และทดสอบคุณสมบัติของดินในบริเวณที่มีการก่อสร้างเสาเข็ม จะประกอบไปด้วยชั้นดินประมาณ 5 ชั้น คือ

1. ชั้น Soft Clay to Medium Stiff Silty Clay
2. ชั้น Stiff Clay to 1<sup>st</sup> Very Stiff Clay
3. ชั้น 1<sup>st</sup> Dense Sand to 1<sup>st</sup> Very Dense Silty Sand
4. ชั้น 2<sup>nd</sup> Very Stiff Clay to Hard Silty Clay
5. ชั้น 2<sup>nd</sup> Dense Sand to 2<sup>nd</sup> Very Dense Silty Sand



โดยทั่วไปผลการวิเคราะห์หาค่าแรง ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งเกจวัดความเครียด (VWSG) ซึ่งจะติดตั้งในแต่ละช่วงของชั้นดินสามารถนำมาทำการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Unit Skin Friction) และค่าหน่วยแรงต้านที่ปลายเข็ม (Unit End Bearing Resistance) กับค่าการทรุดตัวของหัวเข็ม และจากผลการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่าการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกับสภาพที่เกิดขึ้นจริง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่าง (Unit Skin Friction) และค่าหน่วยแรงต้านที่ปลายเข็ม (Unit End Bearing Resistance) กับค่าความเครียด (Strain,  $\epsilon$ ) ในแต่ละชั้นดิน ซึ่งภายหลังจากการกำหนดข้อมูลสภาพชั้นดิน ขนาด และความยาวของเสาเข็มเจาะที่จะทำการพิจารณา ก็จะสามารถประมาณค่า Load – Deformation เบื้องต้นสำหรับเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเบื้องต้นต่อไป โดยผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานกับความเครียดในแต่ละชั้นดิน แสดงอยู่ในรูปที่ 4.6 และพบว่ามีความสัมพันธ์กันดังสมการ

1. ชั้น Soft Clay to Medium Stiff Silty Clay

$$\text{Soft Clay: } f_s = 0.156 \ln(\epsilon) + 2.332 \quad R^2 = 0.725$$

$$\text{Medium Stiff Silty Clay: } f_s = 0.391 \ln(\epsilon) + 3.904 \quad R^2 = 0.968$$

2. ชั้น Stiff Clay to 1<sup>st</sup> Very Stiff Clay

$$\text{Stiff Clay: } f_s = 0.902 \ln(\epsilon) + 11.72 \quad R^2 = 0.902$$

$$1^{\text{st}} \text{ Very Stiff Clay: } f_s = 1.359 \ln(\epsilon) + 16.70 \quad R^2 = 0.720$$

3. ชั้น 1<sup>st</sup> Dense Sand to 1<sup>st</sup> Very Dense Silty Clay

$$1^{\text{st}} \text{ Dense Sand: } f_s = 0.953 \ln(\epsilon) + 13.10 \quad R^2 = 0.758$$

$$1^{\text{st}} \text{ Very Dense Silty Sand: } f_s = 3.048 \ln(\epsilon) + 38.14 \quad R^2 = 0.710$$

4. ชั้น 2<sup>nd</sup> Very Stiff Clay to Hard Silty Clay

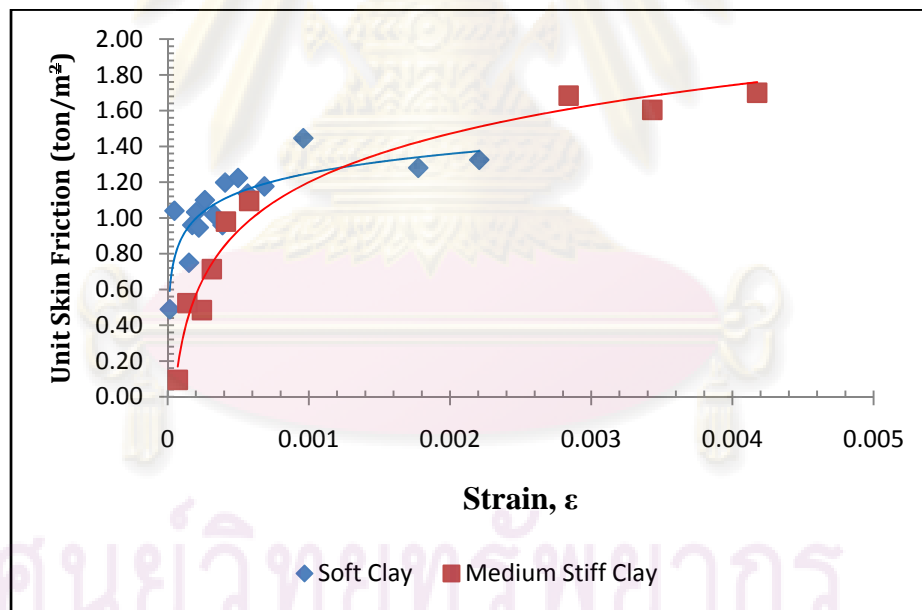
$$2^{\text{nd}} \text{ Very Stiff Clay: } f_s = 1.160 \ln(\epsilon) + 16.56 \quad R^2 = 0.758$$

$$\text{Hard Silty Clay: } f_s = 2.046 \ln(\epsilon) + 29.32 \quad R^2 = 0.844$$

5. ชั้น 2<sup>nd</sup> Dense Sand to 2<sup>nd</sup> Very Dense Silty Sand

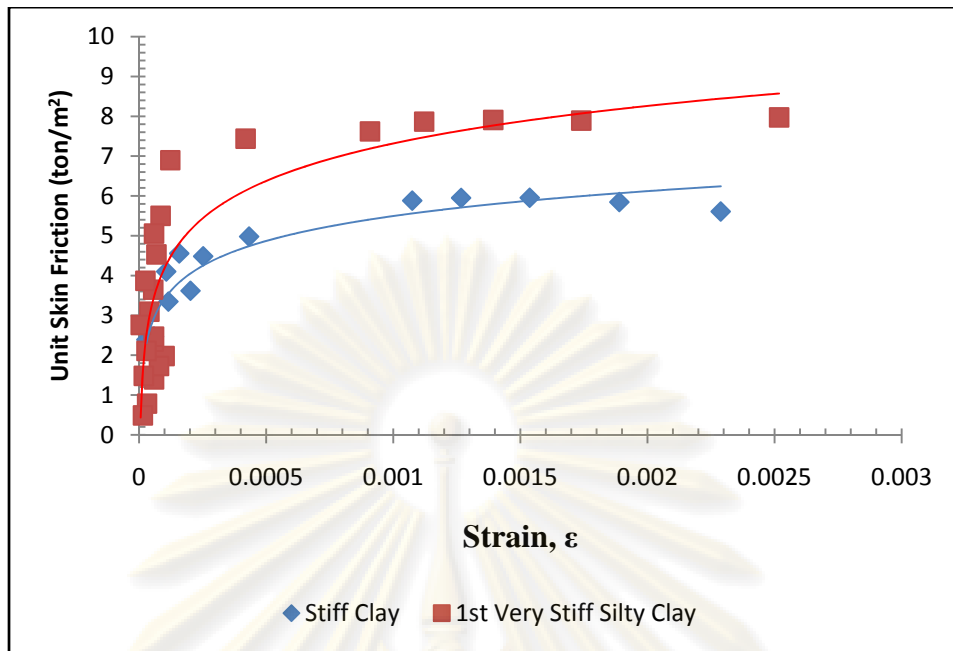
$$2^{\text{nd}} \text{ Dense Sand: } f_s = 2.746 \ln(\epsilon) + 33.81 \quad R^2 = 0.876$$

$$2^{\text{nd}} \text{ Very Dense Silty Sand: } f_s = 4.850 \ln(\epsilon) + 64.26 \quad R^2 = 0.795$$

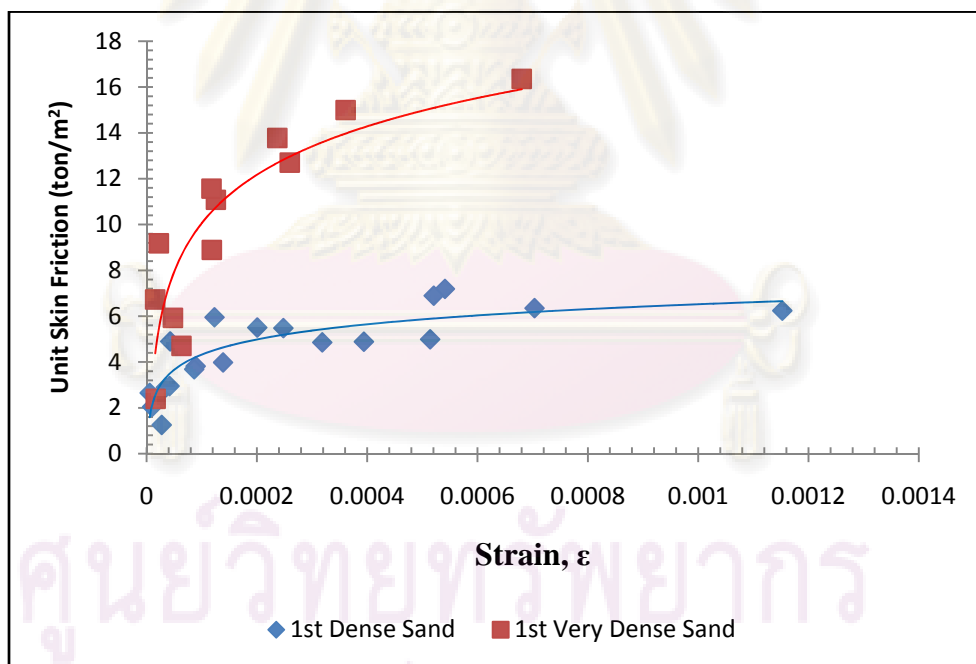


## 1. ชั้น Soft Clay to Medium Stiff Silty Clay

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานกับความเครียดในแต่ละชั้นดินสำหรับเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ



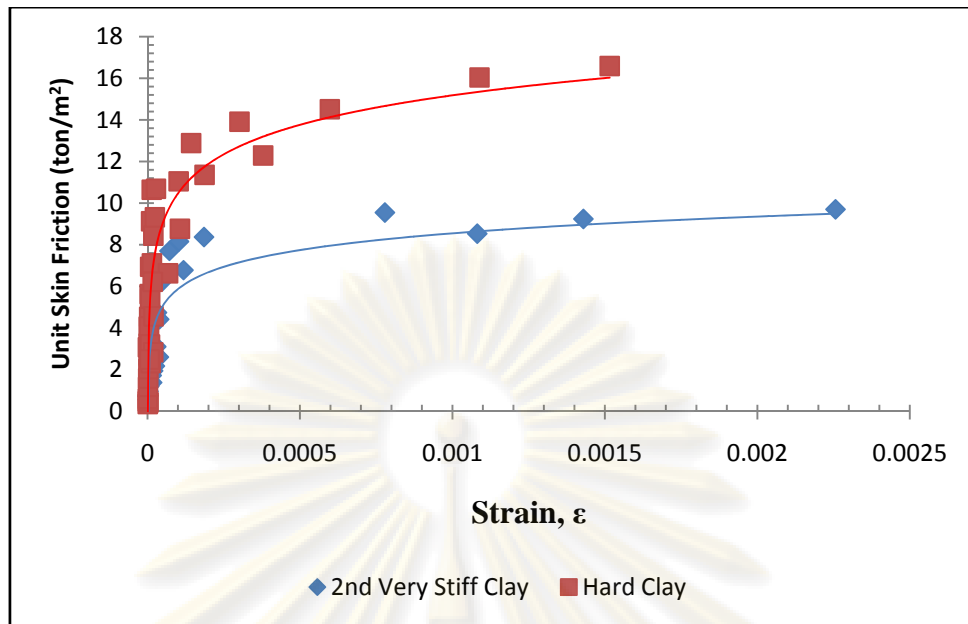
2. ชั้น Stiff Clay to 1<sup>st</sup> Very Stiff Clay



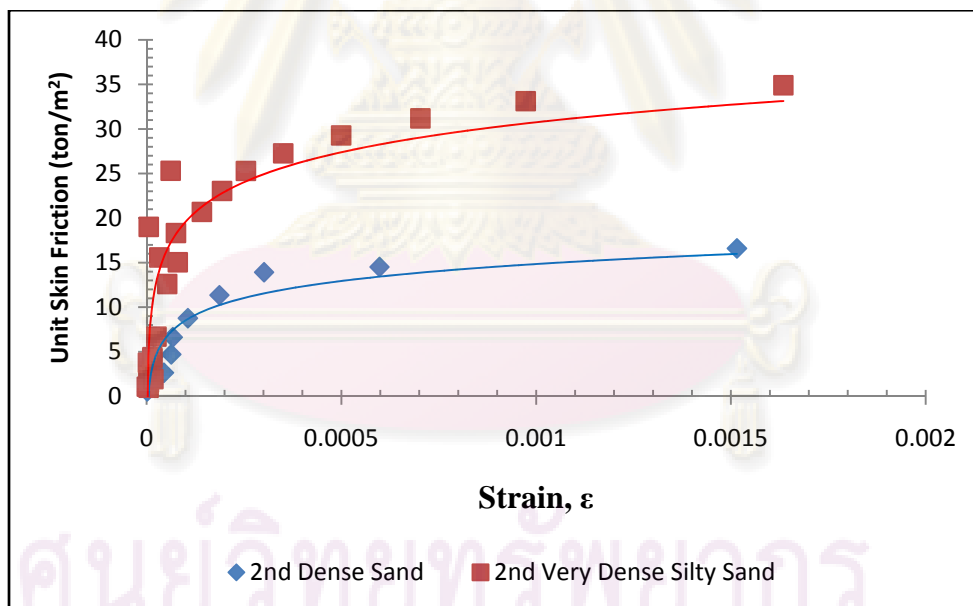
3. ชั้น 1<sup>st</sup> Dense Sand to 1<sup>st</sup> Very Dense Silty Clay

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานกับความเครียดในแต่ละชั้นดินสำหรับเสาเข็ม

เจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ



4. ชั้น 2<sup>nd</sup> Very Stiff Clay to Hard Silty Clay



5. ชั้น 2<sup>nd</sup> Dense Sand to 2<sup>nd</sup> Very Dense Silty Sand

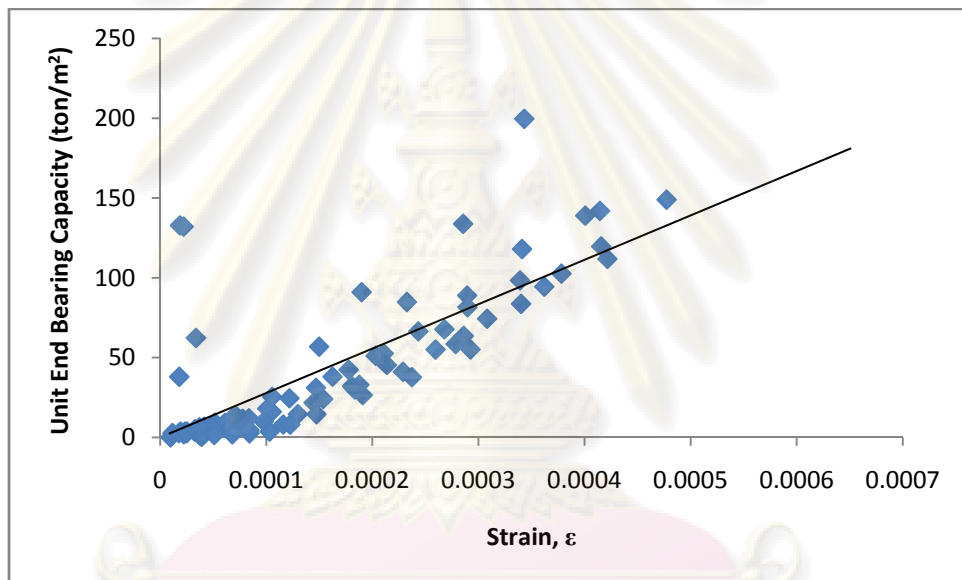
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานกับความเครียดในแต่ละชั้นดินสำหรับเสาเข็ม

เจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ

โดยที่  $f_u$  คือค่าหน่วยแรงเสียดทานด้านข้างระหว่างผิวของเสาเข็มกับดินรอบข้างอยู่ในหน่วย ตันต่อตารางเมตร และค่า  $\varepsilon$  คือค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นดินไม่มีหน่วย

และสำหรับผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มกับค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่หัวเข็ม จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.7 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$q_e = (2.7816 \times 10^4) \varepsilon \quad R^2 = 0.615$$



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มกับค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณหัวเข็มสำหรับเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ

โดยที่  $q_u$  คือค่าหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มอยู่ในหน่วยตันต่อตารางเมตรกับค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณหัวเข็มไม่มีหน่วย

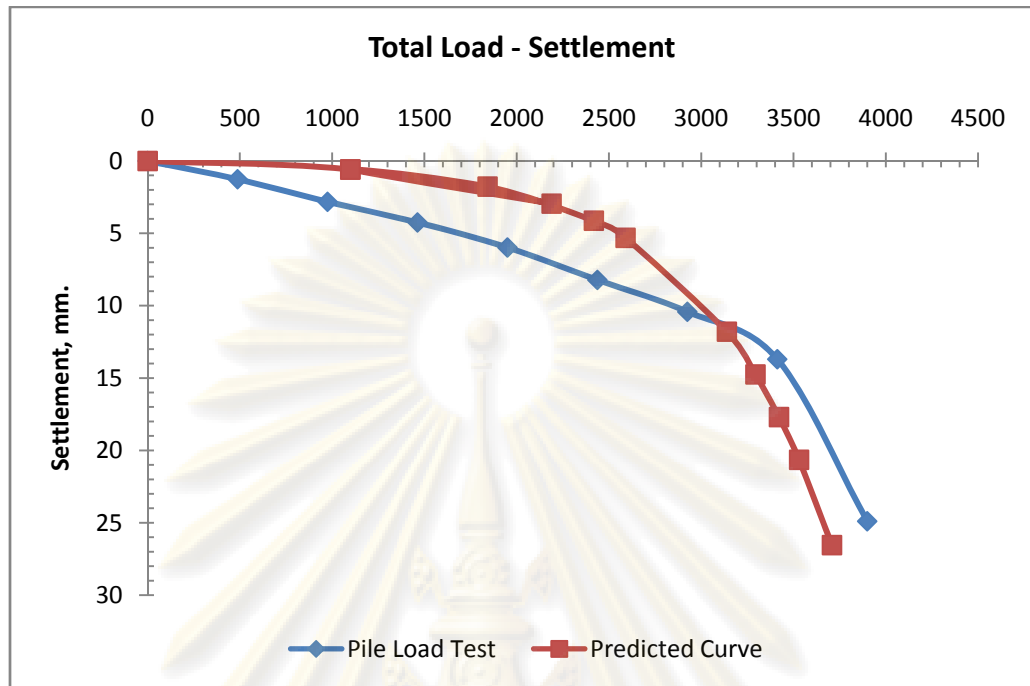
จากการประมาณข้างต้นข้อมูลที่เป็นในการประมาณค่า Load - Deformation เบื้องต้นของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ นั้น ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, ความยาวของเสาเข็ม และข้อมูลในการแบ่งชั้นดิน

(Soil Profile) สำหรับข้อมูลในการแบ่งชั้นดินนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการสรุปออกมาโดยสังเขป เพื่อให้ง่ายต่อการเลือกการใส่สมการในช่วงต้นดังตารางที่ 4.2

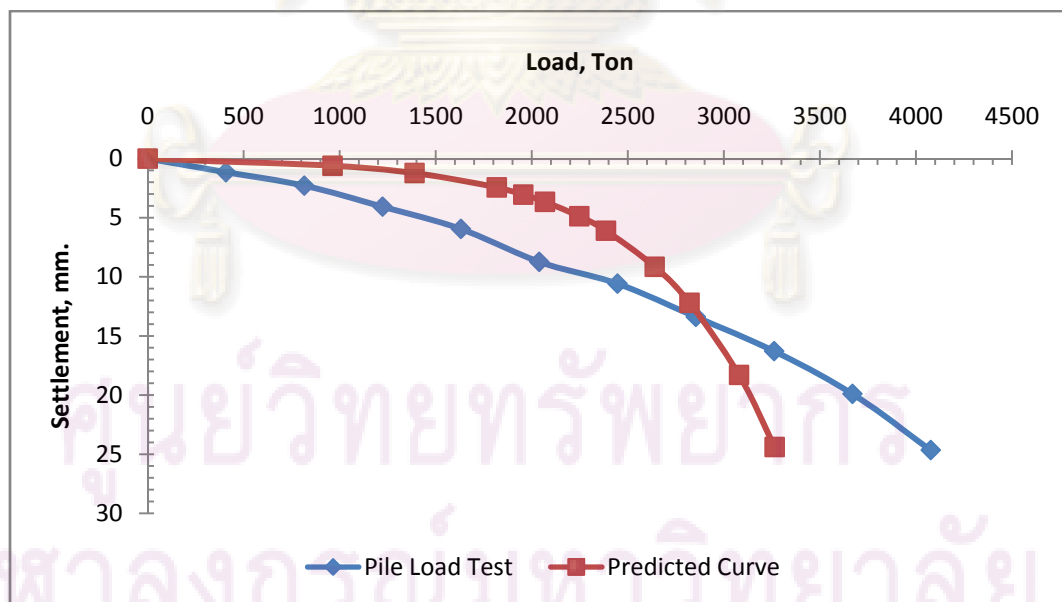
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์

เข็ม	ชั้นดิน	ประเภทของชั้นดิน	หน่วยน้ำหนัก ของดิน, $\gamma_t(\text{ton/m}^3)$	ปริมาณความชื้น, $w_n(\%)$	ค่า SPT-N Value (blows/ft)
	1	Soft Clay	1.5 - 1.6	> 70	-
	2	Medium Stiff Silty Clay	1.6 - 1.7	60 - 50	6
	3	Stiff Clay to 1st Very Stiff Clay	1.8 - 2.0	40 - 30	14 - 19
	4	1st Dense Sand to 1st Very	2.0	-	20 - 30
	5	2nd Very Stiff Clay	2.0	20 - 16	25 - 35
	6	Hard Clay	2.0	-	43 - 59
	7	2nd Dense Sand	2.0	-	50 - 60
	8	2nd Very Dense Sand	2.0	-	> 60

จากตารางที่ 4.2 นั้นทำให้สามารถที่จะเลือกสมการที่ใช้ในการพิจารณา โดยอาจจะพิจารณาจาก ค่า SPT-N Value โดยทำการกำหนดค่าความเครียด ( $\epsilon$ ) ใดๆ ก็จะสามารถประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุก และค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในค่าความเครียดนั้นๆได้ แต่อย่างไรก็ตามความถูกต้องของผลการวิเคราะห์อาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากความหลากหลายของข้อมูลทำการทดสอบ และข้อมูลผลการเจาะสำรวจดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนั้นในการประมาณผลการวิเคราะห์ Load - Deformation ที่ได้เป็นเพียงแนวทางการออกแบบเบื้องต้นเท่านั้น และจากผลการประมาณ Load - Deformation เบื้องต้น ในที่นี้ได้ทำการเลือกเสาเข็มบางต้นที่ใช้ประกอบงานวิจัยในการตรวจสอบความถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 4.8

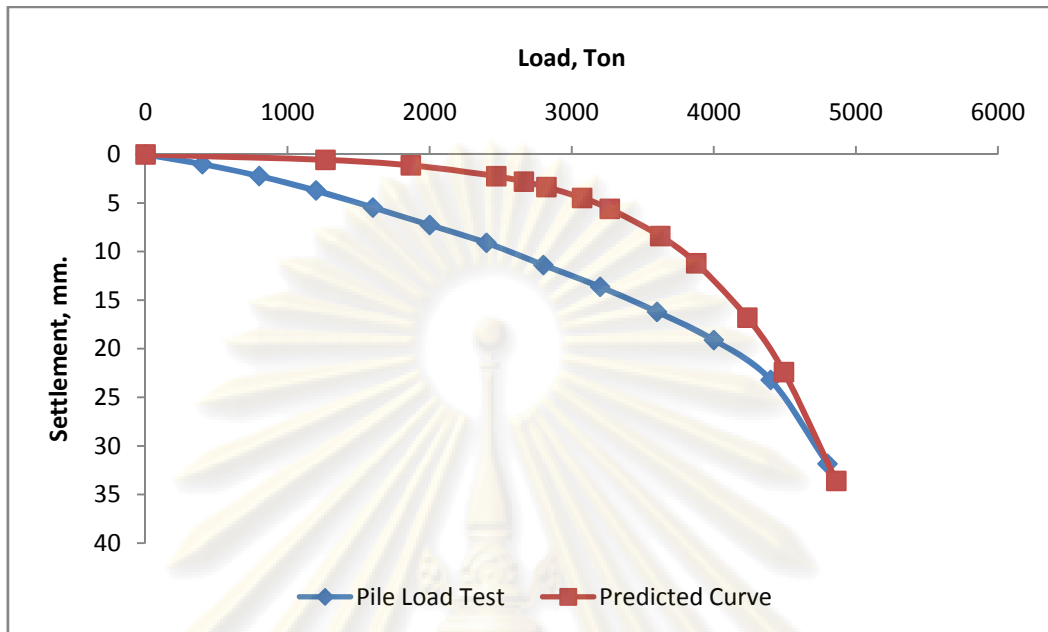


1. เสาค้ำเข็มเจาะเบอร์ 16

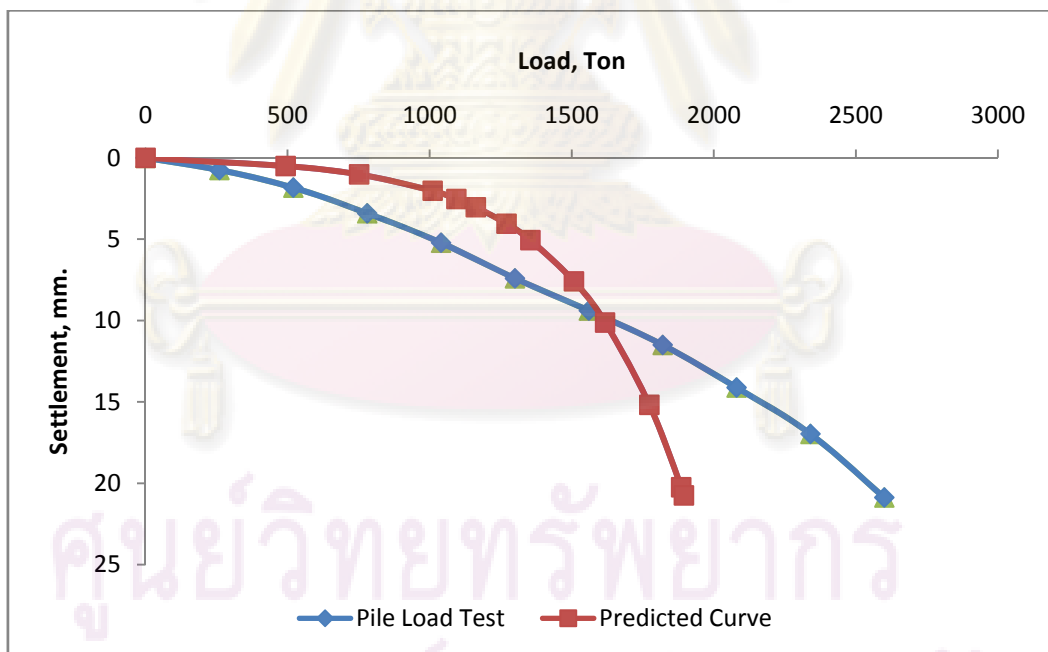


2. เสาค้ำเข็มเจาะเบอร์ Sta. 10+795.75

รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบระหว่างผลการประมาณค่า Load – Deformation กับค่าที่บันทึกได้



3. เสาเข็มเจาะเบอร์ BH – 19



4. เสาเข็มเจาะเบอร์ Sta. 17+600

รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบระหว่างผลการประมาณค่า Load – Deformation กับค่าที่บันทึกได้



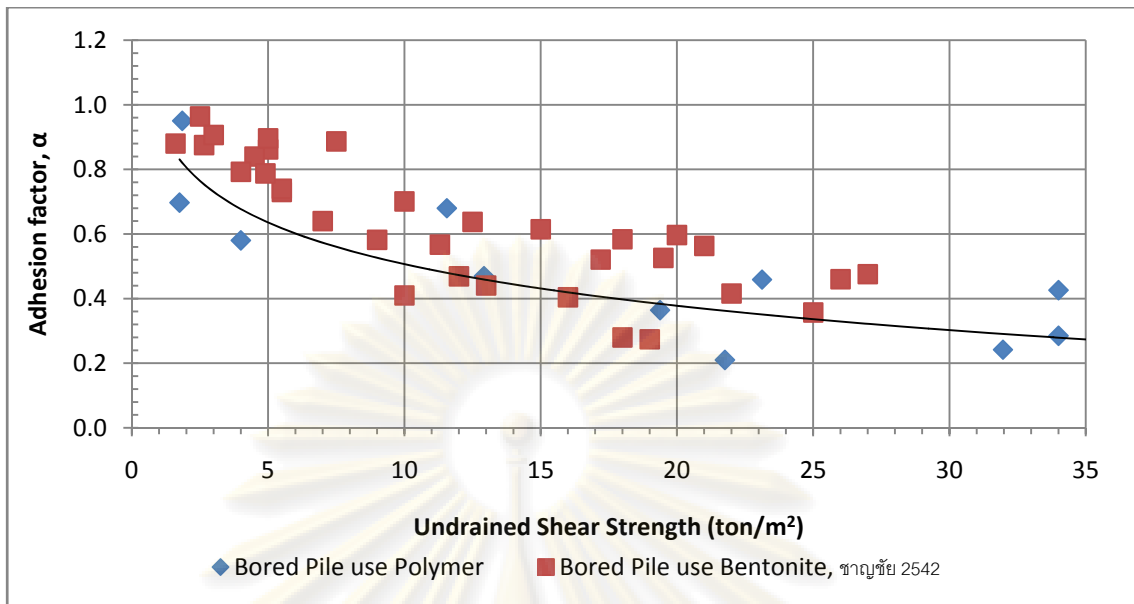
#### 4.5 การเปรียบเทียบและการอภิปรายค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็ม

ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้สำหรับชั้นดินเหนียวคือค่า adhesion factor ( $\alpha$ ) และสำหรับชั้นทรายคือค่า friction factor ( $\beta = K_s \tan \delta$ ) และค่า  $N'_q$  โดยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

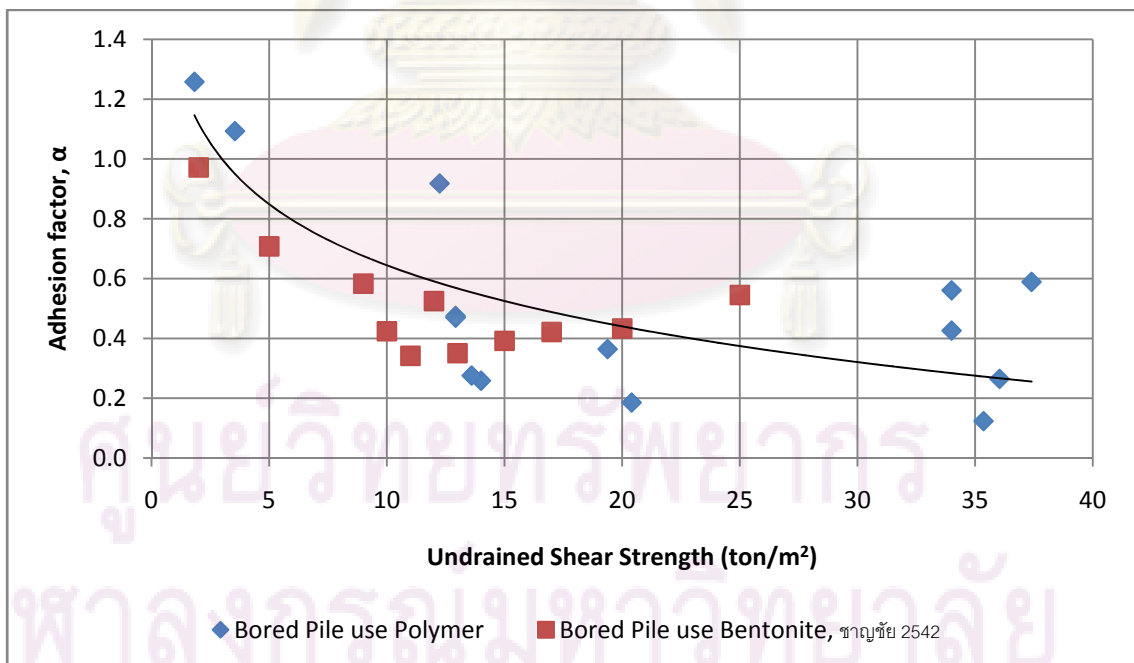
##### 4.5.1 ค่า adhesion factor ( $\alpha$ )

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่าค่าความสัมพันธ์ของค่า  $\alpha$  กับค่า  $S_u$  ในบริเวณที่ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียว จะมีค่า  $\alpha$  ต่ำกว่าบริเวณที่ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายเพียงเล็กน้อย อันเนื่องมาจากการที่ค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของชั้นดิน 2<sup>nd</sup> Dense Sand to 2<sup>nd</sup> Very Dense Silty Sand มีค่าสูงกว่าชั้น 2<sup>nd</sup> Very Stiff Clay to Hard Silty Clay โดยชั้นดินที่ได้ปลายเสาเข็มที่แข็งจะมีผลให้การรับแรงเสียดทานได้ดีขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ค่า  $\alpha$  กับ  $S_u$  ของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลิเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะโดยที่ไม่มีการอัดดินน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม ซึ่งปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองและชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สองดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ พบว่าเมื่อนำค่า  $\alpha$  ที่ได้จากการวิเคราะห์มาทำการเปรียบเทียบกับค่าของ  $\alpha$  ที่ได้จากการวิจัยของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ (ชาญชัย, 2542) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าค่า  $\alpha$  ที่ได้อยู่ในช่วงเดียวกัน อันเนื่องจากสารละลายโพลิเมอร์ไม่ก่อให้เกิดเยื่อบูทึบน้ำขึ้นในชั้นดินเหนียว และสารละลายเบนโทไนท์จะไม่เกิดเยื่อบูทึบน้ำ (Filter Cake) ในชั้นดินเหนียว และสารละลายเบนโทไนท์ไม่สามารถซึมเข้าไปในชั้นดินเหนียว ทำให้ไม่เกิดการสะสมตัวของอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) จากสารละลายเบนโทไนท์ ดังนั้นค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มทั้ง 2 ประเภทนี้ไม่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ ทยานันท์, 2544



รูปที่ 4.9 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  กับ  $S_u$  ของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ และ สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุม โดยที่ปลายของเสาเข็มไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนและอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

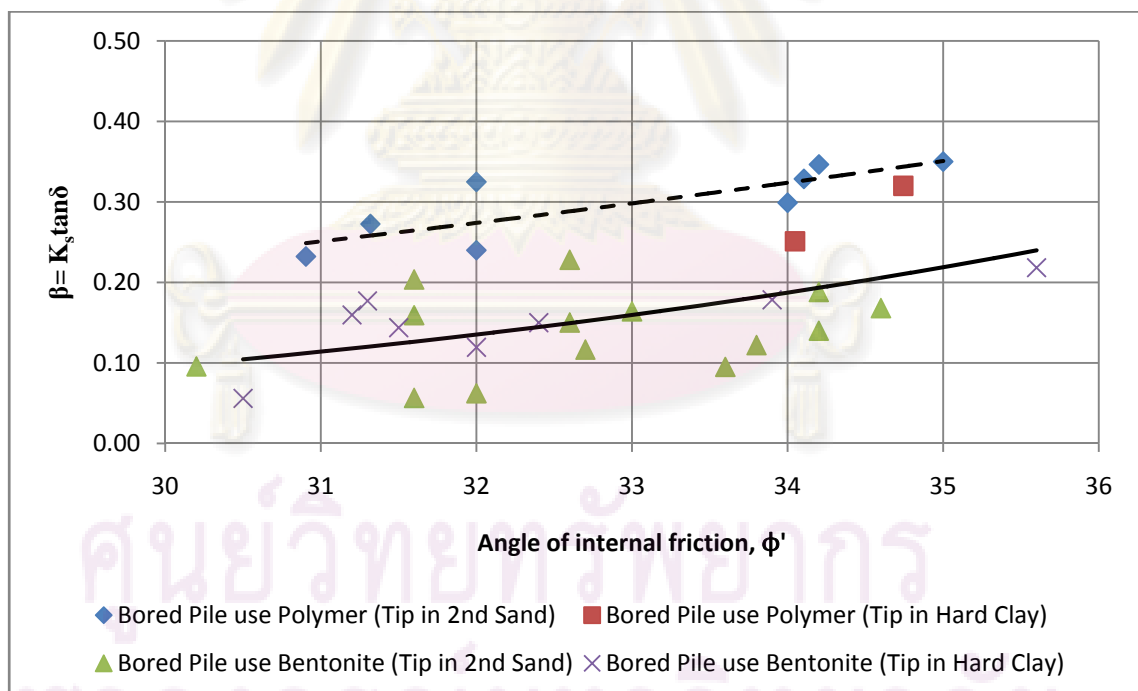


รูปที่ 4.10 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  กับ  $S_u$  ของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ และ สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุม โดยที่ปลายของเสาเข็มไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนและอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

#### 4.5.2 ค่า friction factor ( $\beta = K_s \tan \delta$ )

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นทรายเพื่อหาค่าพารามิเตอร์  $\beta$  ที่เสนอโดย Burland (1973) ในงานวิจัยนี้พบว่าในการวิเคราะห์หาค่า  $\beta$  จากชั้นทรายชั้นที่หนึ่งของกรุงเทพฯ นั้นค่า  $\beta$  ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าเสาเข็มที่ใช้เบนโทไนท์อย่างชัดเจน และจากการวิเคราะห์หาค่า  $\beta$  จากชั้นทรายชั้นที่สองของกรุงเทพฯ นั้นมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับเสาเข็มที่สารละลายเบนโทไนท์ เนื่องจากแรงเสียดทานในชั้นทรายชั้นที่สองยังพัฒนาไม่ถึงค่าสูงสุด ซึ่งค่าน้ำหนักทดสอบสูงสุดไม่สามารถเกิดกำลังบรรทุกประลัยได้ เป็นผลทำให้ได้ค่า  $\beta$  ที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่า  $\beta$  ที่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ ทยานันท์, 2544

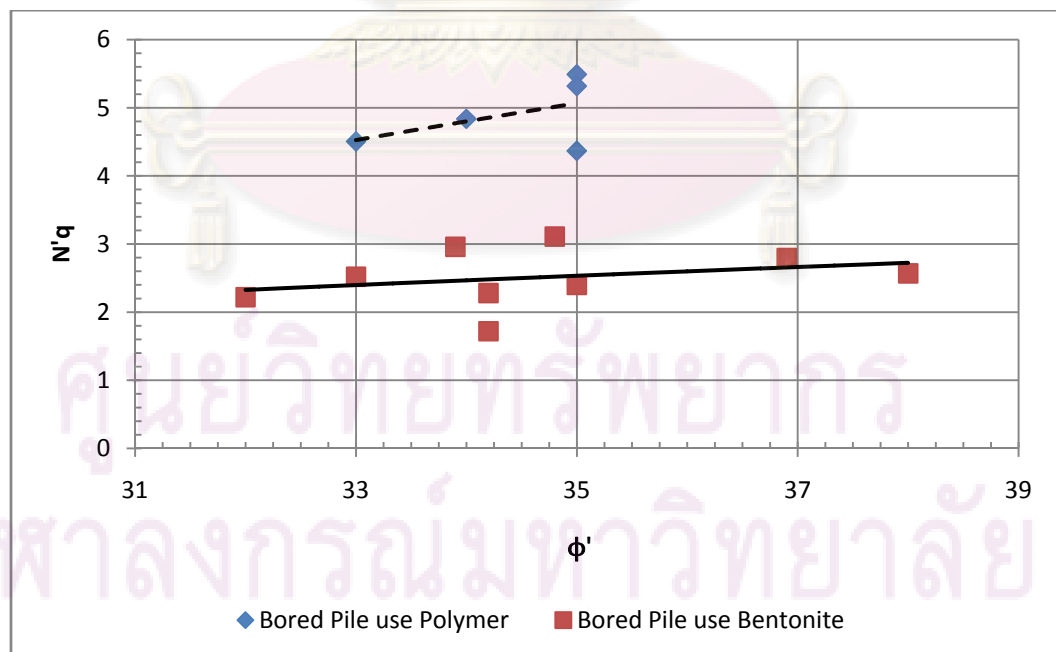
จากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.11 จะแสดงให้เห็นว่าค่า  $\beta$  ของเสาเข็มเจาะที่ใช้โพลีเมอร์มีค่าสูงกว่าเสาเข็มเจาะที่ใช้เบนโทไนท์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่า  $\phi'$  สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

#### 4.5.3 ค่าสัมประสิทธิ์รับแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นทราย ( $N'_q$ )

ค่า  $N'_q$  ที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่า  $N'_q$  ของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าค่า  $N'_q$  ที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 4 – 6 ที่  $\phi'$  ตั้งแต่  $33^\circ - 35^\circ$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ อันเนื่องมาจากการใช้สารละลายโพลิเมอร์มีผลให้วิธีการเก็บตะกอนแตกต่างจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์ เพราะเมื่อดินจะตกตะกอนในสารละลายโพลิเมอร์ ถ้าทิ้งเวลาให้นานพอ แล้วใช้ถังเก็บตะกอนตักขึ้นมาจะไม่ทำให้เกิดปัญหาการสะสมของตะกอนก้นหลุม (Soft Base) และสารละลายโพลิเมอร์ยังยึดโครงสร้างของเม็ดทรายเข้าด้วยกันทำให้อนุภาคมีความหนาแน่นมากขึ้น ส่วนสารละลายเบนโทไนท์นั้นเมื่อดินจะเกิดการแขวนลอยอยู่ในสารละลายโดยที่ขนาดและปริมาณสามารถแขวนลอยอยู่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสารละลายและปริมาณเม็ดดินที่มีอยู่ในสารละลาย และในการไล่ตะกอนจากสารละลายเบนโทไนท์จะใช้วิธีเป่าลม (Air lift) และสูบลอย ซึ่งถ้าเมื่อดินมีน้ำหนักมากหรือมีปริมาณมากจะทำให้เกิดตะกอนที่ก้นหลุม (Soft Base) ดังนั้นค่า  $N'_q$  ที่ได้จากเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลิเมอร์จึงมีค่าสูงกว่าเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N'_q$  กับค่า  $\phi'$  สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มในชั้นทรายชั้นที่สองในชั้นดินกรุงเทพฯ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มซึ่งได้แก่ค่า adhesion factor ( $\alpha$ ) และค่า friction factor ( $\beta = K_s \tan \delta$ ) สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว และชั้นทรายตามลำดับ ค่า Bearing Capacity ( $N'_q$ ) สำหรับการประมาณแรงต้านทานที่ปลายเข็มในชั้นทราย โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. เสาเข็มเจาะที่ไม่มีกรัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มและปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง
2. เสาเข็มเจาะที่ไม่มีกรัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มและปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวชั้นที่สอง

ผลการวิจัยที่ได้สามารถสรุปโดยแยกประเด็นต่างๆ ได้ดังนี้

##### 5.1.1 การแปรผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

การแปรผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์นั้น ได้นำทฤษฎี Fellnius 's Method, 1989 มาใช้ในการหาแรงภายในเสาเข็มที่เกิดขึ้น และ แสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำกับค่าการทรุด (Load – Settlement curve) โดยในการแปรผลการทดสอบเพื่อให้ได้น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้การพิจารณาช่วงที่เกิดน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ( $Q_{ult}$ )

##### 5.1.2 ค่า $\alpha$ ของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์

ค่า  $\alpha$  ที่ได้จากเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับค่า  $\alpha$  ของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ ดังนั้นในการประมาณ ค่ากำลังรับ

แรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวของสารละลายโพลีเมอร์สามารถใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  กับ  $S_u$  ของงานวิจัยเสาะเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ (ชาญชัย, 2542) ได้

### 5.1.3 ค่า $\beta$ ของเสาะเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์

ค่า  $\beta$  ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าค่า  $\beta$  ที่ได้จากเสาะเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ อันเนื่องมาจากการใช้สารละลายโพลีเมอร์ไม่เกิดเยื่อที่บนน้ำ (Filter Cake) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ ทยานันท์, 2544

### 5.1.4 ค่า $N'_c$ ของเสาะเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์

ผลการวิจัยพบว่าค่า  $N'_c$  ที่ได้จากเสาะเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์มีค่าที่สูงกว่าค่า  $N'_c$  ที่ได้จากเสาะเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์โดยค่า  $N'_c$  มีค่าอยู่ในช่วง 4-6 ที่  $\phi'$  ตั้งแต่  $33^\circ$ - $35^\circ$

สำหรับค่า  $N'_c$  ที่ได้จากการวิจัยนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 5.8 – 6.2

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาพฤติกรรมของการใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะในการก่อสร้างเสาะเข็มเจาะนั้นได้ทำการรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบเสาะเข็มที่ได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัด (Geotechnical Instrumentation) ดังนั้นข้อเสนอแนะที่ได้รวบรวมดังต่อไปนี้เพื่อให้เกิดการพัฒนาเพื่อให้ได้ผลที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

- จำนวนข้อมูลที่ติดตั้งเครื่องมือวัดควรมีมากกว่านี้เพื่อให้การสร้างเส้นแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ของกำลังรับน้ำหนักมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งเนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีเพียง 10 ต้นเท่านั้น ถึงอย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์กลับดังที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้สามารถเชื่อถือได้และสามารถที่จะนำไปใช้งานได้ในระดับหนึ่ง

- ควรทำการทดสอบเสาเข็มจนถึงจุดวิบัติ เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของกำลังรับแรงของเสาเข็ม ( $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $N'_u$ ) ที่จุดที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate Load Bearing Capacity) โดยงานวิจัยนี้ข้อมูลที่รวบรวมได้นั้นเสาเข็มไม่ได้ทำการทดสอบจนถึงจุดวิบัติ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้ยังไม่ใช่ค่าสุดท้ายที่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกจะพัฒนาไปถึงได้
- ควรมีการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มทั้งที่ปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นทรานชั้นที่สองและชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สองเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ ( $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $N'_u$ ) สำหรับเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายของเสาเข็ม



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์. พฤติกรรมของเสาชემแบเร็ดและเสาชემเจาะที่ติดตั้งเครื่องมือวัด  
ในชั้นดินกรุงเทพฯ.วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542

ธยานันท์ บุญรักษ์. พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาชემเจาะระบบ  
เปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม  
โยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2544.

สุวรรณ เขียวชาญศิลป์. การส่งถ่ายน้ำหนักสถิตและการคาดคะเนความสามารถในการรับ  
น้ำหนักบรรทุกของเสาชემเจาะ.วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชา  
วิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.

วสท. 2520. ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. วิศวกรรมสถานแห่ง  
ประเทศไทย

จิรนนท์ ปิตุปรกรณ์. การประเมินค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาชემจาก  
การทดสอบ SPT (N). วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.2526

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาษาอังกฤษ

- Fellenius, B.H., 2001. From strain measurement to load in an instrumented piled.  
Geotechnical News Magazine, 19, 1.35-38.
- Teparaksa and Boonyasak, 2001. Performance And Behavior of Polymer Slurry  
in Wet Process Bored Pile in Bangkok Subsoils. The Fourteenth KKNN  
Symposium on Civil Engineering, November 5-7, 2001. Kyoto, Japan.  
pp439- 444.
- Teparaksa, 1999. Analysis of Lateral Wall Movement for Deep Braced  
Excavation of Bangkok Subsoils. Civil and Environmental Engineering  
Conference, New Frontiers and Challenges, November 8-12, 1999.  
Bangkok, Thailand. pp 67-76.
- Thasnanipan, N. et al, 1998. Design Construction and behavior of bored cast in-  
situ concrete piles in Bangkok subsoil. Proc. 4th Intl. Conf. on Case  
Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, USA, paper  
no.1.20.
- Teparaksa W.,1997. Newly developed toe grouted bored pile in soft Bangkok  
clay. Performance and behavior. Int. Conf. On Design and Construction  
of Deep Foundation, Orlando, USA
- Teparaksa, W., Thasananipan N, and Anwar M.A., 1999. Base grouted of wet  
process bored pile in Bangkok subsoils. 11th Asian Regional Conference  
on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Seoul, Korea.
- Teparaksa W., 2000. Estimating Ultimate Capacity of Deep Bored Pile in  
Bangkok Subsoils in Line with Global Research Trend. Annual  
Conference of the Engineering Institute of Thailand, pp. 41-56.
- Wachiraprakarnpong, A., 1993. Performance of Grouted and Non Grouted  
Bored Piles in Bangkok Subsoils. Master Thesis, AIT.



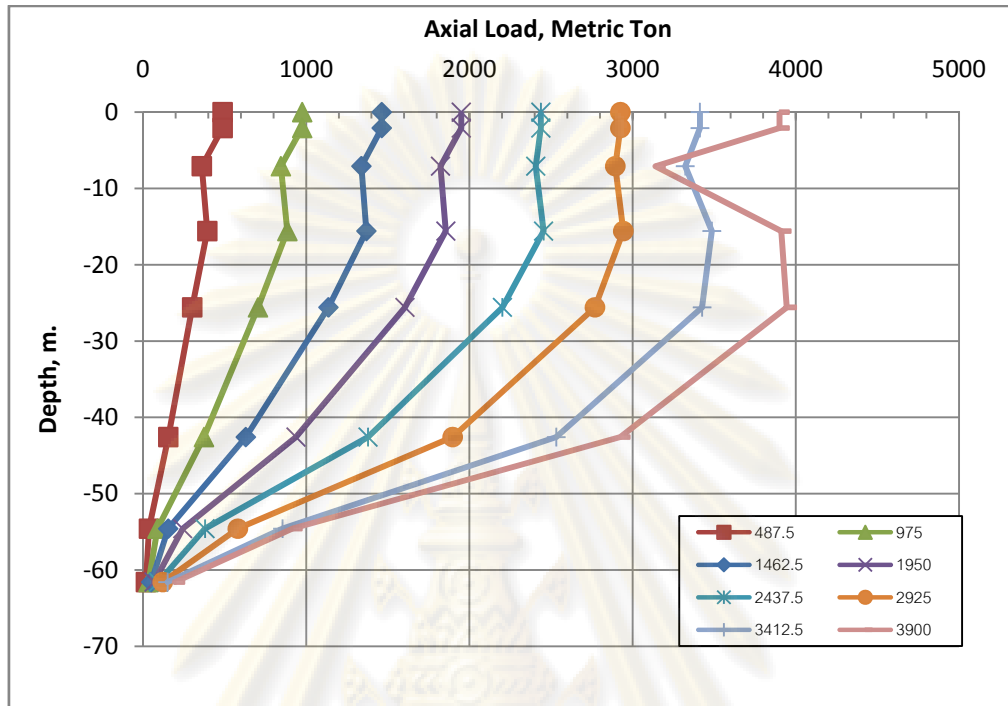
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

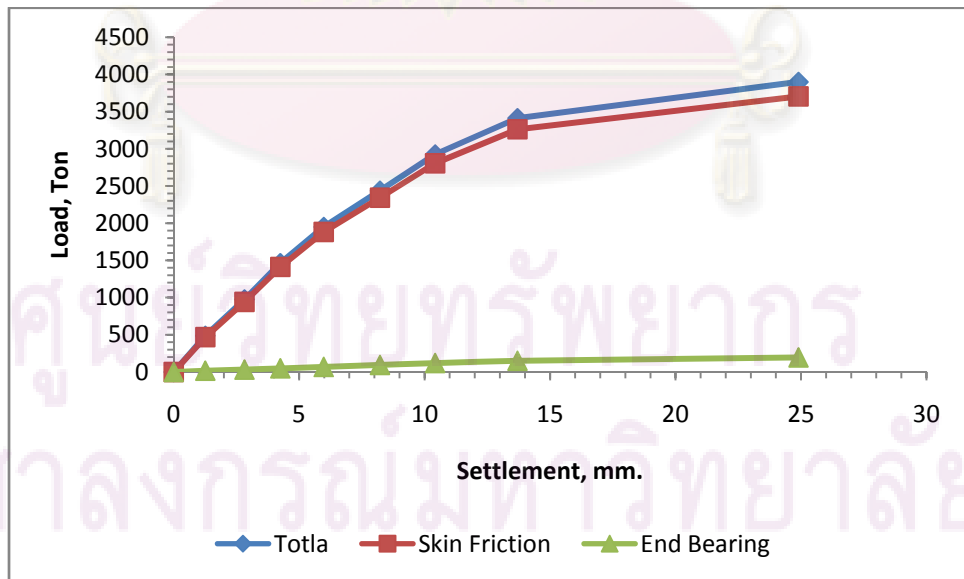
โครงการ Amata Condominium

Pile Diameter: 2000 mm., Length: 56.80 m.

เสาเข็มทดสอบเบอร์ 16



การกระจายแรงในชั้นดินโดยใช้ทฤษฎี Fellenius 's Method, 1989

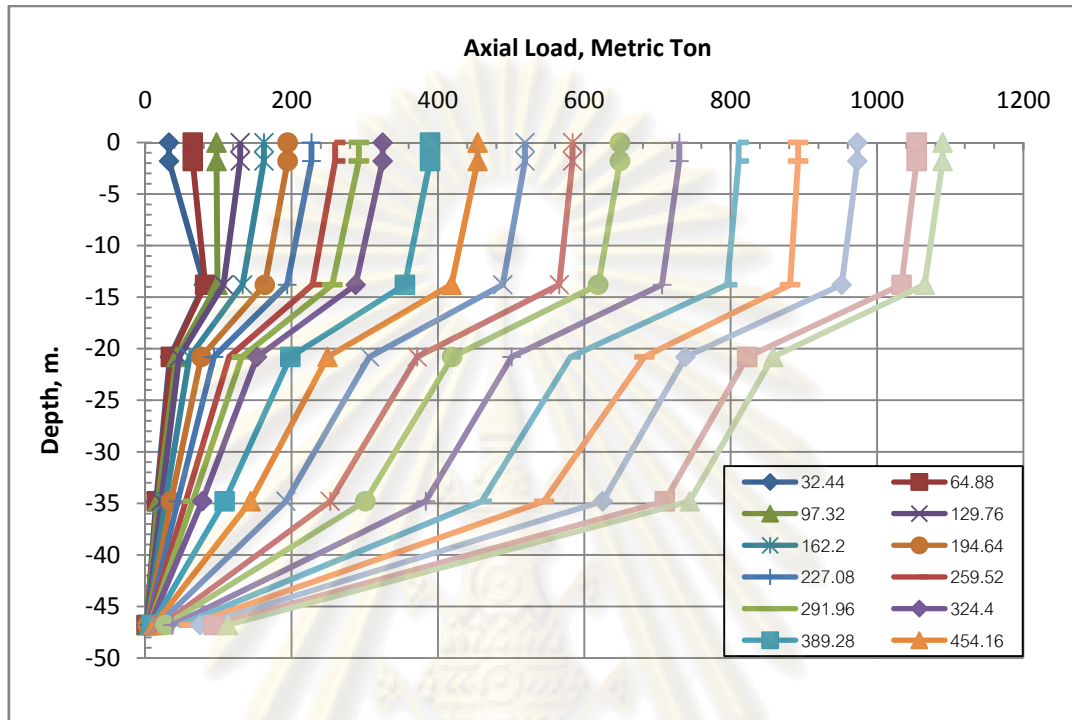


ความสัมพันธ์พจน์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัว

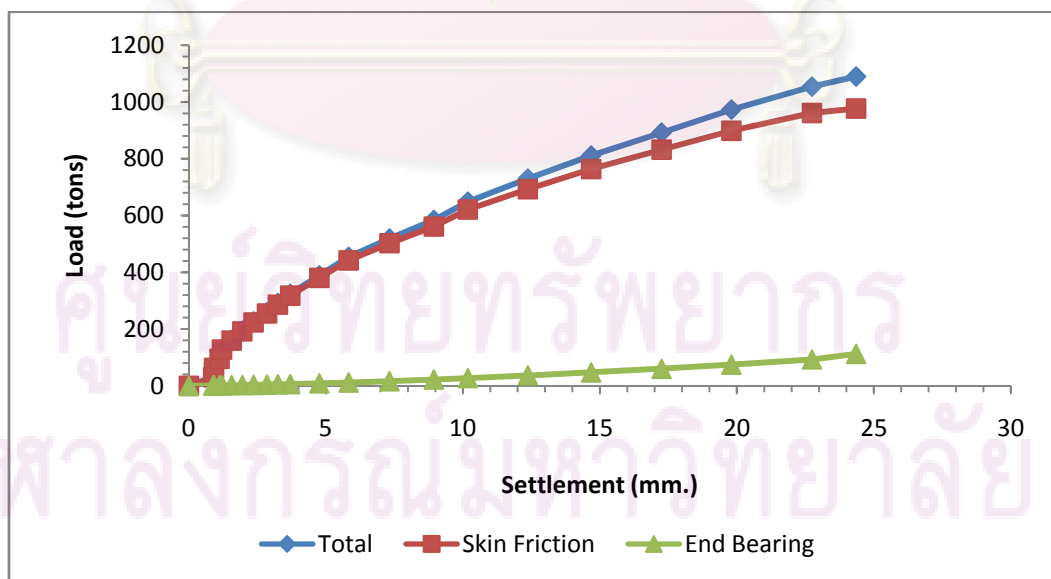
โครงการ Embassy of Japan

Pile Diameter: 800 mm., Length: 47.64 m.

เสาเข็มทดสอบเบอร์ CB 25



การกระจายแรงในชั้นดินโดยใช้ทฤษฎี Fellenius 's Method, 1989

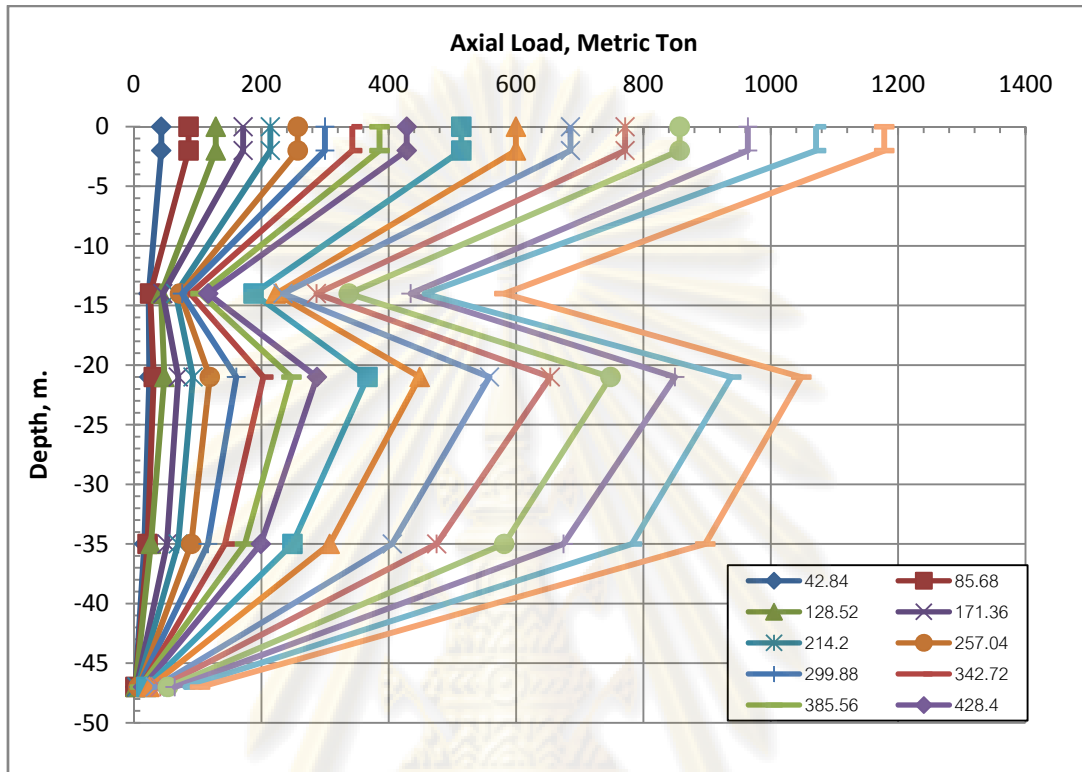


ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัว

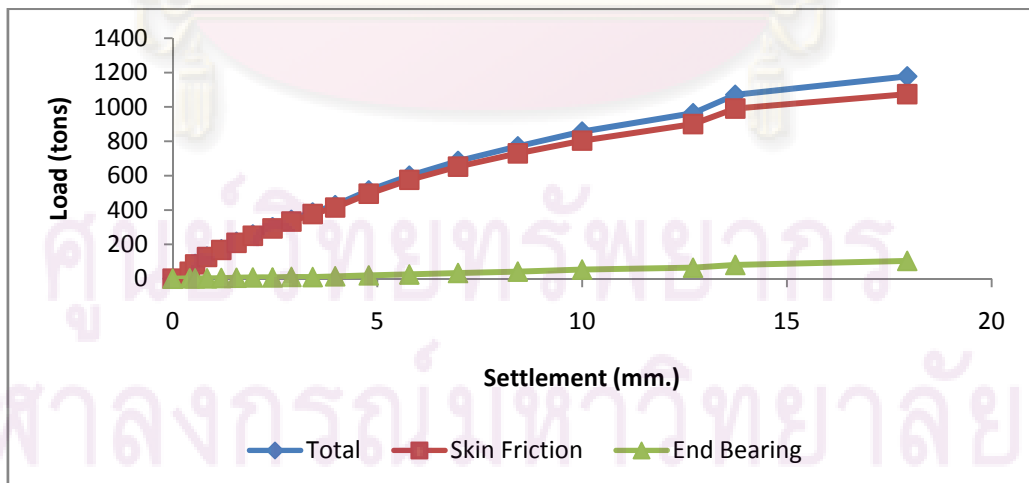
โครงการ Embassy of Japan

Pile Diameter: 1000 mm., Length: 47.44 m.

เสาเข็มทดสอบเบอร์ OB 53



การกระจายแรงในชั้นดินโดยใช้ทฤษฎี Fellenius 's Method, 1989

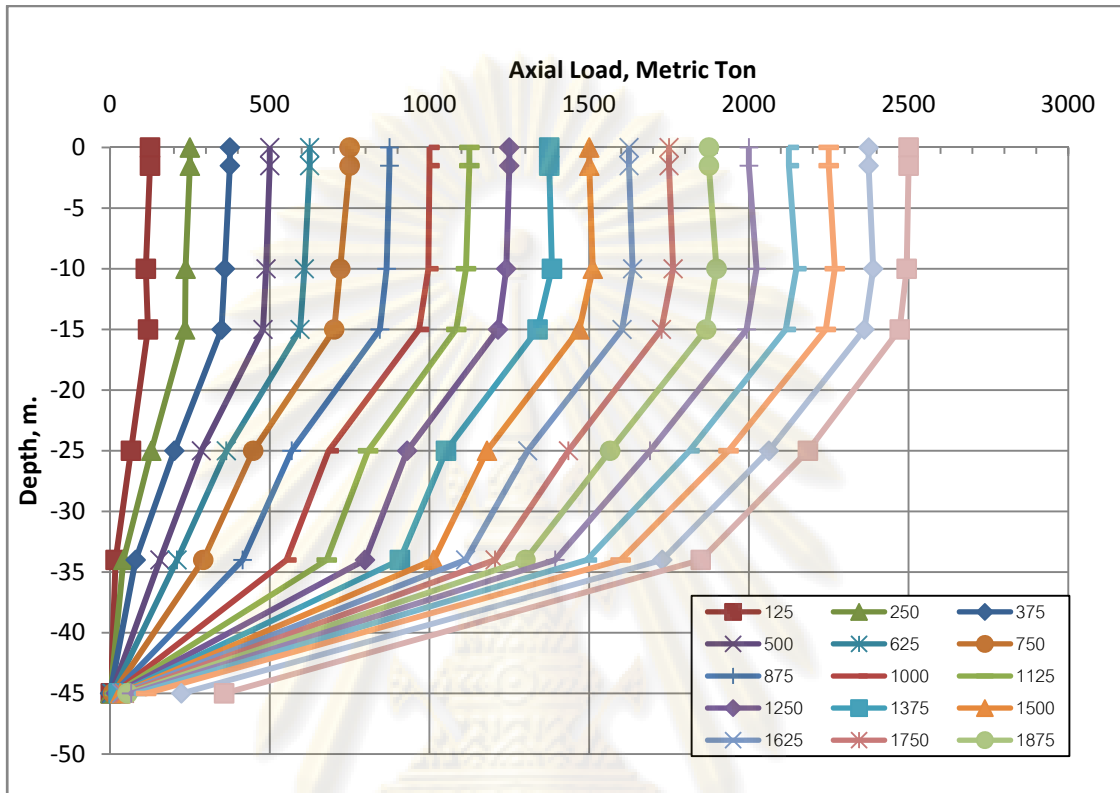


ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัว

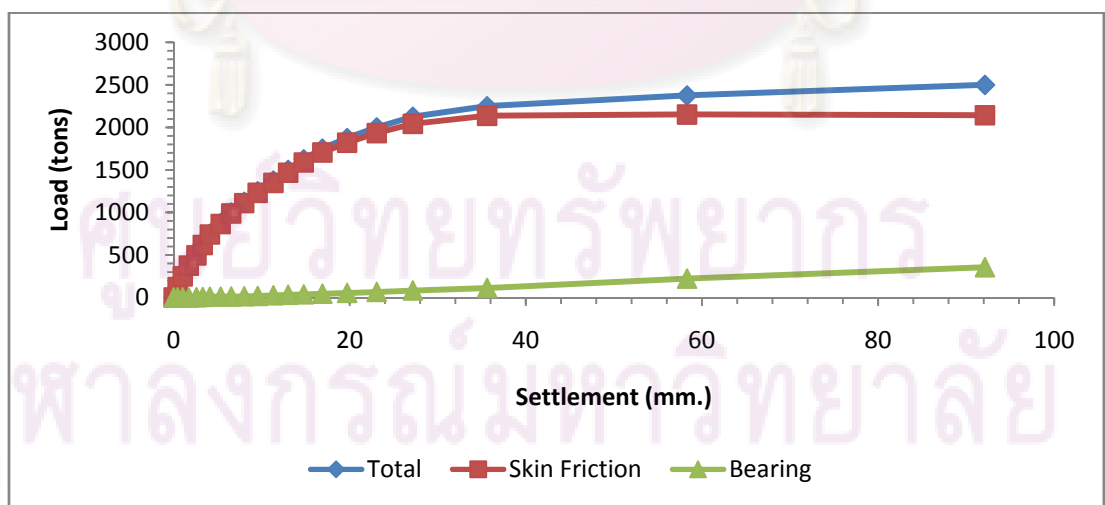
โครงการ Energy Complex Group

Pile Diameter: 1200 mm., Length: 46.00 m.

เสาเข็มทดสอบเบอร์ 5



การกระจายแรงในชั้นดินโดยใช้ทฤษฎี Fellenius 's Method, 1989

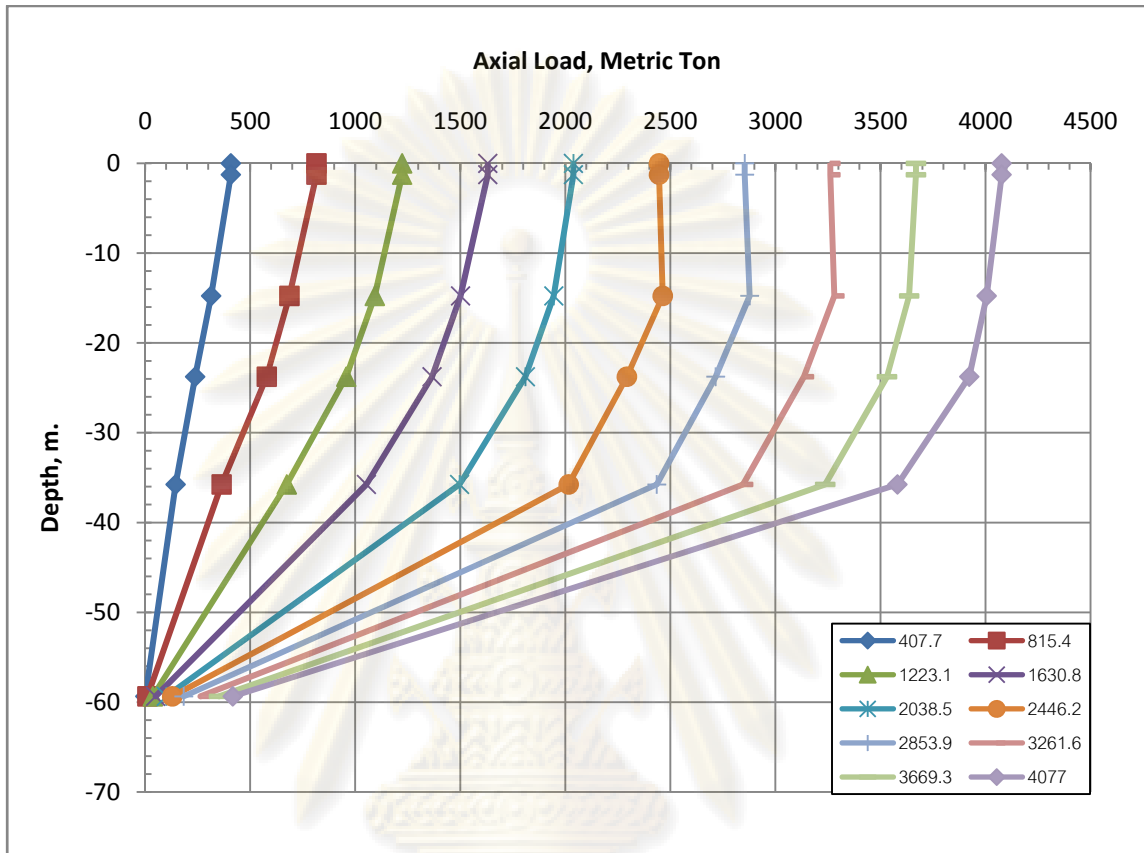


ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัว

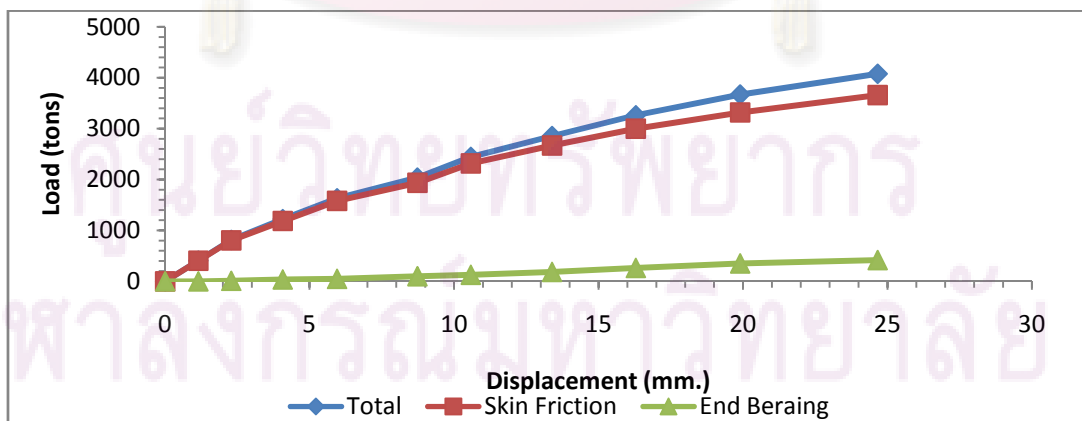
โครงการ Highway Route No.302

Pile Diameter: 2000 mm., Length: 58.50 m.

เสาเข็มทดสอบเบอร์ 1



การกระจายแรงในชั้นดินโดยใช้ทฤษฎี Fellenius 's Method, 1989

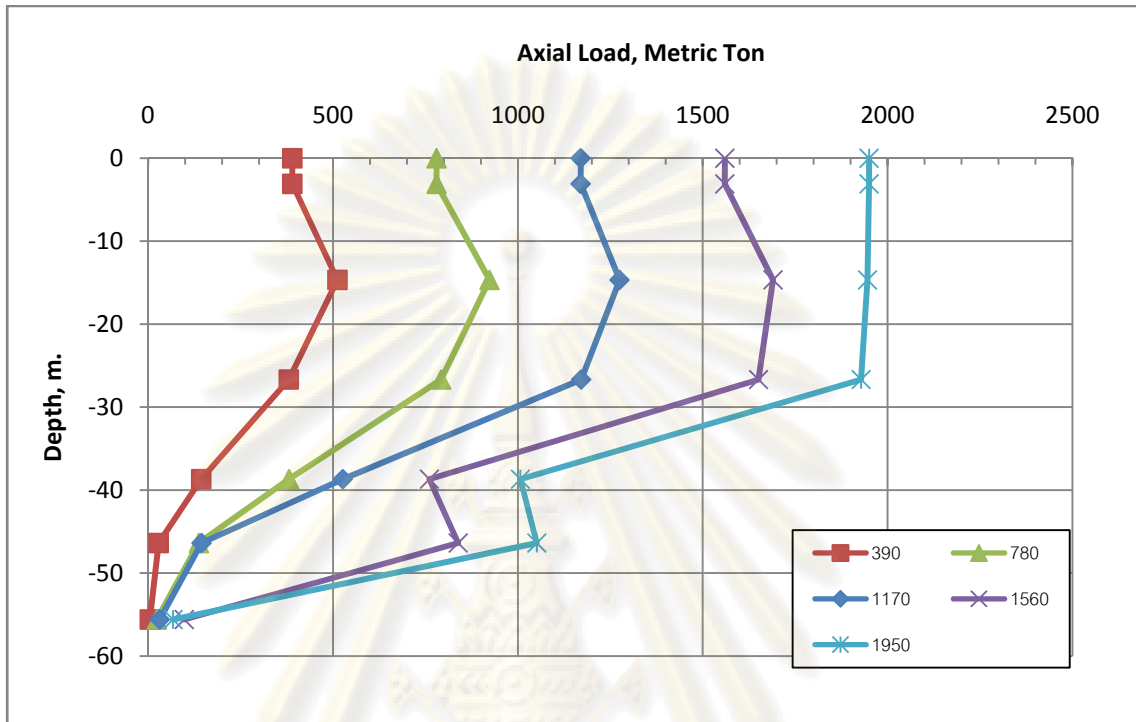


ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัว

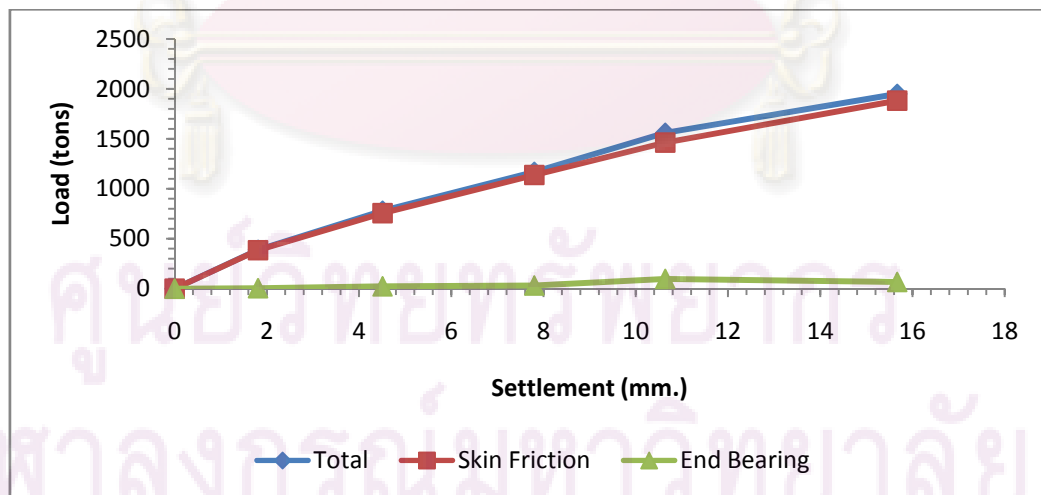
โครงการ Industrial Ring Road (Contact 3)

Pile Diameter: 1500 mm., Length: 53.57 m.

เสาเข็มทดสอบเบอร์ TP-3.1



การกระจายแรงในชั้นดินโดยใช้ทฤษฎี Fellenius 's Method, 1989



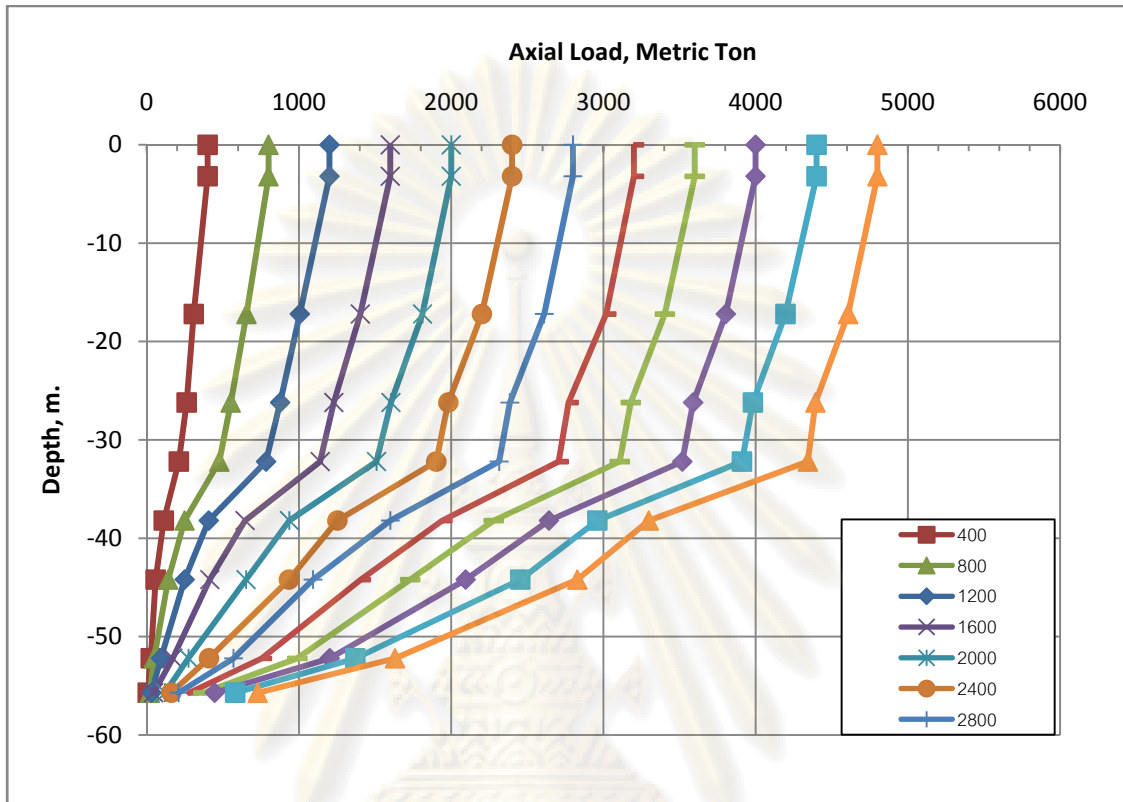
ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัว



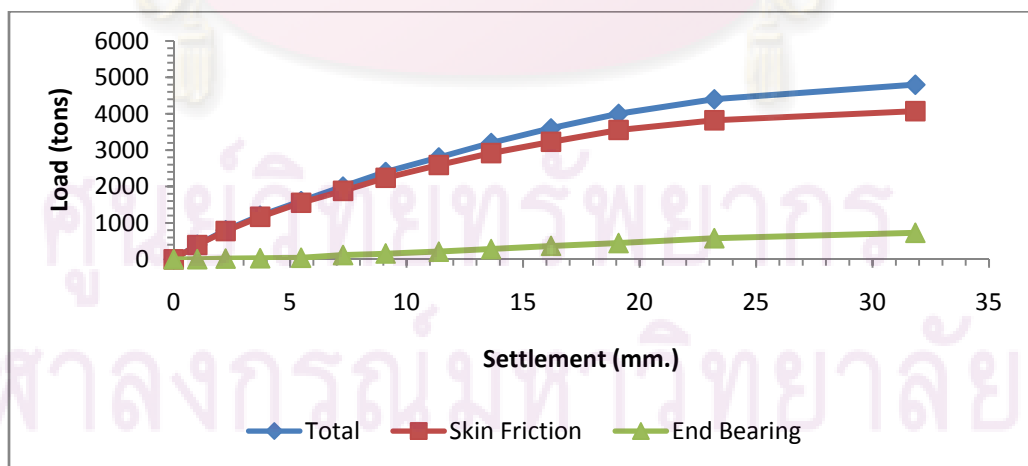
โครงการ Southern Outer Bangkok Ring Road (Contact 2)

Pile Diameter: 2000 mm., Length: 56.00 m.

เสาเข็มทดสอบเบอร์ BH9



การกระจายแรงในชั้นดินโดยใช้ทฤษฎี Fellenius 's Method, 1989

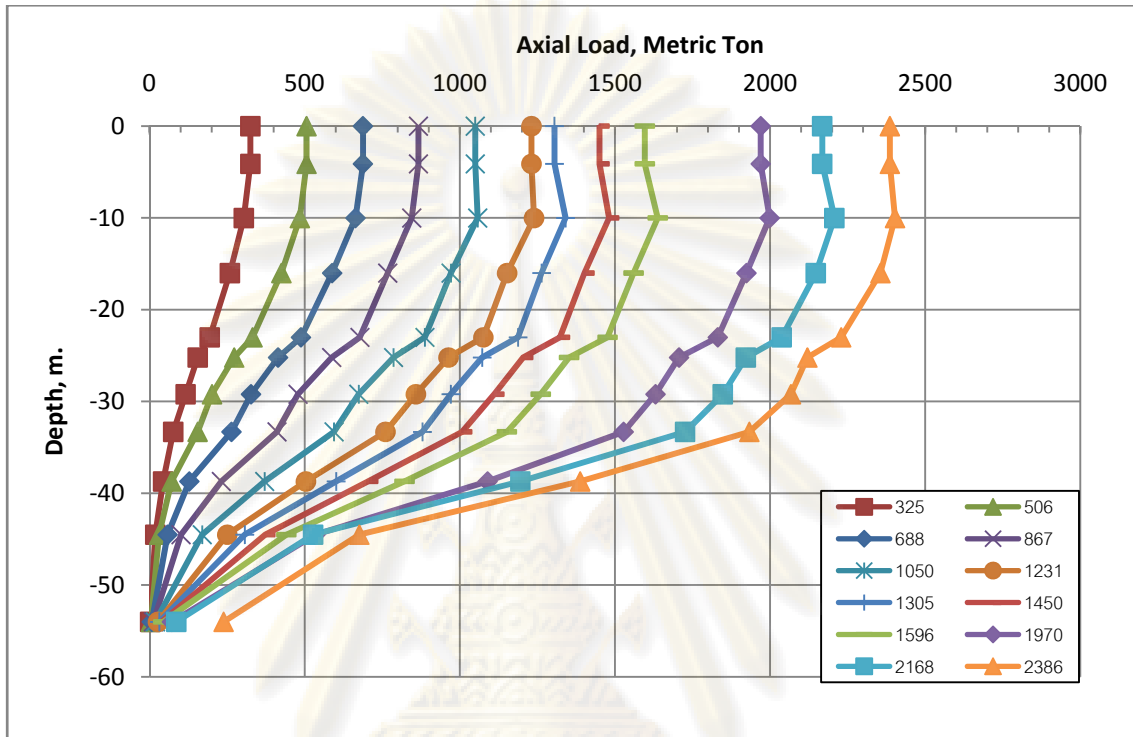


ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัว

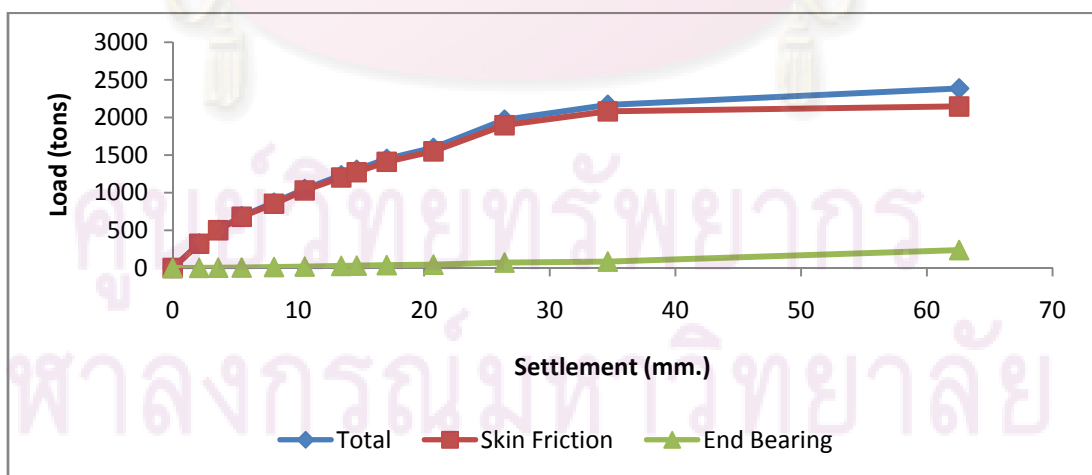
โครงการ The Construction of Airfield Pavements and Build of South Airside Tunnel For Suvarnabhumi Airport

Pile Diameter: 1200 mm., Length: 53.20 m.

เสาเข็มทดสอบเบอร์ SPP-1



การกระจายแรงในชั้นดินโดยใช้ทฤษฎี Fellenius 's Method, 1989

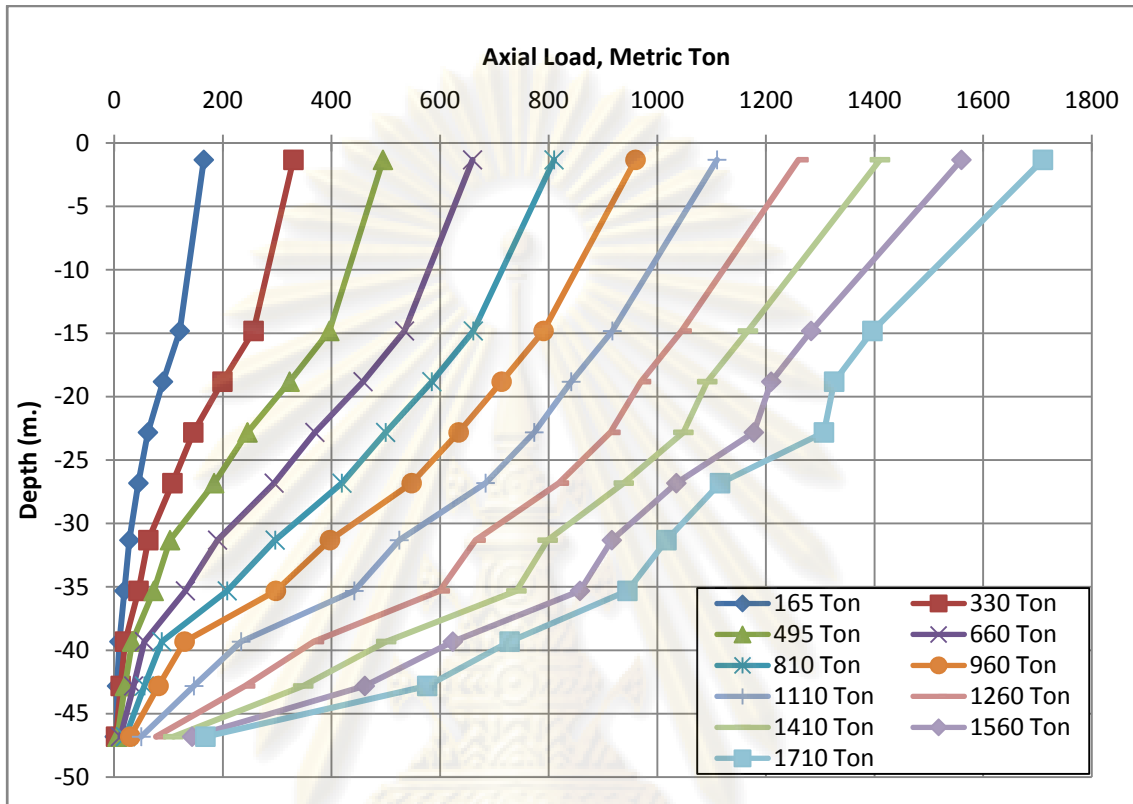


ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัว

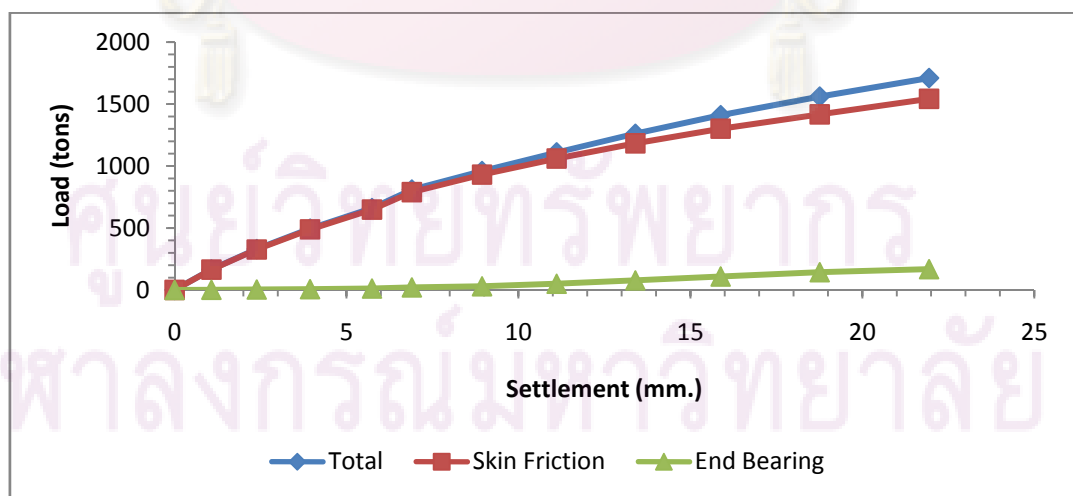
โครงการ THE MET (125 South Sathorn)

Pile Diameter: 1000 mm., Length: 48.50 m.

เสาเข็มทดสอบเบอร์ 1



การกระจายแรงในชั้นดินโดยใช้ทฤษฎี Fellenius 's Method, 1989

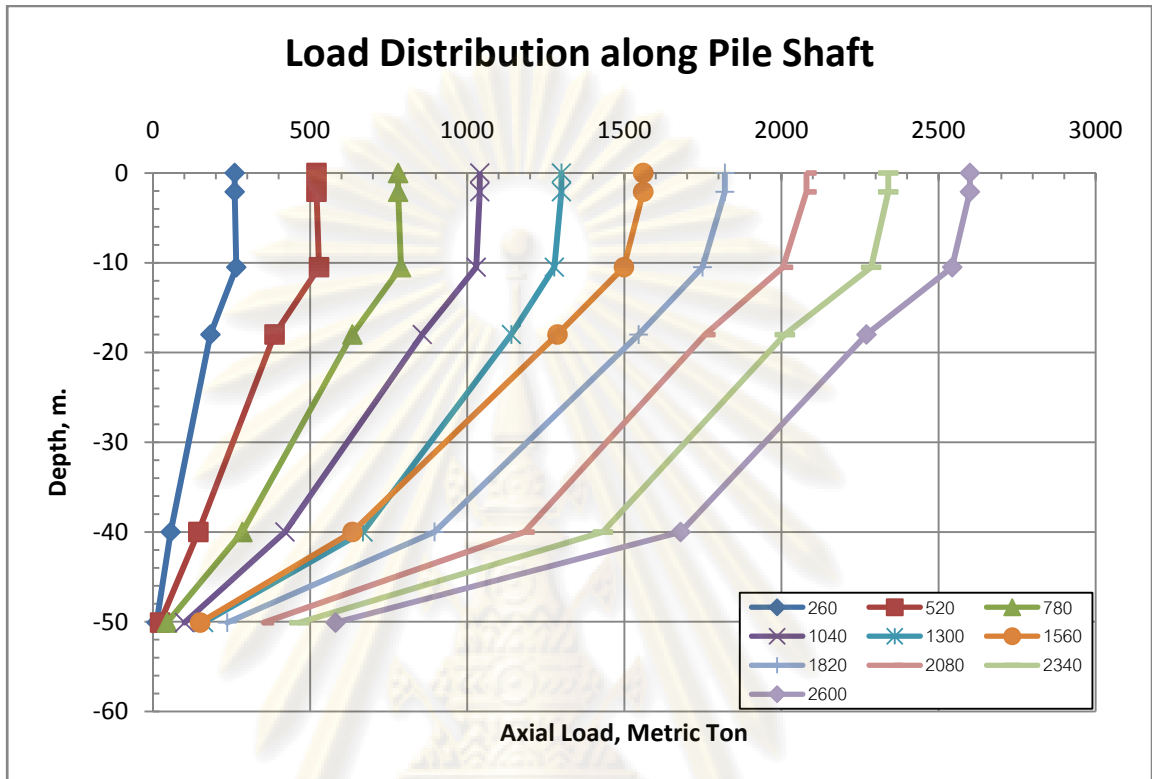


ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัว

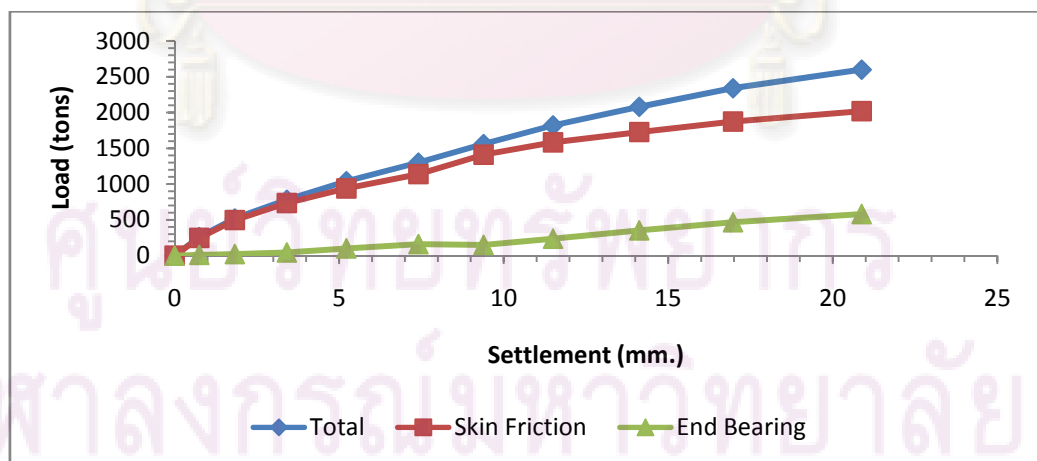
โครงการ Wat Nakorn-In and Connecting Roads Construction (Contract NS-1)

Pile Diameter: 1500 mm., Length: 49.45 m.

เสาเข็มทดสอบเบอร์ Sta. 17+600



การกระจายแรงในชั้นดินโดยใช้ทฤษฎี Fellenius 's Method, 1989



ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัว

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวุฒิชัยชื่นหิรัญ เกิดเมื่อวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช เมื่อปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ.2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย