

ผลกระทบของวิธีการก่อสร้างเสาเข็มตอกแรงเหวี่ยงที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม



นายปรีชา ทองนวล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

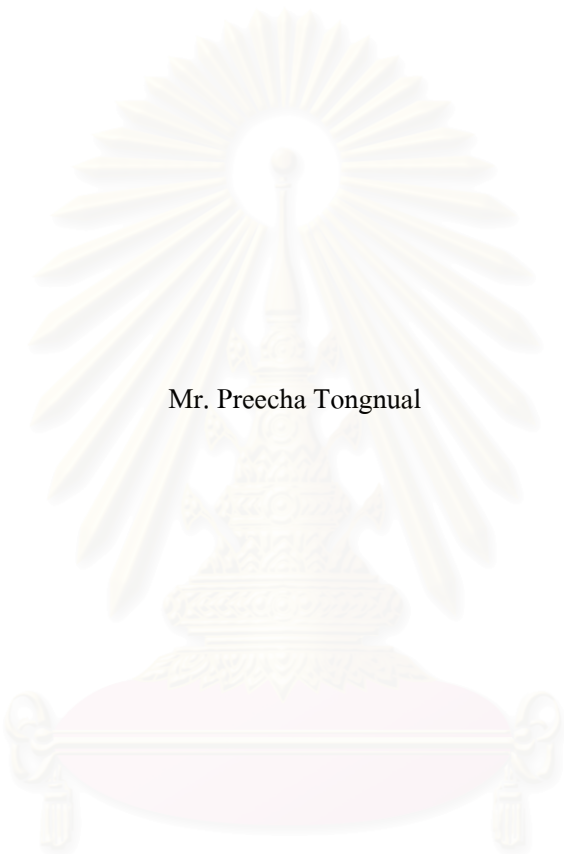
คณะวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN : 974-17-4521-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF CONSTRUCTION METHOD OF DRIVEN SPUN PILE ON PILE CAPACITY



Mr. Preecha Tongnual

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN : 974-17- -4521-14

ปรีชา ทองนวล: ผลกระทบของวิธีการก่อสร้างเสาเข็มตอกแรงเหวี่ยงที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม.
(EFFECT OF CONSTRUCTION METHOD OF DRIVEN SPUN PILE ON PILE CAPACITY)
อ.ที่ปรึกษา: รศ. ดร.วันชัย เทพักษ์, 153 หน้า, ISBN 974-17-4521-4

ปัจจุบันได้มีการนำเสาเข็มแรงเหวี่ยง (Spun pile) มาใช้ในการก่อสร้างมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อสร้างในพื้นที่ชุมชนแออัด ซึ่งมีข้อจำกัดมากมายทั้งในด้านเสียง แรงสั่นสะเทือนและการเคลื่อนตัวของมวลดิน เสาเข็มกลมแรงเหวี่ยง (Spun pile) สามารถทำการก่อสร้างได้หลายวิธี ทั้งตอกเสาเข็มทั้งต้นจนถึงชั้นทราย (Full rive in sand) ส่วนเจาะนำในดินเหนียวพร้อมตอกเสาเข็มสุดท้ายในชั้นทราย (Auger press in clay with final drive in sand) ส่วนเจาะนำในดินเหนียวพร้อมกดเสาเข็มสุดท้ายลงในชั้นทรายพร้อมอัดนํ้าปูนปลายเสาเข็ม (Auger in clay with press into sand with base grouting) และเจาะถึงชั้นทรายพร้อมอัดนํ้าปูนปลายเสาเข็ม (Full auger in sand with base grout) แต่ละวิธีมีข้อดี – ข้อเสียที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากการก่อสร้างเสาเข็มกลมแรงเหวี่ยง (Spun pile) ในแต่ละวิธี และความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสม

งานวิจัยนี้ได้รวบรวมผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแรงเหวี่ยงจาก 2 โครงการที่ก่อสร้างด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่า การเจาะดินออก (Auger) ของเสาเข็มจนถึงชั้นทรายจะก่อให้เกิดปัญหาการไหลขึ้นของทราย (Boiling) ทำให้เกิดทรายหลวม (Loosening) ที่ปลายเสาเข็ม ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกค่ามาก เมื่อทำการอัดนํ้าปูนที่ปลายเสาเข็มจะต้องใช้นํ้าปูน (Cement grouting) เป็นจำนวนมาก การแก้ปัญหการไหลของทราย และการเกิดทรายหลวมที่ปลายเสาเข็มสามารถป้องกันได้โดยการเจาะดินออก (Auger) จนถึงชั้นดินเหนียวต่อกับชั้นทราย จากนั้นทำการกด (Press) ให้ปลายเสาเข็มจมในชั้นทราย การก่อสร้างเสาเข็มแรงเหวี่ยงโดยวิธีการใช้ส่วนเจาะนำในดินเหนียวพร้อมตอกเสาเข็มสุดท้ายในชั้นทรายให้ผลการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มใกล้เคียงกับการตอกเสาเข็มทั้งต้น การวิจัยนี้ยังได้นำเสนอค่าพารามิเตอร์ Adhesion Factor (α - value) ในชั้นดินเหนียว , Friction factor (β -value) ในชั้นดินทราย และ Bearing Capacity Factor (N_q - value) ในชั้นทรายเพื่อประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มที่ก่อสร้างด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา...2546....

4470404921: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: SPUN PILE / AUGER PRESSED PILE

PREECHA TONGNUAL : EFFECT OF CONSTRUCTION METHOD OF
DRIVEN SPUN PILE ON PILE CAPACITY. THESIS ADVISOR: ASSOC.
PROF.WANCHAI TEPARAKSA, D.Eng. 153 pp. ISBN 974-17-4521-4

Recently, spun pile has been extensively used for construction, especially in the large cities which having the limitation of noise, vibration and soil movements. The spun pile can be constructed by various methods such as Full drive into sand layer, Auger press in clay with final drive in sand, Auger in clay with press into sand with base grouting and Full auger in sand with base grouting. Each methods has different advantages and disadvantages. This research aims to compare the effect of construction method of spun pile to their capacities.

The data of static pile load tests was collected from two projects where the spun pile was constructed with different methods. The results showed that the auger into sand layer technique caused boiling and loosening at pile toe and led to induce a very low pile capacity. The pile capacity can be recovered after toe grouting with a large volume of grouting cement. This boiling and loosening at pile toe can be minimized by augering up to the clay layer just above the sand layer and press the pile until tip penetrated into sand layer. The spun pile construction by means of auger in clay with final drive in sand showed the performance of pile capacity similar to the spun pile constructed by means of full drive into sand layer. This research also proposed the parameters for estimate the pile capacity with different construction technique in terms of Adhesion factor (α -value) for clay, Friction factor (β -value) for sand and Bearing capacity factor (N_q -value) for sand .

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

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

Academic year..... 2003

กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิทยานิพนธ์เรื่อง “ผลกระทบของวิธีการก่อสร้างเสาเข็มตอกแรงเหวี่ยงที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม” ผู้เขียนขอแสดงความขอบพระคุณ

รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพารักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ และอาจารย์ ดร.จิรวัด บุญญะฐิติ ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่าง ๆ ให้แก่ผู้เขียนเป็นอย่างดี

คุณอดีศักดิ์ เกริกกิตติกุล จากบริษัท ซีโน-ไทย เอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน) และ คุณเอกพันธ์ ปัญญาวิสุทธิชัย จากบริษัท คริสเตียนี แอนด์ นิลเสน (ไทย) จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการค้นหาข้อมูล การดูงานในสถานที่จริง และคำแนะนำที่มีประโยชน์อย่างมากในการทำวิทยานิพนธ์

บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เสมอ

เพื่อน ๆ และพี่ ๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้ลุล่วงไปด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง	ต
สัญลักษณ์	ถ

บทที่

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพ ฯ	4
2.1.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพ ฯ	4
2.1.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน.....	6
2.2 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว	12
2.2.1 วิธีสถิตศาสตร์ (Static method).....	12
2.2.2 การคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ของเสาเข็มโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบรับน้ำหนัก บรรทุกของเสาเข็ม (Pile Load Test Data)	14
2.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ	18
2.3.1 Adhesion Factor (α)	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 Friction Factor (β)	25
2.3.3 Bearing Capacity Factor (N_q).....	26
2.3.4 Bearing Capacity Factor (N_c).....	28
2.4 ชนิดของเสาเข็มและเทคนิคการก่อสร้างที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
2.4.1 Driven Pile (เสาเข็มตอก).....	29
2.4.2 Auger Pressed Pile.....	33
2.4.2.1 Full Auger with press into sand layer	34
2.4.2.2 Auger Press with Final Drive.....	34
2.4.2.3 Full Auger with Pile Toe Grout	34
2.5 การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Static Pile Load Test).....	36
2.5.1 วิธีการทดสอบเสาเข็ม.....	36
2.5.2 การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบเสาเข็ม.....	38
2.5.3 การแปลผลการทดสอบเสาเข็มเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม.....	39
2.6 ผลกระทบต่อสภาพชั้นดินเนื่องจากการติดตั้งเสาเข็ม.....	44
2.6.1 ผลกระทบของการติดตั้งเสาเข็มในชั้นดินเหนียว	44
2.6.2 ผลกระทบของการติดตั้งเสาเข็มในชั้นทราย.....	46
2.7 พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม	47
2.7.1 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ลงเพื่อถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มลงบนชั้นดินฐานราก	47
2.7.2 การแปลค่า End – Bearing Load จากการทดสอบเสาเข็ม.....	50
2.7.3 กลไกการถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มไปสู่ดิน (Pile Load Transfer)	51
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	55
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย	55
3.1.1 ข้อมูลเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัย.....	55
3.1.1.1 เสาเข็มตอก.....	60
3.1.1.2 Auger Press Pile.....	60
3.1.2 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน	65
3.2 วิธีการวิเคราะห์และข้อจำกัดในการวิเคราะห์.....	65
3.2.1 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย.....	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม	66
3.2.2.1 ชั้นดินเหนียว.....	66
3.2.2.2 ชั้นทราย	66
3.2.3 การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม	67
บทที่ 4 ผลการทดสอบ, การวิเคราะห์ผลและ อภิปรายผลการวิจัย	68
4.1 ผลการศึกษาสมบัติของดินบริเวณสถานที่ก่อสร้างที่ใช้ในงานวิจัย	68
4.2 การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม.....	68
4.2.1 เสาเข็มตอก (Driven Pile).....	69
4.2.2 เสาเข็ม Auger Press Pile	70
4.3 พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม Auger Press Spun Pile.....	78
4.3.1 การรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม Auger Press Pile ที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก.....	78
4.3.2 การรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม Auger Press Pile ที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง	82
4.4 การเปรียบเทียบและอภิปรายผลของการรับน้ำหนักของเสาเข็ม Spun pile ที่มีการก่อสร้างด้วยวิธีที่แตกต่างกัน	86
4.5 การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้าง	88
4.5.1 Friction Factor β ($K_s \tan \delta$)	89
4.5.1.1 เสาเข็มตอก.....	90
4.5.1.2 เสาเข็ม Auger Press Pile	91
4.5.2 Adhesion Factor (α).....	93
4.5.2.1 เสาเข็มที่ทำการก่อสร้างโดยระบบตอก.....	93
4.5.2.2 เสาเข็มที่ทำการก่อสร้างโดยระบบ Auger with press.....	94
4.6 การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม	95
4.6.1 เสาเข็ม Spun pile ที่มีการตอกเสาเข็มในการก่อสร้าง	96
4.6.2 เสาเข็ม Spun pile ที่ทำการก่อสร้างโดยการ Auger และไม่มีการตอกเสาเข็มเพิ่ม.....	97

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 การเปรียบเทียบและอภิปรายค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มในแต่ละประเภท	97
4.7.1 ค่า Friction Factor β ($K_s \tan \delta$).....	98
4.7.2 ค่า Adhesion Factor (α)	99
4.7.3 Bearing Capacity Factor (N_q).....	101
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	103
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	103
5.1.1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม	103
5.1.2 พารามิเตอร์สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม	104
5.1.3 พารามิเตอร์สำหรับการประมาณค่าแรงดันที่ปลายเสาเข็ม.....	104
5.2 ข้อเสนอแนะ	104
รายการอ้างอิง	105
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจดิน	109
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบเสาเข็ม.....	117
ภาคผนวก ค. การคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย.....	136
ภาคผนวก ง. ผลการคำนวณหาค่า Friction Factor (β), Adhesion Factor (α) และ Bearing Capacity Factor (N_q).....	145
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	153

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,1999).....	5
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u (DM 7.1)	7
รูปที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลของแมนสรวง , มนัสพลและนัฐพล (2540) กับ ความสัมพันธ์ของวีรนนท์ (2526)	8
รูปที่ 2.4 ลักษณะน้ำใต้ดินในเขตกรุงเทพมหานคร	9
รูปที่ 2.5ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $N(SPT)$ กับค่า ϕ' (Perk , Hanson & Thorburn , 1974)	11
รูปที่ 2.5ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_N กับ σ'_{vo} (Perk , Hanson & Thorburn , 1974)	11
รูปที่ 2.6 รูปแบบวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติจากการทดสอบเสาเข็ม (Fellenius,1980)	17
รูปที่ 2.7ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในดินเหนียวแข็ง ดินชั้นบนเป็นเป็นทรายและกรวด , กรณีที่ 1 (Tomlinson,1970).....	19
รูปที่ 2.7ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในดินเหนียวแข็ง เสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งโดยตรง , กรณีที่ 3 (Tomlinson,1970)	19
รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ในแต่ละกรณี , (a) Case 1:piles driven through overlying sands or sandy gravels. (b) Case 2: piles through overlying weak clay. (c) Case 3: piles without different overlying strata. (Tomlinson,1970)	20
รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u สำหรับเสาเข็มตอกในดินเหนียว (Flaate,1968)	21
รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ที่มาจาก Vane Shear Test สำหรับดิน กรุงเทพฯ (Holmberg, 1970).....	22
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มตอกสำหรับดินในกรุงเทพฯ (Pitupakorn, 1982).....	22

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u สำหรับดินในกรุงเทพฯ (Pimpasugdi, 1989)	23
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u สำหรับเสาเข็มเจาะแต่ละประเภทในดิน กรุงเทพฯ (Teparaksa,2001)	24
รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับค่ามุมเสียดทานภายใน ϕ' (Vesic, 1967 และ Meyerhof, 1976)	26
รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bearing Capacity Factor, N_q กับค่ามุมเสียดทานภายใน ϕ' (Berezantzev, 1961 และ Meyerhof, 1976).....	27
รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bearing Capacity Factor, N_q กับ ค่ามุมเสียดทานภายใน ϕ' (Pimpasugdi, 1989).....	28
รูปที่ 2.17 Bearing Capacity Factor สำหรับฐานรากในชั้น Clay (Skempton, 1951).....	29
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะลูกตุ้มตอกเสาเข็มแบบ Drop Hammer.....	30
รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะของลูกตุ้มตอกแบบ Diesel hammer	31
รูปที่ 2.20 ก แสดงลักษณะของลูกตุ้มตอกแบบ Hydraulic Hammer	32
รูปที่ 2.20 ข แสดงลักษณะระบบการทำงานของลูกตุ้มตอกแบบ Hydraulic Hammer	32
รูปที่ 2.21 แสดงเสาเข็ม Auger Press spun Pile และการนำดอกสว่านใส่ไว้ในส่วนกลาง ของเสาเข็มเพื่อใช้ในการเจาะดิน	33
รูปที่ 2.22 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มด้วยวิธี Fully auger with pile toe grout	35
รูปที่ 2.23 แสดงขั้นตอนการทำ Stage grout ที่ปลายเสาเข็ม	35
รูปที่ 2.24ก การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบ Static Load Test ระบบที่ 1.....	39
รูปที่ 2.24ข การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบ Static Load Test ระบบที่ 2.....	39
รูปที่ 2.25 รูปแบบการพิบัติของเสาเข็มตามลักษณะความแข็งแรงของชั้นดิน (Winterkorn & Fang , 1975).....	42
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักรรทุกและการทรุดตัวในรูปแบบสถานะต่าง ๆ (Tomlinson , 1994).....	43
รูปที่ 2.27 ผลการตรวจวัดแรงดันน้ำส่วนเกิน, u_e ในดินรอบ ๆ เสาเข็มตอกเดี่ยวในชั้นดินเหนียว (Poulos & Davis, 1980).....	45
รูปที่ 2.28 แสดงพฤติกรรมกรรับน้ำหนักของเสาเข็ม	47

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็ม โดยแยกกำลังต้านทานที่ข้างเข็มและกำลังต้านทานที่ปลายเข็ม	48
รูปที่ 2.30 แสดงรูปแบบจำลองการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มบนดินหลายชั้น (วารากร, 2539).....	49
รูปที่ 2.31 แสดงการเพิ่มของกำลังต้านทานของเสาเข็มตอกใน Soft clay และ Stiff clay ตามเวลา	50
รูปที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำกับ ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (Load-Settlement Curve).....	51
รูปที่ 2.33 Distribution Function Approach สำหรับเข็มเดี่ยว	53
รูปที่ 3.1 ก แสดงพื้นที่โครงการอาคารฝักข้าวโพด.....	56
รูปที่ 3.1 ข แสดงลักษณะตำแหน่งที่ตั้งของโครงการก่อสร้างอาคารฝักข้าวโพด	56
รูปที่ 3.2 ก แสดงพื้นที่โครงการก่อสร้างสถานีสูบน้ำประปา ของการประปานครหลวง.....	57
รูปที่ 3.2 ข แสดงลักษณะตำแหน่งเสาเข็มของโครงการก่อสร้างสถานีสูบน้ำของการประปา	57
รูปที่ 3.3 รูปถ่ายขณะตอกเสาเข็ม Spun Pile (โครงการโรงกรองน้ำ)	60
รูปที่ 3.4 ก รูปถ่ายขณะ Auger ในชั้นดินเหนียว	61
รูปที่ 3.4 ข รูปถ่ายขณะ Auger ผ่านชั้นทรายชั้นแรก	61
รูปที่ 3.4 ค รูปถ่ายขณะทำการกดหัวเสาเข็ม (Press).....	62
รูปที่ 4.1 ก Load Settlement Curve for Driven pile DP1,DP2 and DP3.....	69
รูปที่ 4.1 ข Load Settlement Curve for Driven pile DP4,DP5 and DP6.....	70
รูปที่ 4.2 Load Settlement Curve for Auger press in clay with final drive with tip in Stiff Clay.....	72
รูปที่ 4.3 Load Settlement Curve for Auger press in clay with final drive into sand with tip in 1 st Sand.....	72
รูปที่ 4.4 Load Settlement Curve for Full auger into sand layer with toe grout and redrive with tip in 1 st Sand.....	73
รูปที่ 4.5 Load Settlement Curve for Full auger in clay with press into sand with tip in 2 nd Sand.....	73

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.6 Load Settlement Curve for Full auger in clay with press into sand with single stage of grout with tip in 2 nd Sand	74
รูปที่ 4.7 Load Settlement Curve for Full auger in sand with two stage of grout with tip in 2 nd Sand	74
รูปที่ 4.8 Load Settlement Curve for tested Auger press pile Case 2 and Case 3	79
รูปที่ 4.9 Load Settlement Curve for tested pile DP6 in Case 1 and AP2 in Case 3	80
รูปที่ 4.10 Load Settlement Curve for tested pile DP3 in Case 1 and AP3 in Case 4	82
รูปที่ 4.11 Load Settlement Curve for tested pile AP 4/1 in Case 5.....	83
รูปที่ 4.12 Load Settlement Curve for tested pile AP 4/1 in Case 5 and AP 4/2 in Case 6.....	84
รูปที่ 4.13 Load Settlement Curve for tested pile AP 4/2 in Case 6 and AP 5 in Case 7.....	85
รูปที่ 4.14 ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion factor (α) กับ S_u สำหรับเสาเข็มตอก.....	89
รูปที่ 4.14 ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion factor (α) กับ S_u สำหรับเสาเข็มที่ทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลาย	90
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับค่ามูม ϕ' ของเสาเข็มตอก (คิด Drawdown Stress)	91
รูปที่ 4.16 แสดงค่า β เทียบกับค่ามูม ϕ' ของเสาเข็ม Auger press ที่มีระบบตอกในการก่อสร้าง (คิด Drawdown Stress)	92
รูปที่ 4.17 แสดงค่า β เทียบกับค่ามูม ϕ' ของเสาเข็ม Auger press ที่ไม่มีการตอกเสาเข็มในการก่อสร้าง (คิด Drawdown Stress)	93
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion factor (α) กับ S_u สำหรับเสาเข็มที่มีการตอกอยู่ในเทคนิคของการก่อสร้าง.....	94
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion factor (α) กับ S_u สำหรับเสาเข็มที่มีการ Auger with press in clay	95
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับ ค่ามูม ϕ' ของเสา Spun pile ที่มีการตอกเสาเข็มในการก่อสร้างด้วย (คิด Drawdown Stress)	96

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_u กับ ค่ามุม ϕ' ของเสา Spun pile ที่มีการก่อสร้างโดยการ Auger press แบบต่าง ๆ และไม่มีการตอกเสาเข็มเพิ่ม (คิด Drawdown Stress).....	97
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับค่ามุม ϕ' ของเสาเข็ม Spun pile ที่มีการตอก เสาเข็มอยู่ในเทคนิคการก่อสร้าง (คิด Drawdown Stress).....	98
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับค่ามุม ϕ' ของเสาเข็ม Spun pile Spun pile ที่มีการก่อสร้างโดยการ Auger press และไม่มีการตอกเสาเข็มเพิ่ม (คิด Drawdown Stress).....	99
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในงานวิจัย.....	100
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในงานวิจัยเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้าสำหรับเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ ฯ.....	100
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในงานวิจัยเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้าสำหรับเสาเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ ฯ.....	101
รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_u กับค่ามุม ϕ' ของเสาเข็ม Spun pile ที่มีการตอก เสาเข็มอยู่ในเทคนิคของการก่อสร้าง (คิด Drawdown Stress).....	102
รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_u กับ ค่ามุม ϕ' ของเสา Spun pile ที่มีการก่อสร้าง โดยการ Auger press และไม่มีการตอกเสาเข็มเพิ่ม (คิด Drawdown Stress).....	102
รูปที่ ข1 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 1.....	118
รูปที่ ข2 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 2.....	118
รูปที่ ข3 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 3.....	119
รูปที่ ข4 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 4.....	119
รูปที่ ข5 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 5.....	120
รูปที่ ข6 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 6.....	120
รูปที่ ข7 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 1.....	121
รูปที่ ข8 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 2.....	121
รูปที่ ข9 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 3.....	122
รูปที่ ข10 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 4/1.....	122
รูปที่ ข11 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 4/2.....	123

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ ข12 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 5	123
รูปที่ ข13 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 1	124
รูปที่ ข14 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 2	125
รูปที่ ข15 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 3	126
รูปที่ ข16 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 4	127
รูปที่ ข17 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 5	128
รูปที่ ข18 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 6	129
รูปที่ ข19 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม AP 1	130
รูปที่ ข20 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม AP 2	131
รูปที่ ข21 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม AP 3	132
รูปที่ ข22 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม AP4/ 1, AP 4/2 และ AP 5	133
รูปที่ ข23 แสดงแผนผังตำแหน่งเสาเข็มและตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจดินในโครงการก่อสร้าง โรงกรองน้ำของการประปา	134
รูปที่ ข24 แสดงแผนผังตำแหน่งเสาเข็มและตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจดินในโครงการก่อสร้าง อาคารฝึกข้าวโพด	135
รูปที่ ค1 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกระลี่ยของเสาเข็ม DP 1 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	137
รูปที่ ค2 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกระลี่ยของเสาเข็ม DP 2 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	137
รูปที่ ค3 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกระลี่ยของเสาเข็ม DP 3 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	138
รูปที่ ค4 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกระลี่ยของเสาเข็ม DP 4 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	138
รูปที่ ค5 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกระลี่ยของเสาเข็ม DP 5 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	139
รูปที่ ค6 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกระลี่ยของเสาเข็ม DP 6 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	139
รูปที่ ค7 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกระลี่ยของเสาเข็ม AP 1 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	140

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ ค8 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม AP 2 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	140
รูปที่ ค9 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม AP 3 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	141
รูปที่ ค10 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม AP 4/1 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	141
รูปที่ ค11 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม AP 4/2 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	142
รูปที่ ค12 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม AP 5 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)	142

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติชั้นพื้นฐานโดยทั่วไปของดินกรุงเทพฯ (Chin, 1972 และ Tonyagate,1978)	6
ตารางที่ 2.2 แสดงค่า K_s และ δ สำหรับเสาเข็มคอกที่เสนอโดย Brom & Aas (1966).....	25
ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลเสาเข็มทดสอบที่รวบรวมได้	58
ตารางที่ 3.2 แสดงลักษณะและคุณสมบัติของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง.....	59
ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของเสาเข็มคอกที่รวบรวมได้.....	63
ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของเสาเข็ม Auger press ที่รวบรวมได้.....	64
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ Static Pile Load Test ของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัย.....	75
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบ Dynamic Load Test ของเสาเข็ม Fully auger press into sand with toe grout ในโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปานครหลวง	81
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าปริมาณน้ำปูนในการทำ Base grout ของเสาเข็ม AP 4/2 และ AP 5	84
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม Spun Pile ที่รวบรวมจากโครงการก่อสร้างโรงกรอง น้ำ ของการประปานครหลวง.....	87
ตารางที่ ก1 หลุมเจาะดิน BH-1T (ใช้คำนวณเสาเข็ม DP 1)	110
ตารางที่ ก2 หลุมเจาะดิน BH-2T (ใช้คำนวณเสาเข็ม DP 2 , DP 5)	111
ตารางที่ ก3 หลุมเจาะดิน BH-4A (ใช้คำนวณเสาเข็ม AP 1 , AP 2 , AP 3).....	112
ตารางที่ ก4 หลุมเจาะดิน BH-5A (ใช้คำนวณเสาเข็ม DP 3)	113
ตารางที่ ก5 หลุมเจาะที่ BH-6A (ใช้คำนวณเสาเข็ม DP 4)	114
ตารางที่ ก6 หลุมเจาะดิน BH-8A (ใช้คำนวณเสาเข็ม DP 6)	115
ตารางที่ ก7 หลุมเจาะดิน BH-2S(ใช้คำนวณเสาเข็ม AP 4/1 , AP 4/2 , AP 5)	116
ตารางที่ ค1 แสดงผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและค่าของแรงเสียด ทานด้านข้างของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัย.....	143
ตารางที่ ง1 แสดงการคำนวณหาค่า Friction factor, β (คัดผลของ Drawdown)	146
ตารางที่ ง2 แสดงการคำนวณหาค่า Adhesion factor (α) for stiff clay.....	148
ตารางที่ ง3 แสดงการคำนวณหาค่า Adhesion factor (α) for medium clay	150
ตารางที่ ง4 แสดงการคำนวณหาค่า Bearing capacity factor , N_q (คัดผลของ Drawdown)	152

สัญลักษณ์

α	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเหนียว (Adhesion Factor)
β	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของทราย (Friction Factor)
δ	=	มุมเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็ม
ϕ'	=	มุมต้านทานภายในของดิน (Angle of Internal Resistance)
γ_t	=	หน่วยน้ำหนักรวมของดิน (Total Unit Weight)
σ_v	=	หน่วยแรงรวมในแนวตั้ง
σ_h	=	หน่วยแรงรวมในแนวนอน
σ'_{vo}	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง
σ'_{vi}	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณา
w_n	=	ปริมาณความชื้นในมวลดิน
A_b	=	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม
$(AE)_p$	=	ค่าสติฟเนสสมมูลย์ของเสาเข็ม
c	=	Cohesion of Soil
CH	=	High Plastic Clay
CL	=	Low Plastic Clay
C_N	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง
D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม
dW_z	=	Elastic Compression ของเสาเข็ม
E	=	Modulus of Elasticity ของเสาเข็ม
f_s	=	หน่วยแรงเสียดทานด้านข้าง (Unit Skin Friction)
G_s	=	ความถ่วงจำเพาะของดิน
K_s	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างระหว่างดินกับเสาเข็ม
L	=	ความยาวเสาเข็ม
L_c	=	เส้นรอบรูปเสาเข็ม
LI	=	ดัชนีความเหลว
LL	=	พิกัดความเหลว
N	=	ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value)
N'	=	ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) หลังการปรับแก้
N_c	=	สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของปลายเสาเข็มในชั้นดินเหนียว
N_q	=	สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของปลายเสาเข็มในชั้นทราย

สัญลักษณ์ (ต่อ)

P_i	=	แรงตามแนวแกนเสาเข็ม
PI	=	ดัชนีความเหนียวหนืด
PL	=	พิกัดความเหนียวหนืด
q_b	=	หน่วยแรงกำลังรับแรงเบกทานที่ปลายเข็ม (Unit End Bearing)
Q_b	=	แรงต้านทานของดินบริเวณปลายเสาเข็ม
Q_s	=	แรงต้านทานของดินรอบๆ ลำตัวเสาเข็ม
Q_T	=	แรงกระทำที่หัวเข็ม
Q_{ult}	=	กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของฐานราก
S_u	=	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว
S_z	=	น้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเข็มไปสู่ดินรอบลำตัวเข็มที่ความลึก z
u	=	แรงดันน้ำใต้ดิน
W_o	=	การทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม
W_p	=	น้ำหนักเสาเข็ม
W_z	=	การเคลื่อนตัวของผนังเสาเข็มที่ความลึก z

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

กรุงเทพฯ ในปัจจุบันมีการเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการก่อสร้างอาคารหรือสิ่งก่อสร้างที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่จำกัดและที่ดินมีราคาแพงขึ้น น้ำหนักของตัวอาคารที่ถ่ายลงสู่ฐานรากจึงมีค่ามาก ดังนั้นฐานรากของอาคารจะต้องเป็นฐานรากที่วางอยู่บนเสาเข็ม ซึ่งในการออกแบบเสาเข็มจะต้องออกแบบให้เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักจากฐานราก โครงสร้างได้โดยปลอดภัย และขณะเดียวกัน การทรุดตัวของฐานราก จะต้องอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ด้วย

เสาเข็มที่ใช้ มักเป็นเสาเข็มที่ทำสำเร็จรูปมาก่อน เช่น เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เสาเข็มเหล็ก โดยการนำมาตอกลงสู่บริเวณที่จะทำเป็นฐานรากของตัวอาคาร ปัญหาที่พบบ่อยเสมอ ๆ ในการใช้เสาเข็มตอก คือ แรงสั่นสะเทือนจากการตอกเข็ม มักรบกวน และทำความเสียหายให้กับโครงสร้างใกล้เคียงได้ หนึ่งในวิธีการแก้ปัญหา คือ โดยการใช้เสาเข็มแรงเหวี่ยงหรือ spun pile ในการก่อสร้างด้วยวิธีการก่อสร้างที่ลดแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเข็ม เช่น การก่อสร้างแบบ Fully auger press หรือ Fully auger press with pile toe grout และอาจมีแรงกระทบกระเทือนบ้างจากการตอกสุดท้ายด้วยวิธี Auger press with final drive ซึ่งหลักการออกแบบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนี้เป็นเช่นเดียวกับวิธีการออกแบบการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก เพียงแต่อาจใช้พารามิเตอร์การออกแบบเช่นค่า α และ β ที่มีค่าแตกต่างออกไป

การศึกษาผลกระทบของวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม spun pile ที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบ และเลือกใช้วิธีการก่อสร้างได้เหมาะสม หรือสามารถปรับปรุง และสร้างมาตรฐานในการก่อสร้างเสาเข็ม spun pile ที่ก่อสร้างด้วยวิธีการต่าง ๆ โดยศึกษาจากพฤติกรรมของการส่งถ่ายน้ำหนัก (load transfer) จากตัวเสาเข็ม spun pile ที่มีการก่อสร้างในวิธีการที่แตกต่าง โดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง คือ bearing capacity factor (N_c, N_q) , adhesion factor (α) สำหรับดินเหนียว และ friction factor (β) ในดินทราย อันจะนำไปสู่การคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาผลกระทบจากการก่อสร้างที่แตกต่างกันที่มีผลต่อเสาเข็มตอกแรงเหวี่ยง (spun pile)
2. เพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้ของเสาเข็ม โดยวิธีการก่อสร้างที่แตกต่างกัน สำหรับชั้นดินในกรุงเทพฯ ฯ
3. วิเคราะห์และคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มตอกแรงเหวี่ยง (spun pile) ที่ก่อสร้างโดยวิธีการที่แตกต่างกัน

1.3 ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จะศึกษาผลกระทบของวิธีการก่อสร้างเสาเข็มที่มีต่อกำลังรับน้ำหนัก โดยทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบเสาเข็มในแต่ละวิธีการก่อสร้าง เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยขอบเขตของงานวิจัยพอจะแบ่งได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. ศึกษาผลการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม จากการทดสอบ Static Pile Load Test และวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติโดยวิธีของ Mazurkiewicz (1972)
2. ทำการวิเคราะห์หาแรงเสียดทานรอบ ๆ ผิว และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มจาก Load-settlement curve
3. ประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method)

งานวิจัยนี้จะแสดงเฉพาะพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวสำหรับเสาเข็มตอก และเสาเข็ม auger แบบต่าง ๆ ที่ทำการก่อสร้างอยู่ในสภาพชั้นดินกรุงเทพฯ ฯ เท่านั้น

1.4 ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย

- 1 ศึกษาเฉพาะเสาเข็มตอกแรงเหวี่ยง (spun pile) เท่านั้น
- 2 ข้อมูลการตอกและการทดสอบเสาเข็มตอกแรงเหวี่ยง (spun pile) ที่ใช้ในงานวิจัย นำมาจาก 2 โครงการในพื้นที่ดินกรุงเทพฯ ๑ เท่านั้น คือ โครงการก่อสร้างสถานีสูบน้ำประจำน้ำประปา ของการประปานครหลวง ที่บางเขน และ โครงการก่อสร้างแพลตฟอร์มข้าวโพด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบถึงผลกระทบของเสาเข็มตอกแรงเหวี่ยงที่มีการก่อสร้างด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน
2. สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเสาเข็มตอกแรงเหวี่ยงที่มีการก่อสร้างในแบบต่าง ๆ ได้
3. สามารถนำผลกระทบที่เกิดจากการก่อสร้างที่แตกต่างกันของเสาเข็มตอกแรงเหวี่ยงไปใช้ในการออกแบบหรือการตัดสินใจในครั้งต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพฯ

ชั้นดินกรุงเทพฯเป็นดินตกตะกอน (Transported Soil) ชนิด Marine และ Alluvial เป็นส่วนหนึ่งของชั้นดินราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ตัวเมืองกรุงเทพฯ ตั้งอยู่บนสองฝั่งของแม่น้ำเจ้าพระยาโดยอยู่ห่างจากทะเลฝั่งอ่าวไทยประมาณ 20 กิโลเมตร ความยาวเฉลี่ยจากเหนือถึงใต้และจากตะวันออกถึงตะวันตกประมาณ 250 และ 200 กิโลเมตร ตามลำดับ พื้นที่รวมประมาณ 53,400 ตารางกิโลเมตร (ว.ศ.ท.,2520)

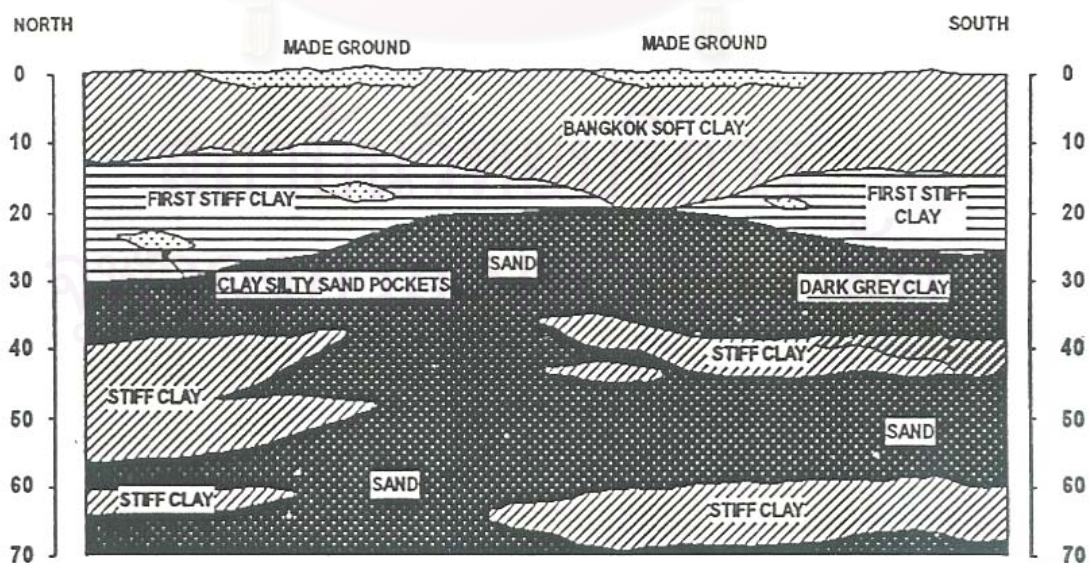
ชั้นดินกรุงเทพฯ ดินชั้นบนจะเป็น Soft Clay หนา 12 ถึง 15 เมตร ซึ่งรับน้ำหนักสิ่งปลูกสร้างโดยทั่วไปในปัจจุบันไม่ได้ ส่วนในชั้นถัดไปจะเป็นลักษณะของชั้นทรายสลับกันชั้น Stiff Clay ในบางช่วง

2.1.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ

ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ ได้เคยมีการศึกษาทางคุณสมบัติทางวิศวกรรมในอดีตที่ผ่านมามากมาย ซึ่งสามารถสรุปลักษณะชั้นดินแต่ละชั้นจากผิวดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ก. ดินชั้นบน (Top Soil or Weathered Bangkok Clay) มีลักษณะเป็นดินเหนียวสีน้ำตาล มีความหนาประมาณ 1-4 เมตร มักอยู่ในสภาพที่มีความแข็งปานกลางเนื่องจากดินชั้นนี้ถูกแปรสภาพมาก ในบริเวณส่วนใหญ่ของกรุงเทพฯ ใกล้ปากอ่าวจะไม่ค่อยพบดินชั้นนี้
- ข. ชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงแข็งปานกลาง (Very Soft to Medium Stiff Marine Clay) เป็นดินเหนียวที่มีสีเทาเข้มหรือเทาปนเขียว หนาประมาณ 13-16 เมตร เป็นดินที่มีความไวตัว (Sensitivity) สูงมาก ค่าปริมาณความชื้นในมวลดินสูงเกือบเท่าปริมาณความชื้นที่ขีดเหลว (Liquid Limit) และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ประมาณ 1-2 ตันต่อตารางเมตร

- ค. ชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (Stiff to Very Stiff Clay) เป็นดินเหนียวแข็งชั้นแรกสีเทาและน้ำตาลที่มีความหนาประมาณ 5-10 เมตร ความหนาจะน้อยในบริเวณทางเหนือและตะวันตกของส่วนกลางกรุงเทพฯ ค่าปริมาณความชื้นประมาณ 20-30% และ S_u ค่าประมาณ 5-15 ตันต่อตารางเมตร
- ง. ชั้นทรายชั้นแรก (First Silty Sand Layer) จะพบที่ความลึกประมาณ 21-28 เมตร โดยมีความหนาไม่แน่นอน บางพื้นที่ เช่น บริเวณสุขุมวิทต้นๆ และบริเวณถนนพระราม3 จะไม่พบชั้นทรายชั้นแรก ในขณะที่ทั่วไปจะพบว่าชั้นทรายนี้น่าประมาณ 3-15 เมตร ทรายชั้นนี้เป็นทรายเม็ดละเอียด ในบางพื้นที่อาจพบดินเหนียวหรือ Silt ปนอยู่บ้าง
- จ. ชั้นดินเหนียวแข็งมากถึงดินเหนียวแข็งดินดาน (Very Stiff to Hard Clay) จะอยู่ถัดจากชั้นทรายชั้นแรกซึ่งในบางบริเวณของพื้นที่กรุงเทพฯ จะไม่พบดินชั้นนี้ ลักษณะดินมีแนวโน้มที่จะเป็นดินเหนียวที่มีสภาพอัดแน่นเกินตัวน้อยหรือสภาพอัดแน่นปกติ (Slightly Overconsolidated or Normally Consolidated Clay) มีค่า S_u มากกว่า 15 ตันต่อตารางเมตร
- ฉ. ชั้นทรายชั้นที่สอง (Second Sand Layer) โดยทั่วไปจะพบที่ความลึกประมาณ 45-55 เมตร เป็นดินทรายที่มีสภาพแน่นมาก



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,1999)

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติชั้นพื้นฐานโดยทั่วไปของดินกรุงเทพฯ (Chin, 1972 และ Tonyagate,1978)

Soil Type	Depth (m)		Wn %	LL %	PL %	PI %	LI	γ (t/m ²)	e	G_s
	From	To								
Weathered Clay	0	2	35-70	35-55	-	23-30	0.7-1.0	1.60-1.80	1.30-1.40	2.60-2.70
Soft Clay	1	16	65-90	65-90	30-40	40-63	0.6-0.9	1.50-1.70	1.50-2.60	2.70
Stiff Clay	10	25	24-34	40-75	20-28	18-50	0.1-0.2	1.90-2.00	1.65-1.95	2.70-2.80
First Sand	14	38	17-25	-	-	-	-	1.80-2.10	0.70	2.70
Hard Clay	24	43	30-35	55-69	18-25	31-44	0.1-0.3	1.80-2.00	0.80-0.95	2.70
Second Sand	30	58	20	-	-	-	-	1.80-2.60	0.75	2.70
Hard Clay	51	67	22-26	48-70	23-25	25-46	0.1	2.04	0.65-0.72	2.74
Sand	67	85	16	-	-	-	-	-	-	2.69
Hard Clay	79	96	19-20	56-57	22-26	32-34	-0.1	2.00-2.10	0.55-0.61	2.70-2.80

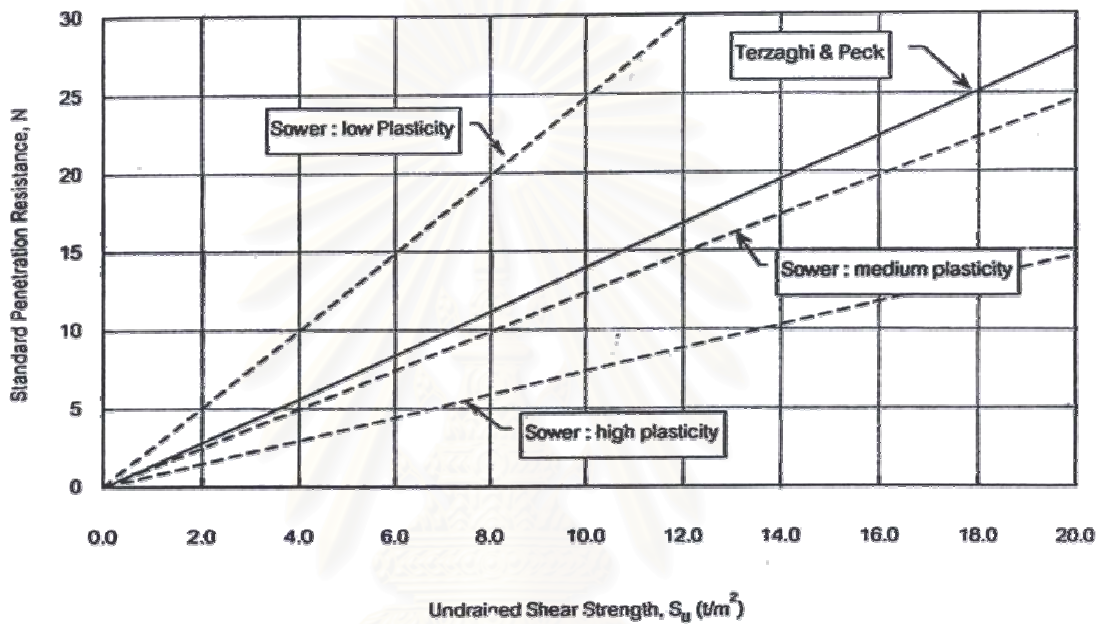
2.1.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

ในการออกแบบเสาเข็ม จำเป็นต้องรู้คุณสมบัติทางวิศวกรรมต่าง ๆ ของดินเพื่อใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม สำหรับเข็มในดินเหนียวค่าที่ต้องการคือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear Strength, S_u) ของดินเหนียว สำหรับเสาเข็มในทรายค่าที่ใช้คือ Effective angle of internal friction, ϕ' และ Effective overburden pressure, σ'_{vo}

ค่าต่าง ๆ ข้างต้นบางตัวไม่สามารถทำการวัดสมบัติได้โดยตรงหรือมีความยุ่งยากในการทดสอบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์แบบ Empirical ที่ไม่มีรากฐานจากทฤษฎีซึ่งจะใช้ได้เฉพาะแห่งเป็นส่วนใหญ่สำหรับดินกรุงเทพฯ ๆ ได้เคยมีการวิจัยค่าต่าง ๆ เหล่านี้ดังรายละเอียดโดยสังเขปต่อไปนี้

ก. ดินเหนียว

ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและจากการทดสอบในสนาม โดยทั่วไปค่า S_u ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined Compression Test) หรือการใช้ความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างค่า N จากการทดสอบ SPT กับ S_u ที่เสนอโดย DM.7.1 (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u (DM 7.1)

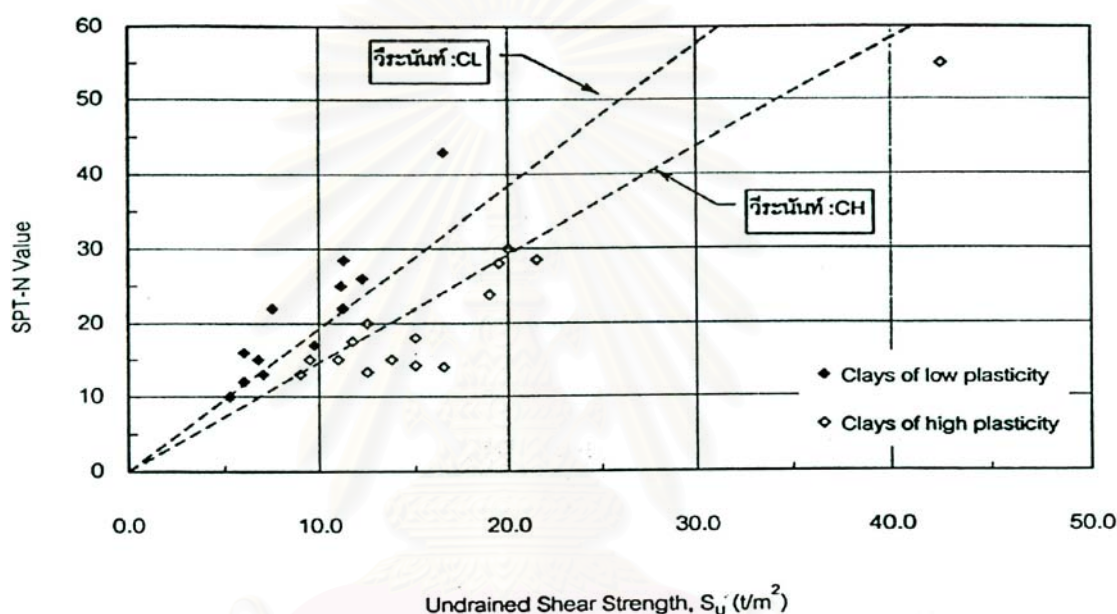
ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ฯ ชั้นแรก วีรนนท์ (2526) ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า S_u ของตัวอย่างดินเหนียว ซึ่งเก็บแบบมีการรบกวน (Disturbed Sample) จากการทำ SPT เช่นเดียวกัน โดยเก็บข้อมูลจากชั้นดิน First Stiff Clay ในกรุงเทพฯ ฯ ที่ความลึก 14 – 25 เมตร ซึ่งมีค่า N - Value มากกว่า 8 มีสมการดังนี้

- High Plasticity (CH) : $S_u = 0.685 N$ (ตันต่อตารางเมตร)
- Low Plasticity (CL) : $S_u = 0.520 N$ (ตันต่อตารางเมตร)

โดยแบ่งชนิดของดินตาม Unified Soil Classification ค่า N มีหน่วยเป็น blow / ft และไม่ต้องทำการปรับแก้ค่า N เนื่องจากผลของ Effective Overburden Pressure

แมนสรวง, มนัสพลและนัฐพล (2540) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินตามแนวเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินและได้เสนอกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง SPT N-Value กับ ค่า Unconfined Compressive Strength, Q_u

เมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ Undrained Shear Strength ของ วิจารณ์ท์ (2526) กับของแมนสรวง, มนัสพลและนัฐพล (2540) พบว่าค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลของแมนสรวง, มนัสพลและนัฐพล (2540) กับความสัมพันธ์ของวิจารณ์ท์ (2526)

ก. ทฤษฎี

สำหรับชั้นทราย ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure; σ'_{vo}) และค่ามุมต้านแรงเฉือน (Angle of Internal Friction; ϕ) สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาผลกระทบเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลในบริเวณชั้นดินกรุงเทพฯ ซึ่งมีผลทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินเปลี่ยนแปลงไปจากในอดีต

ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure; σ'_{vo}) ในการหาค่า σ'_{vo} ต้องรู้ความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักรวมของมวลดิน (Total Unit Weight) ของแต่ละ

ชั้นดินและค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) ค่า σ'_{vo} จะเท่ากับ Total Overburden Pressure ลบ ด้วย Pore Water Pressure ดังสมการ โดยค่า Pore Water Pressure หาโดยวิธี การวัดในสนามหรือ หาจากความสัมพันธ์แบบ Empirical ตามที่เคยมีผู้วิจัยไว้ในอดีต

$$\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - u$$

เมื่อ

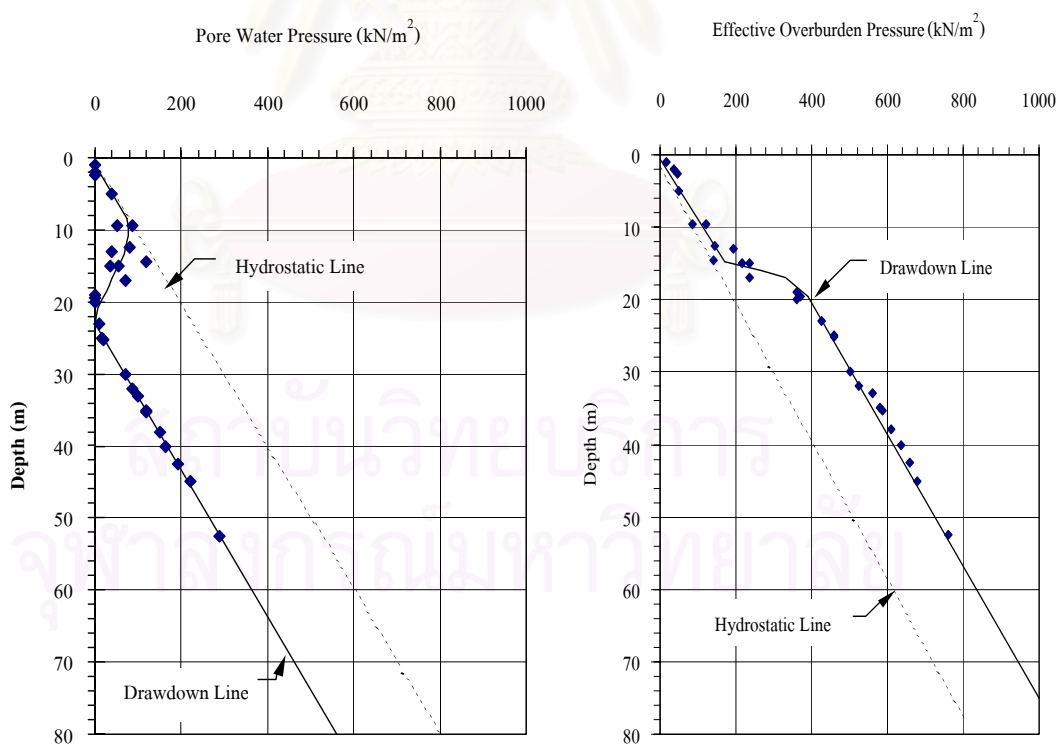
σ_{vo} = Total Overburden Pressure ซึ่งเท่ากับ $\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i$

γ_i = Unit Weight ของชั้นดิน

h_i = ความหนาของชั้นดิน

u = Pore Water Pressure

จากข้อมูลการวัดค่าแรงดันน้ำใต้ดินในเขตกรุงเทพฯ พบว่า ผลกระทบในการสูบน้ำบาดาลในชั้นดินกรุงเทพฯ อยู่ที่ระดับความลึกประมาณ -23 ม. ต่ำจากผิวดินดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของระดับน้ำใต้ดินในเขตกรุงเทพมหานคร

ค่ามุมต้านแรงเฉือน (Angle Of Internal Friction; ϕ) สำหรับทรายจะใช้ในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล (ϕ') การหาค่ามุม ϕ' สามารถหาได้จากการทดสอบ Direct Shear Test และ Triaxial Test ในห้องปฏิบัติการหรืออาจใช้ สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' กับ N - Value ที่ได้มาจากการทดสอบ SPT ขณะทำการเก็บตัวอย่างดินแบบมีการรบกวน

การหาค่ามุม ϕ' โดยใช้วิธี การทดสอบในสนามในรูปความสัมพันธ์แบบ Empirical ได้มีผู้เสนอไว้มากมาย เช่น สำหรับดินทรายปนดินเหนียว (Clay Sand) วีระนันท์ (2526) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม ϕ' กับค่า SPT - N Value ซึ่งได้จากผลการวิเคราะห์ กลับจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ ฯ ดังนี้

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

โดยค่า N ในสมการไม่ได้ปรับแก้ผลจาก Effective Overburden Pressure

Perck, Hanson & Thornburn (1974) ได้เสนอความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ก ซึ่งเหมาะสำหรับรายละเอียดที่ไม่มีดินเหนียวปนอยู่แต่อาจมีทรายปนอยู่ได้บ้าง สำหรับชั้นทรายกรุงเทพฯ ฯ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นดินทรายปนดินแป้ง (Silty Sand, SM) ผลการศึกษาของ Thanudklenug (1987) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม ϕ' กับค่า SPT - N Value ที่ได้มีความใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Perk, Hanson & Thornburn (1974) โดยที่ค่า N จะต้องทำการปรับแก้เนื่องจากผลของ σ'_{vo} ที่เสนอโดย Perk, Hanson & Thornburn (1974) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ข โดยมีสมการปรับแก้ดังนี้

$$N' = C_N \times N$$

$$C_n = 0.77 \log (20 / \sigma'_{vo})$$

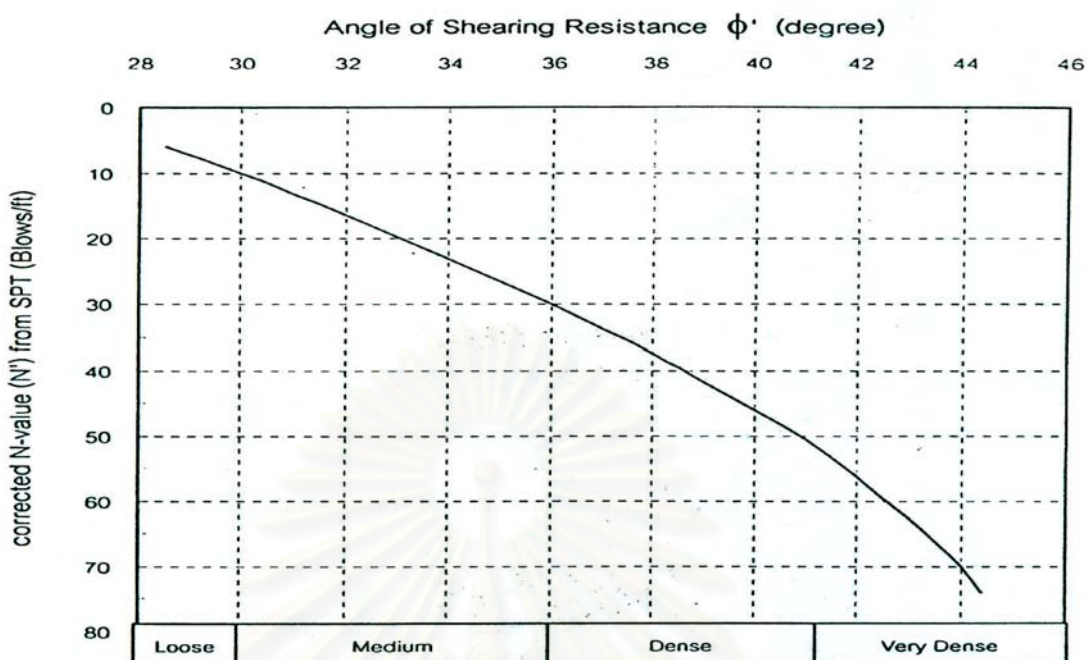
$$\phi' = -0.0018N'^2 + 0.3817N' + 26.251$$

ที่ซึ่ง

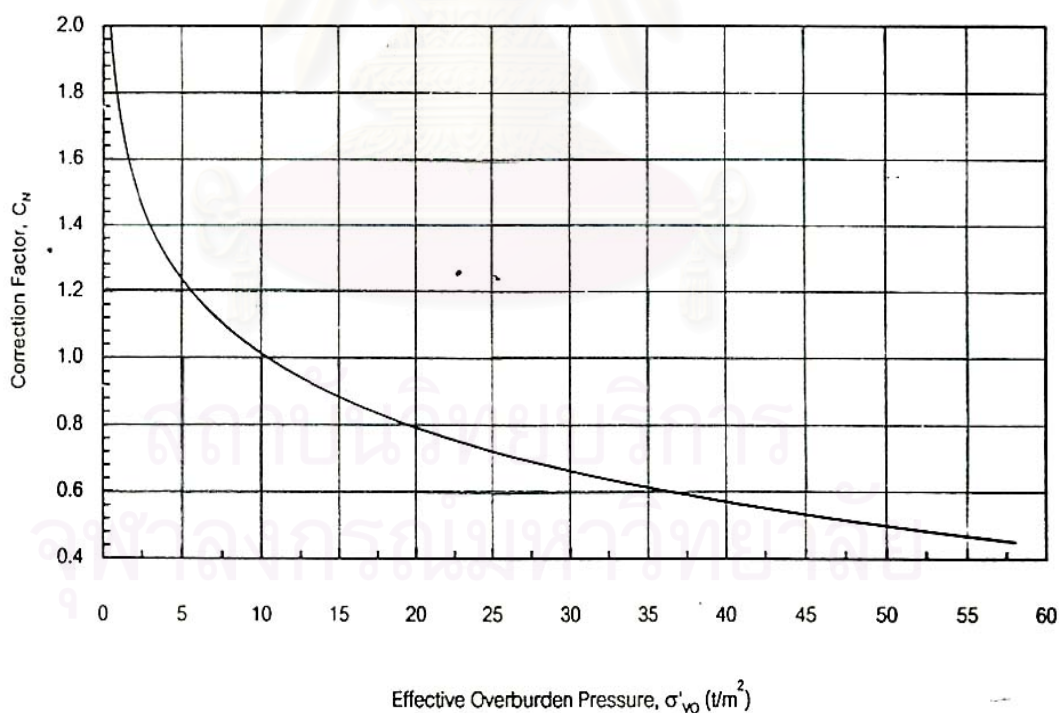
N' = ค่า N ที่ได้รับการปรับแก้

C_N = ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของ σ'_{vo}

σ'_{vo} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งในหน่วย ksc



รูปที่ 2.5 ก แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า N (SPT) กับค่า ϕ' (Perk, Hanson & Thornburn, 1974)



รูปที่ 2.5 ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_N กับ σ'_{vo} (Perk, Hanson & Thornburn, 1974)

แม้ว่าค่าพารามิเตอร์ S_u สำหรับดินเหนียวและ ϕ' สำหรับทรายนั้น สามารถหาได้จากทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และความสัมพันธ์กับค่า N – Value จาก SPT ก็ตาม แต่เนื่องจากค่าที่ได้จาก N – Value จาก SPT นั้นเป็นเพียงค่าที่ได้จากการทดลอง (Empirical) ซึ่งไม่ได้คิดรวมถึงปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น Time Effect, Anisotropy, fabric of soil เป็นต้น ดังนั้นจึงควรใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งจะถูกต้องมากกว่าแล้วหากไม่มีผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการจึงค่อยใช้ผลจาก N – Value แทน

2.1 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว

2.2.1 วิธีสถิตศาสตร์ (Static Method)

วิธีการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตศาสตร์อาศัยหลักการสมดุลของแรง กล่าวคือ กำลังรับน้ำหนักที่จุดวิกฤติของเสาเข็ม (Q_{ult}) เท่ากับผลรวมของแรงต้านจากปลายเสาเข็มและแรงเสียดทานรอบผิวของเสาเข็มลบด้วยน้ำหนักของเสาเข็มดังสมการ

$$Q_{ult} = Q_f + Q_b$$

เมื่อ

Q_{ult} = กำลังรับน้ำหนักที่จุดวิกฤติของเสาเข็ม

Q_f = ผลรวมกำลังรับแรงเสียดทานรอบเสาเข็ม

Q_b = กำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม

ก. กำลังรับน้ำหนักจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน

$$Q_f = f_s \Delta L \cdot p$$

เมื่อ

ΔL = ความยาวเสาเข็ม (Pile Length) ในชั้นดินที่พิจารณา

p = เส้นรอบรูปเสาเข็ม

f_s = หน่วยแรงเสียดทาน (Skin Friction) ในชั้นดินที่กำลังพิจารณา

สำหรับในชั้นดินเหนียว : $f_s = \alpha S_u$

สำหรับในชั้นดินทราย : $f_s = k_s \sigma'_{vi} \tan \delta$

เมื่อ

α = Adhesion factor

S_u = กำลังรับแรงเฉือน

K_s = ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง

σ'_{vi} = หน่วยประสิทธิผลที่กึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณา

δ = มุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน

ข. กำลังรับแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

$$Q_b = q_b A_b$$

เมื่อ

A_b = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม (Cross Section Area)

q_b = หน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing Stress)

โดย

$$q_b = cN_c + qN_q$$

สำหรับดินเหนียว : ค่า $N_q = 1$ และ $N_c = 9$ จะได้ $q_b = 9c + q$

สำหรับดินทราย : ค่า $c = 0$ และใช้ค่า Effective Vertical Stress
จะได้

$$q_b = \sigma'_{vo} N_q$$

เมื่อ

N_c, N_q = Bearing Capacity Factor

σ'_{vo} = หน่วยแรงรวมในแนวตั้งที่ระดับปลายเข็ม

c = Cohesion of soil

q = Surcharge ที่กดทับมักกำหนดให้เท่ากับ W_p

2.2.2 การคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยใช้ข้อมูล จากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Pile Load Test Data)

การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ (Q_{ult}) ซึ่งมีหลาย ๆ วิธีที่เคยมีผู้วิจัยไว้ Fellenius (1980) ได้ทำการรวบรวมซึ่งมี รายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

ก. วิธีของ Davisson (1972)

ค่ากำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติ เป็นน้ำหนักที่เสาเข็มเกิดการทรุดตัวจนเกินค่าความยืดหยุ่นที่ถูกกำหนดไว้ค่าหนึ่งคือ 0.15 นิ้ว (4 mm.) บวกกับ Factor ค่าหนึ่งซึ่งมีค่าเท่ากับขนาดเส้นผ่า ศูนย์กลางของเสาเข็ม (นิ้ว)หารด้วย 120

$$x = 0.15 + D/120 \text{ , นิ้ว}$$

ที่ซึ่ง

$$D = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (นิ้ว)}$$

พิจารณาจากรูปที่ 2.6 ก ทำการลากเส้น (BC) ขนานระยะ Offset (x) จากเส้น Initial Modulus (OA) จุดตัดระหว่างเส้นตรง BC กับเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัว คือจุด Q_{ult} (จุด C)

ข. วิธีของ Chin (1970-71)

ค่ากำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติเท่ากับค่าส่วนกลับของความชันที่ได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกแต่ละค่าหารด้วยค่าการเคลื่อนที่ที่ค่าน้ำหนักบรรทุกนั้น บนแกน y และ ค่าการเคลื่อนที่ (Movement) บนแกน x

พิจารณาจากรูปที่ 2.6 ข ค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ (Q_v)_{ult} มีค่าเท่ากับ $1/C_1$ โดยที่ C_1 คือค่าความชันของกราฟ

ค. วิธีของ De Beer & Wallays (1972)

ค่ากำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติหาได้โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวบนกราฟแบบลอการิทึมสเกล พิจารณาจากรูปที่ 2.6 ค ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติเท่ากับจุดที่เปลี่ยนความชันของเส้นตรงบนความสัมพันธ์แบบลอการิทึมสเกล

ง. วิธีของ Brinch Hanson (1972) 90% Criterion

วิธีนี้เป็นการลองผิดลองถูกเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ $(Q_v)_{ult}$ คือค่า ณ จุดที่มีการทรุดตัว Δu เป็นสองเท่าของค่าการทรุดตัวที่ 90% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ (รูปที่ 2.6ง)

จ. วิธีของ Brinch Hanson (1972) 80% Criterion

วิธีนี้พัฒนามาจาก Brinch Hanson (1972) 90% โดยใช้วิธีการแก้สมการเส้นตรง โดยกำหนดค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติคือตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกมีค่าเป็น 80% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดใด ๆ ณ ตำแหน่งที่มีการทรุดตัว (Δu) มีค่าหนึ่งในสี่ของค่าการทรุดตัวที่จุดนั้น (รูปที่ 2.6จ)

วิธีการวิเคราะห์เริ่มจากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ของรากที่สองของการทรุดตัวหารด้วยน้ำหนักบรรทุก $(\frac{\sqrt{\Delta}}{Q_{va}})$ กับค่าการทรุดตัว (Δ) ซึ่งจะได้สมการเส้นตรง

$$\frac{\sqrt{\Delta u}}{Q_u} = C_1 \Delta u + C_2 \quad \text{(ก)}$$

ตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกมีค่าเป็น 80% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดใด ๆ ณ ตำแหน่งที่มีการทรุดตัว (Δu) มีค่าหนึ่งในสี่ของค่าการทรุดตัวที่จุดนั้น แสดงสมการได้ดังนี้

$$\frac{\sqrt{0.25\Delta u}}{0.8Q_u} = 0.25C_1 \Delta u + C_2 \quad \text{(ข)}$$

แก้สมการ (ก) และ (ข) เพื่อหาค่า Δu ที่ทำให้เกิดน้ำหนักบรรทุกสูงสุดตามวิธีนี้

ฉ. วิธีของ Mazurkiewicz (1972)

ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติหาได้จากเส้นตรงสมมติที่สร้างขึ้นมาจากตัดกับแกนน้ำหนักบรรทุก ซึ่งเส้นสมมตินี้สร้างได้โดยการแบ่งค่าการทรุดตัวออกเป็นส่วน ๆ ที่มีขนาดเท่ากันลากตัดเส้นโค้งความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว จนสามารถทราบค่าน้ำหนักบรรทุกที่ตำแหน่งการทรุดตัวนั้น ๆ ดังรูปที่ 2.6 ฉ จากนั้นลากเส้นตรงทำมุม 45 องศากับแกนน้ำหนักบรรทุกเพื่อสร้างจุดตัดกับตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่จุดถัดไป จุดตัดเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะลากเป็นเส้นตรงและใช้เป็นเส้นตรงสมมติสำหรับหาตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดบนแกนน้ำหนัก โดยจุดตัดของเส้นตรงนี้บนแกนน้ำหนักบรรทุกคือค่า Q_{ult}

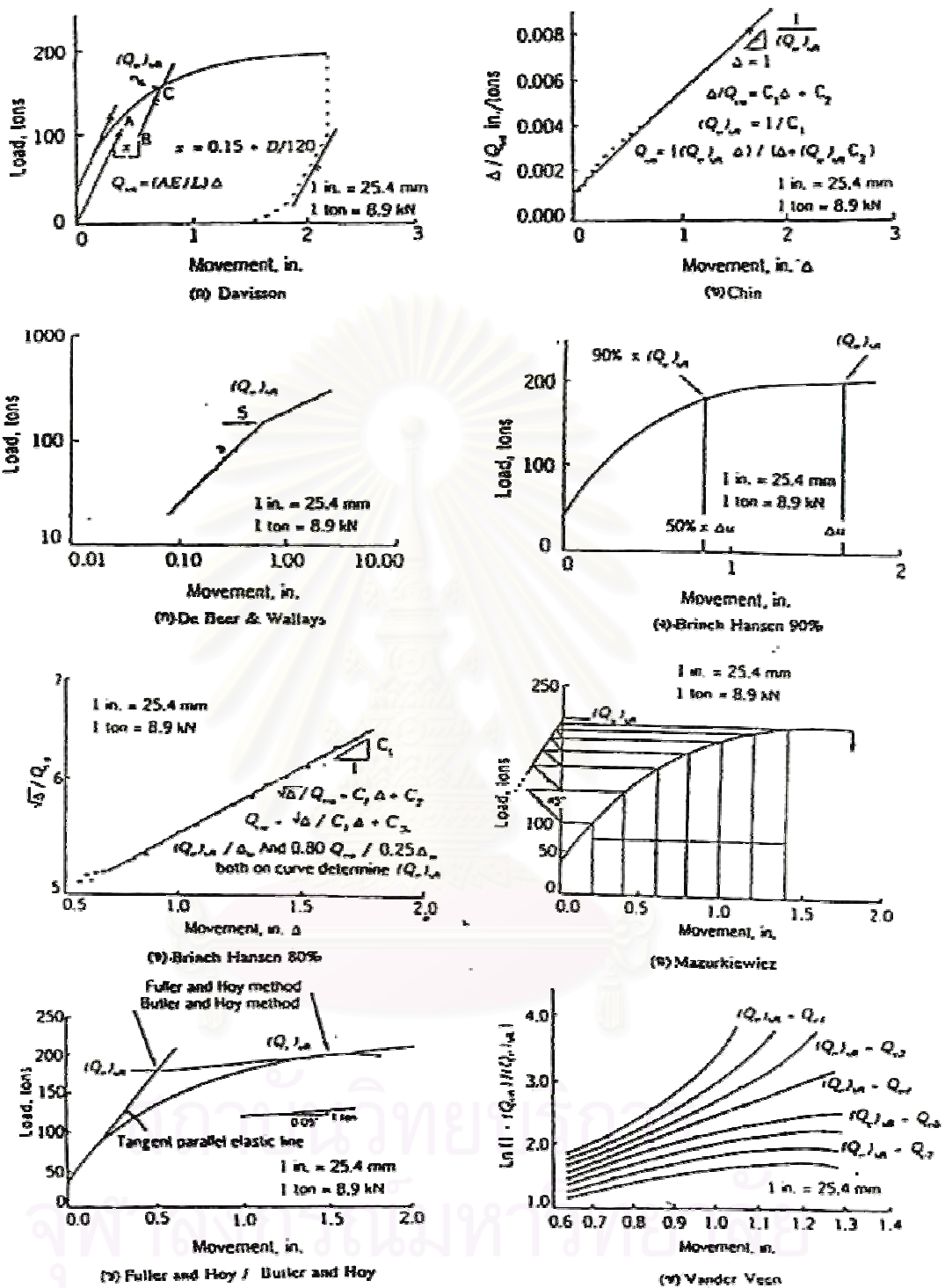
ช. วิธีของ Fuller & Hoy (1970) และ Butler & Hoy (1977)

ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติตามวิธีของ Fuller & Hoy (1970) มีค่าเท่ากับค่าที่จุดที่เส้นสัมผัสส่วนโค้งมีความลาดชัน 0.05 นิ้ว/ตัน (รูปที่ 2.6 ช) สำหรับวิธีของ Butler & Hoy (1977) ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติมีค่าเท่ากับค่าที่จุดที่เส้นสัมผัสส่วนโค้งมีความลาดชัน 0.05 นิ้ว/ตัน ตัดกับส่วนของเส้นตรงเริ่มต้นของส่วนโค้งหรือเส้นขนานกับเส้น Rebound Curve หรือเส้นอิลาสติกเริ่มต้น ดูรูปที่ 2.6 ช

ซ. วิธีของ Vander Veen (1953)

การหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติหาโดยสมมติค่า $(Q_v)_{ult}$ ที่ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \{1 - (Q_v / Q_v)_{ult}\}$ กับ ค่าการทรุดตัวนั้น ๆ มีรูปแบบเป็นเส้นตรง ซึ่งค่าที่สมมติจะเป็นค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ ดูรูปที่ 2.6 ซ

รายละเอียดวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติจากการทดสอบในแต่ละวิธีจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปแบบวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่จุดวิบัติจากการทดสอบเสาเข็ม(Fellenius,1980)

2.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ

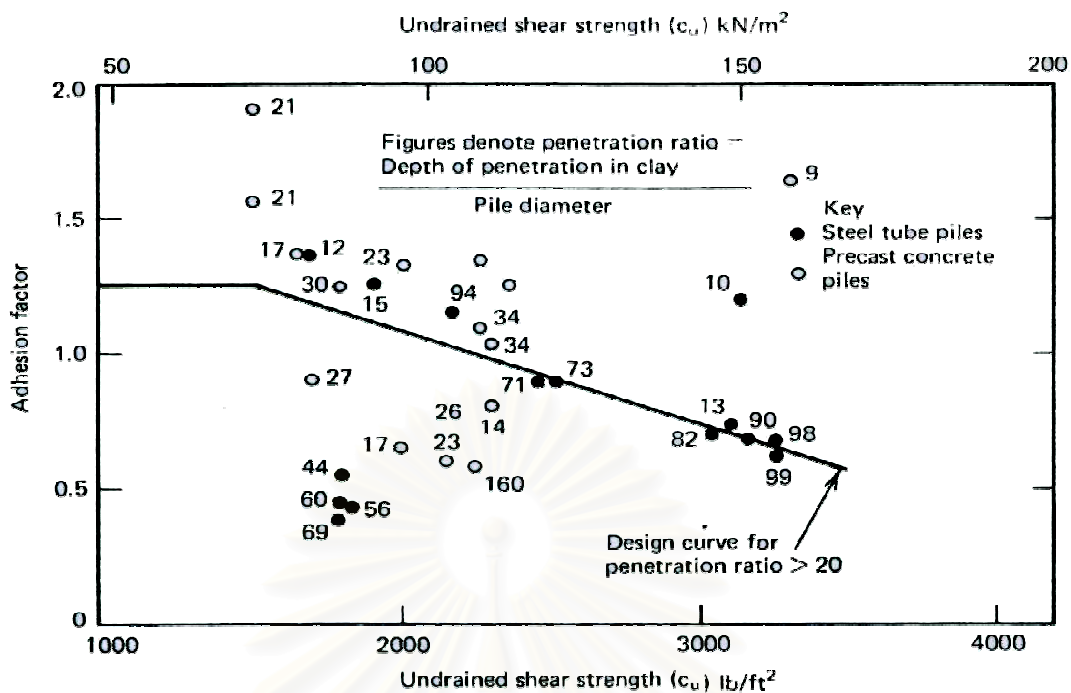
จากการพิจารณาสมการต่าง ๆ ในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะพบว่ามิตค่า พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบเสาเข็มหลัก ๆ อยู่ 3 ตัวคือ α , β หรือ $(K_s \tan \delta)$ และ N_q ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะมีค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมและถูกต้อง ซึ่งรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์แสดงได้ดังนี้

2.3.1 Adhesion Factor (α)

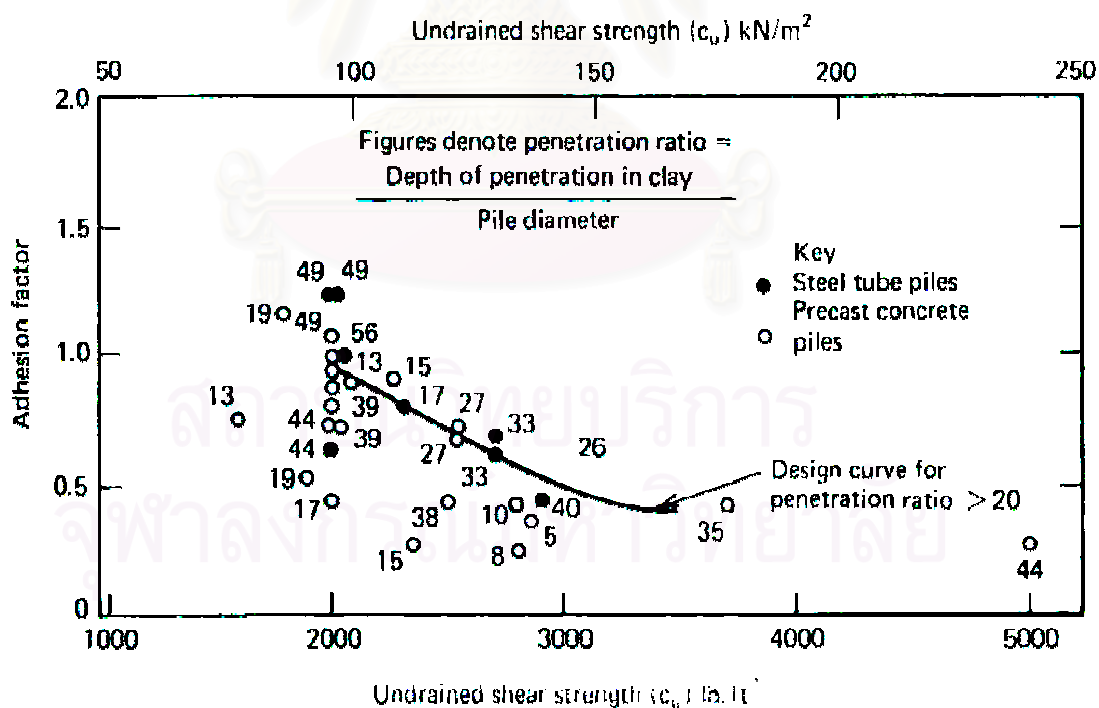
Adhesion Factor(α) เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดและรูปร่างของเสาเข็ม ชนิดของดิน และวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม (Sambhandharaksa, 1991) ในการตอกเสาเข็มจะเกิดแรงสั่นสะเทือนทำให้ทำให้รูปร่างเสาเข็มบริเวณส่วนบนเกิดการขยายตัว (Enlarged hole) ส่งผลให้ค่า Skin friction ลดลง และจากการทดสอบพบว่า ค่า Shear Strength ที่ High strain จะมีค่าน้อยกว่าที่ Low Strain นั่นคือเมื่อเข็มมีการเคลื่อนตัวมากขึ้นจะทำให้ค่า Shear Strength ที่ผิวลดลงด้วย (Strain Softening) นอกจากนี้ Ground heave ก็ยังมีผลต่อ Skin friction ด้วย ปัจจัยดังกล่าวทำให้ค่าของ Adhesion factor (α) มีค่าไม่แน่นอนอยู่ในช่วงกว้าง ค่า Adhesion factor (α) ที่ใช้ในการออกแบบมักได้มาจากวิธี Empirical โดยวิเคราะห์จากผลการทดสอบ Pile Load Test โดยจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion factor (α) กับค่า Undrained Shear Strength (S_u)

Tomlinson (1970) ได้เสนอกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างค่า α กับ S_u ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 และค่าความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ S_u ที่ Tomlinson(1970) ได้ทำการศึกษา และสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี ดังรูปที่ 2.8

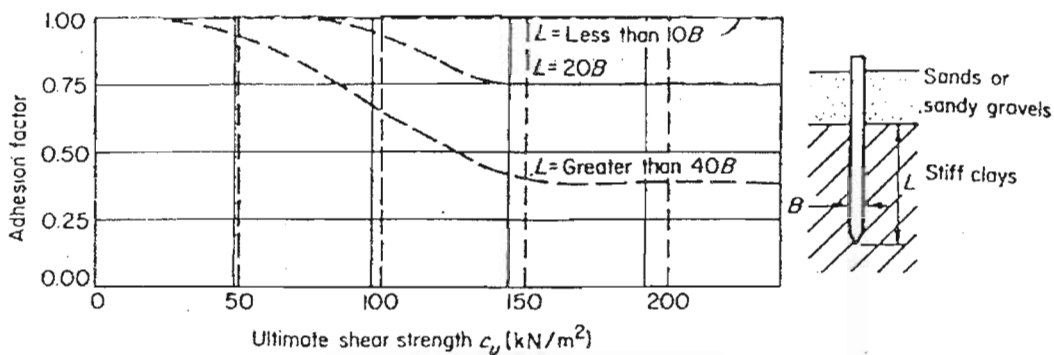
Flaate (1968) ได้ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับค่า α คือ นอกจาก ค่า α ขึ้นอยู่กับค่า Undrained Shear Strength ของดินเหนียวแล้วยังขึ้นอยู่กับค่า Plasticity Index ด้วย ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.9



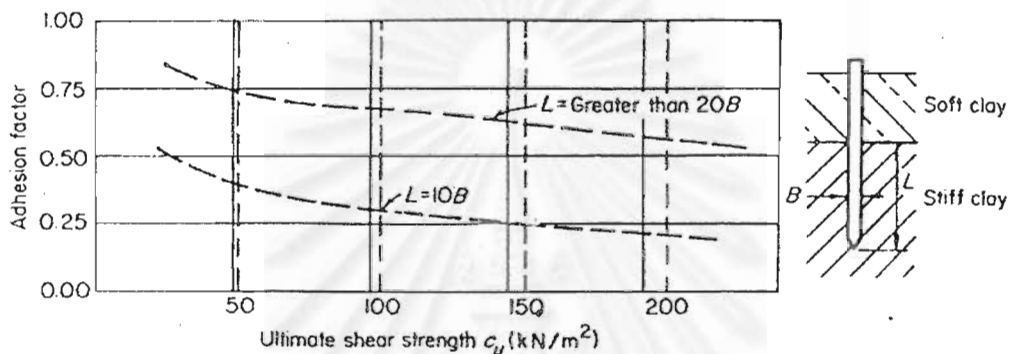
รูปที่ 2.7ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในดินเหนียวแข็ง ดินชั้นบนเป็นเป็นทรายและกรวด , กรณีที่ 1 (Tomlinson,1970)



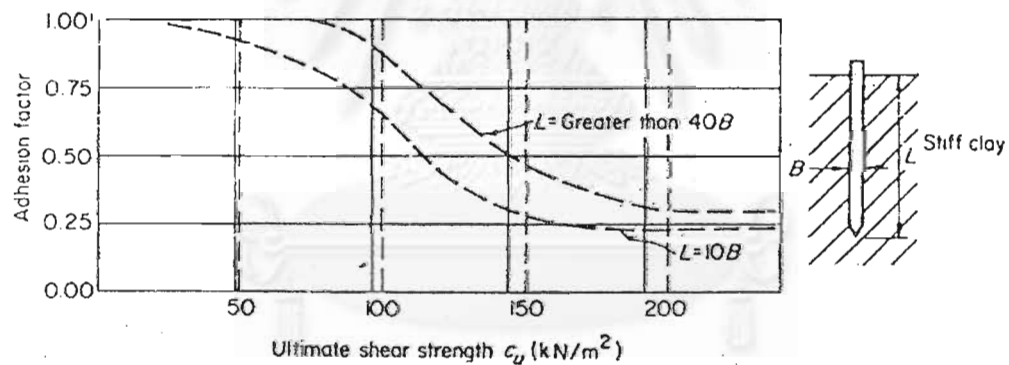
รูปที่ 2.7ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในดินเหนียวแข็ง เสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งโดยตรง , กรณีที่ 3 (Tomlinson,1970)



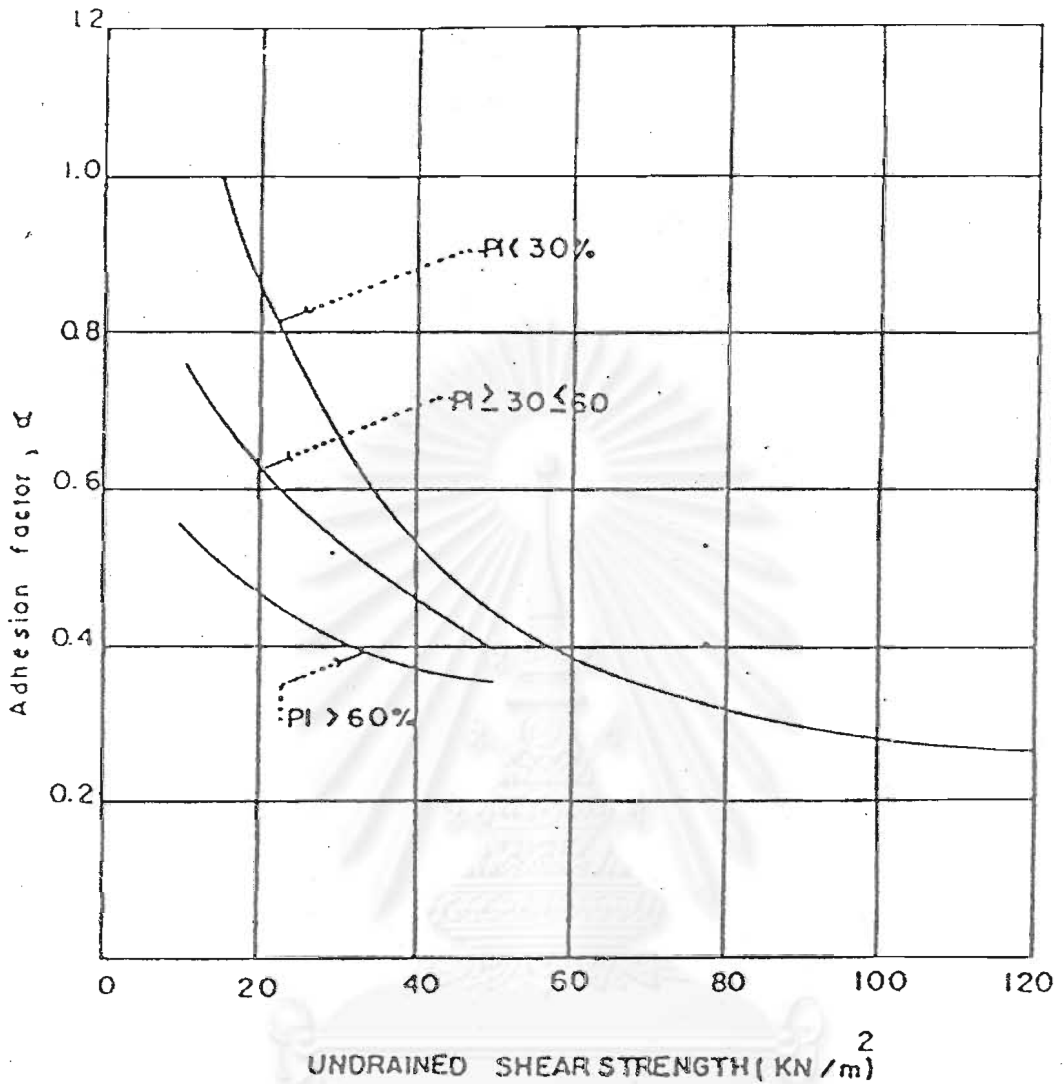
(a)



(b)



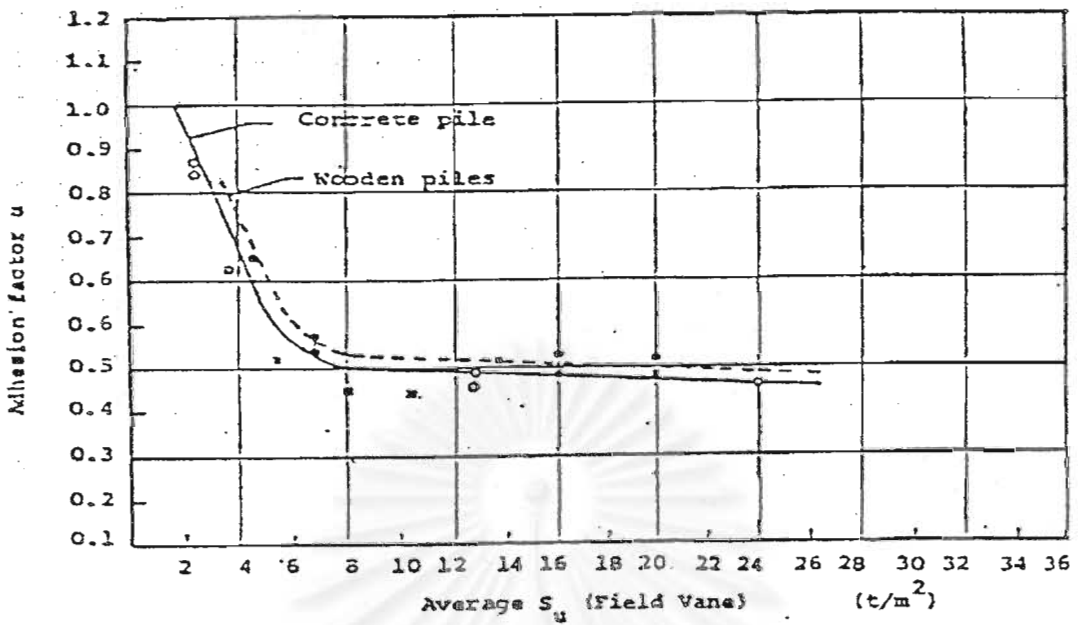
รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ในแต่ละกรณี, (a) Case 1: piles driven through overlying sands or sandy gravels. (b) Case 2: piles through overlying weak clay. (c) Case 3: piles without different overlying strata. (Tomlinson, 1970)



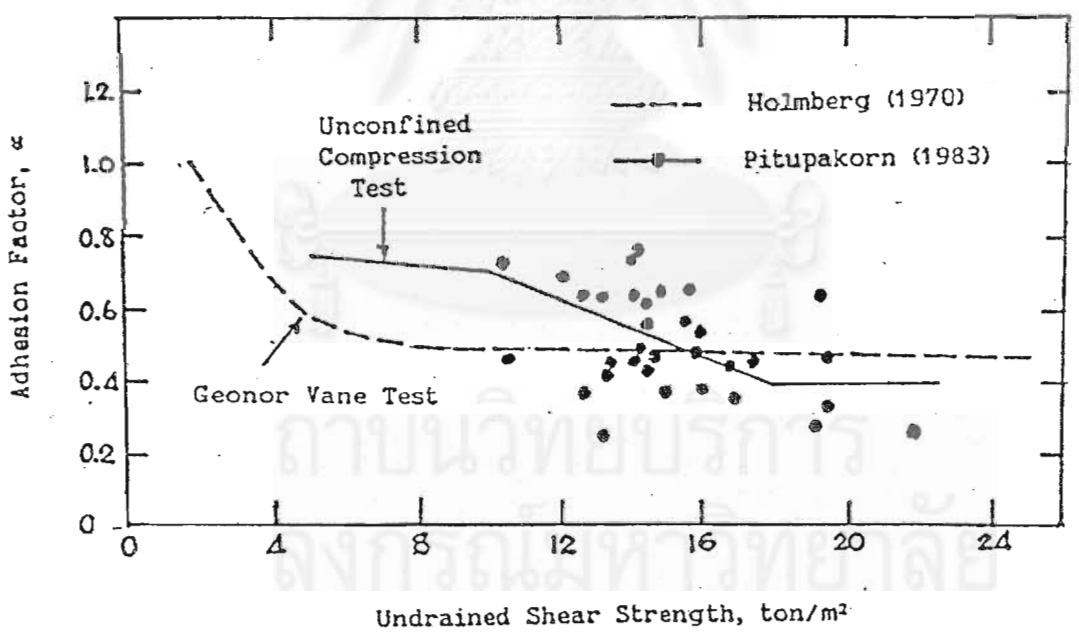
รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u สำหรับเสาเข็มตอกในดินเหนียว (Flaate, 1968)

สำหรับดินเหนียวบริเวณเขตกรุงเทพฯ Holmberg (1970) พบว่าค่า α มีค่าแปรผันอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 1.0 สำหรับเสาเข็มตอก ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยที่ค่า S_u ได้มาจาก Vane Shear Test และค่า α สำหรับ Soft Bangkok Clay พบว่ามีค่าประมาณ 1.0 (Brand, 1970 : Muktabhant & Suwanakul, 1971)

Pitupakorn (1983) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u พบว่าค่า α มีค่าสูงกว่าที่รวบรวมโดย Holmberg (1970) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ทั้งนี้เพราะว่าความแตกต่างของแหล่งกำเนิด S_u



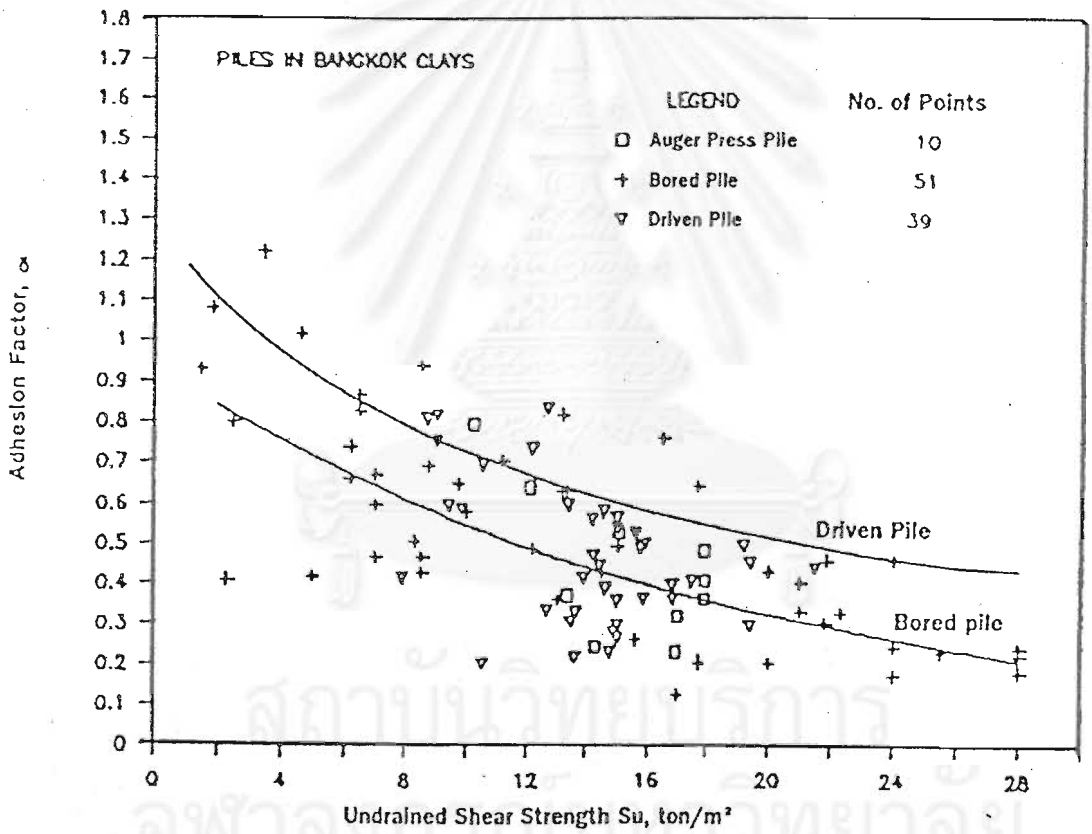
รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ที่มาจาก Vane Shear Test สำหรับดินกรุงเทพฯ (Holmberg, 1970)



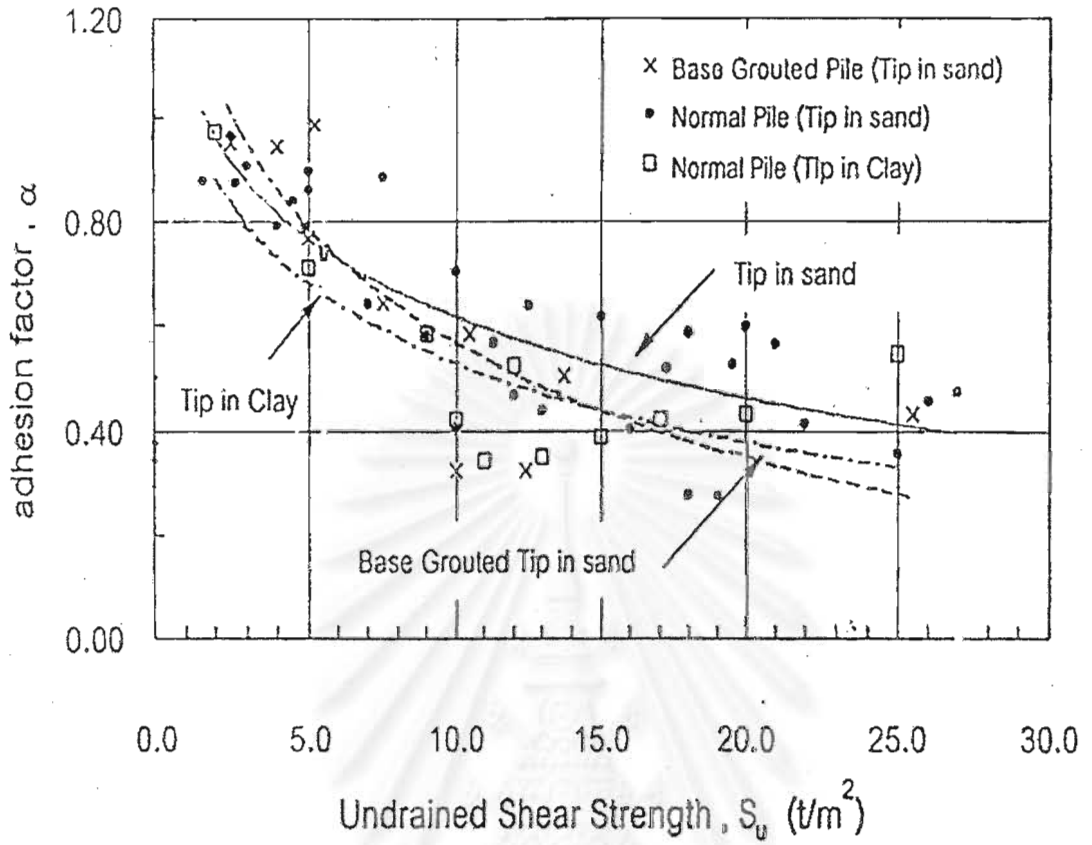
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มตอกสำหรับดินกรุงเทพฯ (Pitupakorn, 1983)

Pimpasugdi (1989) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับดินเหนียวกรุงเทพมหานคร ฯ โดยทำการรวบรวมผลการวิจัยก่อนหน้า (NG,1983 และสุวรรณ, 2531) พร้อมกับทำการวิจัยเพิ่มเติมจากข้อมูลการทดสอบเสาเข็มหลายชนิดคือ เสาเข็มตอก, เสาเข็ม Auger Press และเสาเข็มเจาะ โดยได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง α กับค่า S_u ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งพบว่าค่า α มีลักษณะกระจัดกระจาย (Scatter) โดยผลจากวิธีการก่อสร้างเสาเข็มที่แตกต่างกันไม่ได้มีอิทธิพลต่อ α อย่างเด่นชัด

นอกจากนี้ Teparaksa (2001) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u สำหรับเสาเข็มเจาะแต่ละประเภทในดินกรุงเทพฯ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u สำหรับดินกรุงเทพฯ (Pimpasugdi, 1989)



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u สำหรับเสาเข็มเจาะแต่ละประเภท
ในดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,2001)

2.3.2 Friction factor (β)

Friction factor (β) คือค่าพารามิเตอร์ในการประมาณค่าแรงเสียดทานในชั้นทราย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $K_s \tan \delta$ (Burland, 1973)

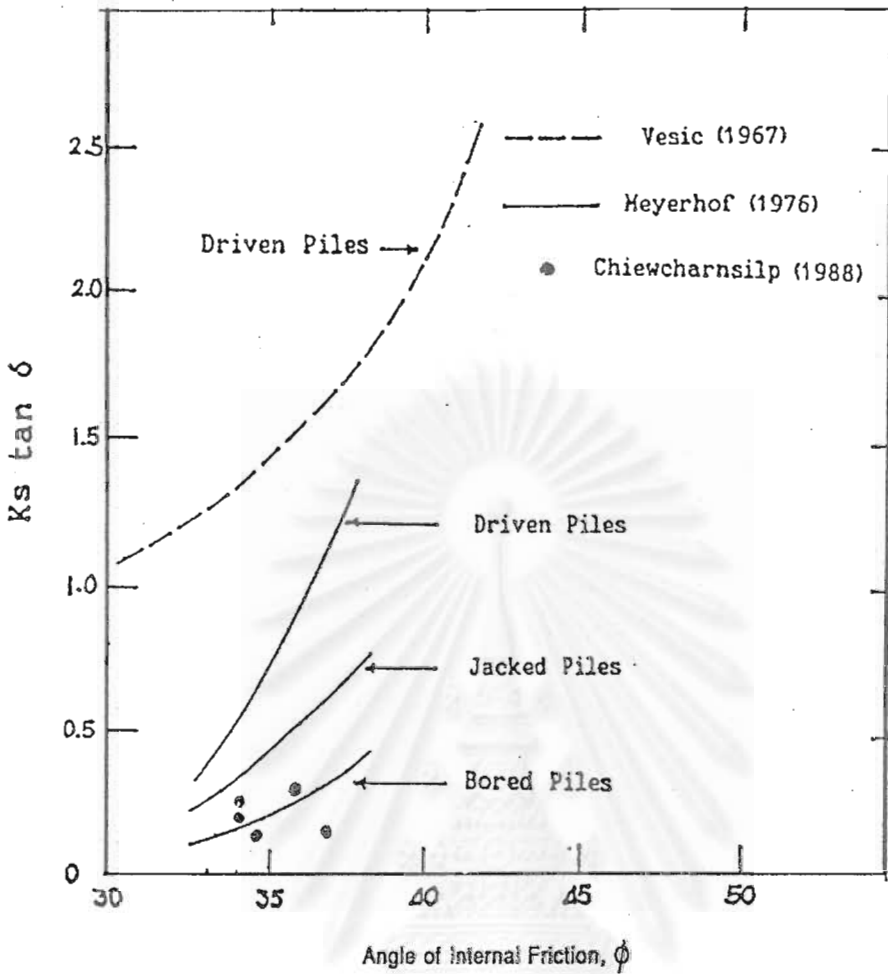
โดย K_s คือค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง (Skin Friction Lateral Coefficient Soil Pressure) ค่าของ K_s เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความแน่นเริ่มต้นของทราย วิธีการก่อสร้างเสาเข็มรูปทรงเรขาคณิตและความยาวเสาเข็ม และ δ คือ ค่ามุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน, (Internal) Friction between Pile & Soil โดย Broms & Aas (1996) ได้เสนอค่า K_s และเสาเข็มตอก ดังแสดงตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า K_s และ δ สำหรับเสาเข็มตอกที่เสนอ โดย Broms & Aas (1966)

ชนิดเสาเข็ม	K_s		δ
	ทราย หลวม	ทรายแน่น	
เสาเข็มเหล็ก	0.50	1.00	20
เสาเข็มคอนกรีต	1.00	2.00	$(3/4) \phi$
เสาเข็มไม้	1.50	4.00	$(2/3) \phi$

ค่า $K_s \tan \delta$ สำหรับเสาเข็มตอก Tavenus (1971) ได้ทำการทดสอบเสาเข็มจำนวนหนึ่งพบว่าสำหรับ H - Pile ควรใช้ค่า K_s เท่ากับ 0.5 เสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete pile) ใช้ค่า K_s เท่ากับ 0.7 และสำหรับ Tapered Timber piles ใช้ค่า K_s เท่ากับ 1.25 ส่วนค่า δ มักใช้เท่ากับ $0.5 \phi'$ ถึง $0.75 \phi'$

Vesic (1967) และ Meyerhof (1976) ได้เสนอค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับมุม ϕ ดังแสดงในรูปที่ 2.14

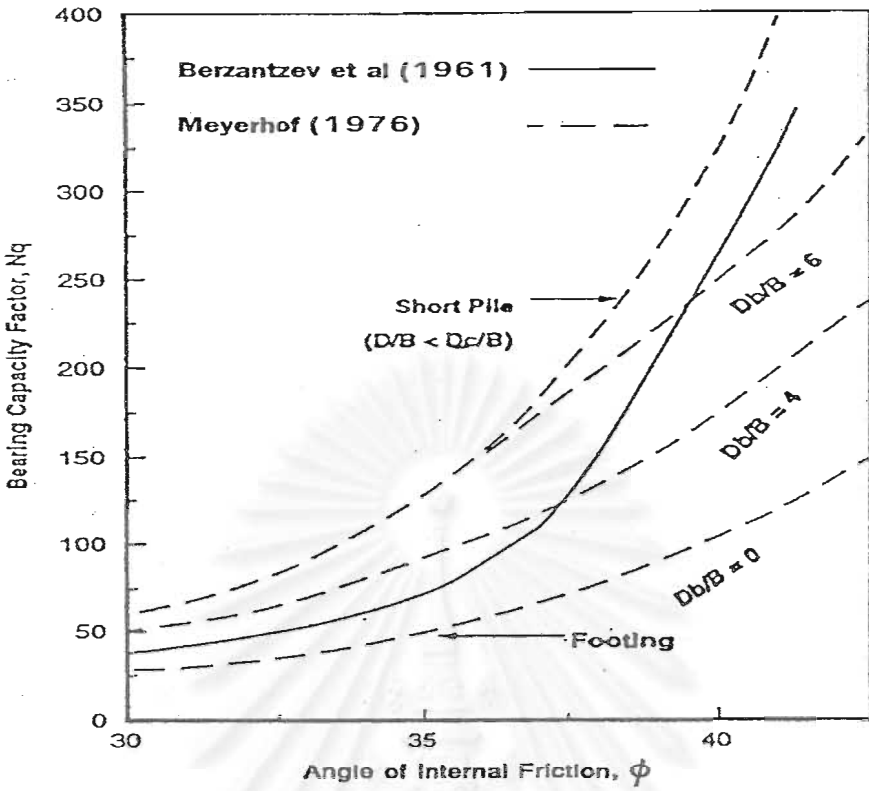


รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับค่ามุมเสียดทานภายใน ϕ' (Vesic, 1967 และ Meyerhof, 1976)

2.3.3 Bearing Capacity Factor (N_q)

ค่า N_q เป็นค่า Bearing Capacity Factor ซึ่งจะอยู่ในความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') โดยทั่วไปพบว่าค่า N_q จะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุม ϕ' โดยในการศึกษานี้จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับมุม ϕ'

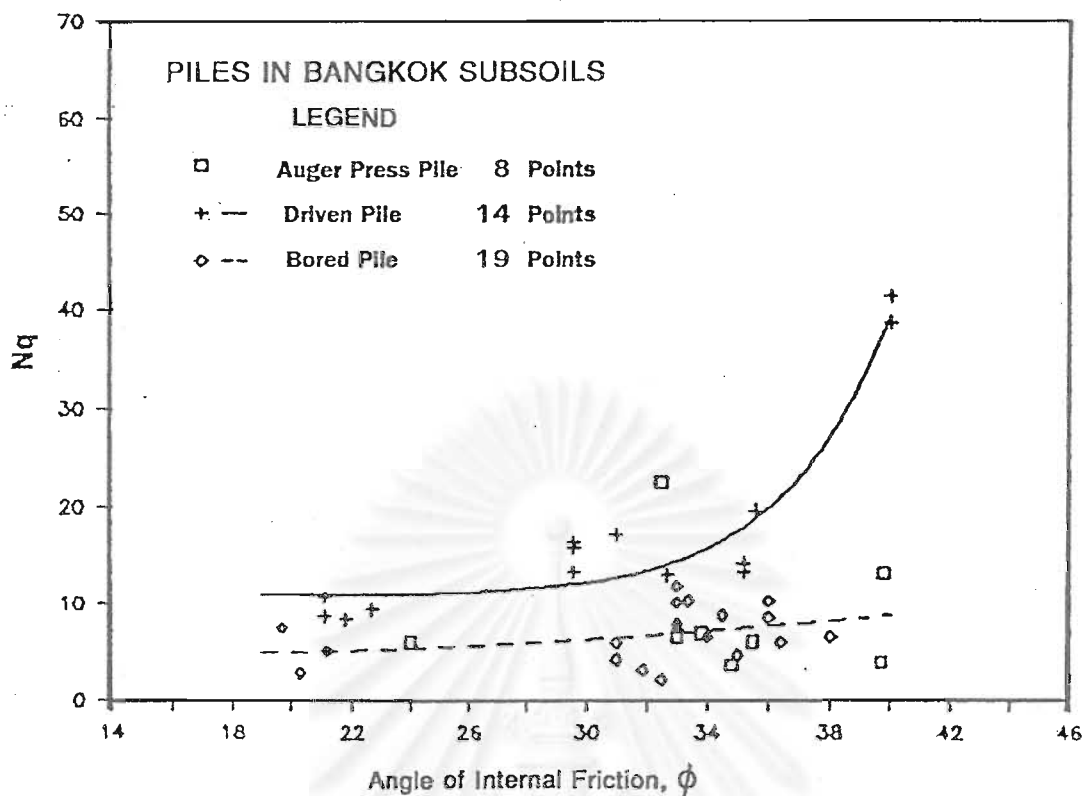
Berezantzev (1961) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับค่ามุม ϕ' สำหรับเสาเข็มตอกในการคำนวณออกแบบเสาเข็ม โดยพิจารณาค่า Relative Embedment Depth (D_p/B) เป็นค่าประมาณเท่ากับ 5 ซึ่งต่างกับ Meyerhof (1976) ที่ได้พิจารณาอิทธิพลของค่า D_p/B ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.15 แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าที่แสดงโดย Berezantzev อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของค่าที่เสนอโดย Meyerhof



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bearing Capacity Factor, N_q กับ ค่ามุมเสียดทานภายใน ϕ' (Berzantzev, 1961 และ Meyerhof, 1976)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับค่ามุม ϕ' ของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ เสนอโดย Pimpasugdi (1989) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งได้ทำการวิจัย โดยข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกที่มีปลายเสาเข็มอยู่ที่ชั้นทรายชั้นแรกของบริเวณเขตกรุงเทพฯ

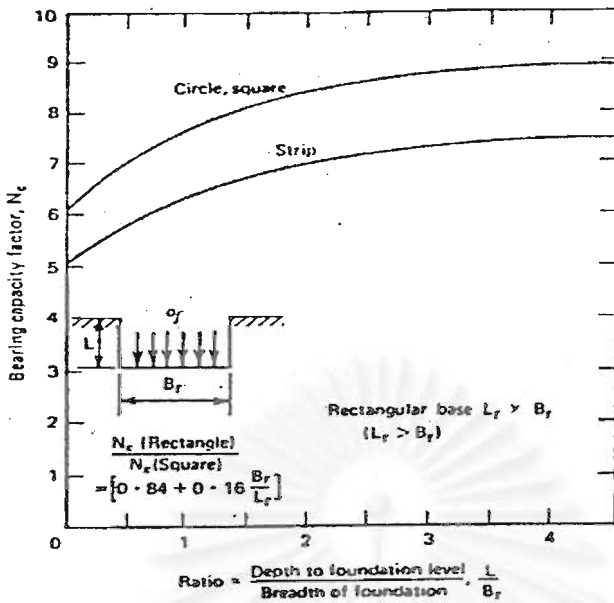
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bearing Capacity Factor, N_q กับ ค่ามุมเสียดทานภายใน ϕ' (Pimpasugdi, 1989)

2.3.4 Bearing Capacity Factor (N_c)

Meyerhof (1951) ได้วิเคราะห์ในเชิงทฤษฎี ได้ค่า $N_c = 9.3$ ถึง 9.8 ขึ้นอยู่กับ Friction Resistance ที่เกิดขึ้นที่ปลายเสาเข็ม สำหรับเสาเข็มกลมแล้ว Skempton (1951) พบว่า N_c มีค่าตั้งแต่ 6.14 ถึง 9 สำหรับความยาวของเสาเข็มที่จมในดินมากกว่า หรือเท่ากับ 4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังรูป 2.17 และจากการทดลองกับเสาเข็มใน London Clay Skempton (1951) สรุปว่า $N_c = 9$ เป็นค่าที่ถูกต้องเพียงพอในการคำนวณหาค่า End Bearing Capacity ทั้งของเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ Sower (1961) ได้ศึกษาแบบจำลองพบว่าค่า N_c มีค่าอยู่ระหว่าง 5.0 ถึง 8.0 ซึ่งค่าที่แตกต่างกันนี้ ถูกยอมรับว่าเกิดจากอิทธิพลของพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียด (The Stress - Strain Behavior) ของดินที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.17 Bearing Capacity Factor สำหรับฐานรากในชั้น Clay (Skempton, 1951)

สำหรับชั้นดินเหนียวในเขตกรุงเทพฯ ๗ Holmberg (1970) เสนอค่า $N_c = 10$ (ได้จากการทดสอบเสาเข็มแปดเหลี่ยมกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 58 เซนติเมตร) Muktabhand & Suwanakul (1971) ได้ทำการวิจัยจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อนและแข็งซึ่งพบว่าค่า N_c เท่ากับ 9 ในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

2.4 ชนิดของเสาเข็มและเทคนิคการก่อสร้างที่ใช้ในงานวิจัย

เสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง (Spun Pile) ที่ทำการก่อสร้างด้วยวิธีที่แตกต่างกันต่อไปนี้

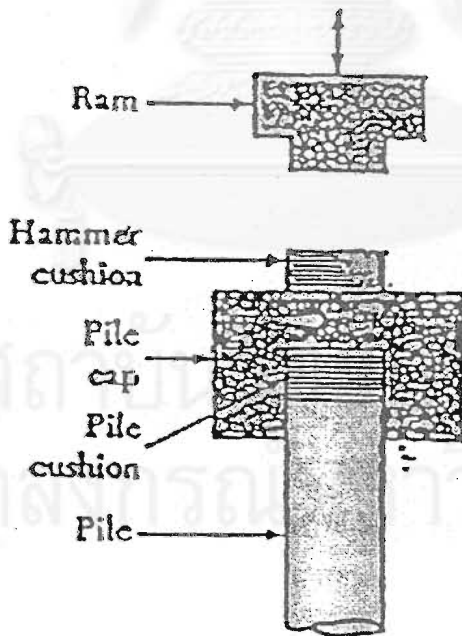
2.4.1 Driven Pile (เสาเข็มตอก)

เสาเข็มชนิดนี้มักใช้ในโครงการที่รับน้ำหนักไม่มากนักและมีบริเวณทำงานกว้างเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่ออาคารข้างเคียงอันเนื่องจากการตอกเข็ม เช่น การสันตะเทือน, การเคลื่อนตัวและแรงดันของดิน เป็นต้น

การตอกเสาเข็มมีปัจจัยที่สำคัญอันหนึ่งคือ การเลือกเครื่องมือในการตอกเสาเข็ม เพราะจะส่งผลถึงประสิทธิภาพและกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มรวมถึงค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้เครื่องมือในการตอกเสาเข็มให้เหมาะสมด้วย

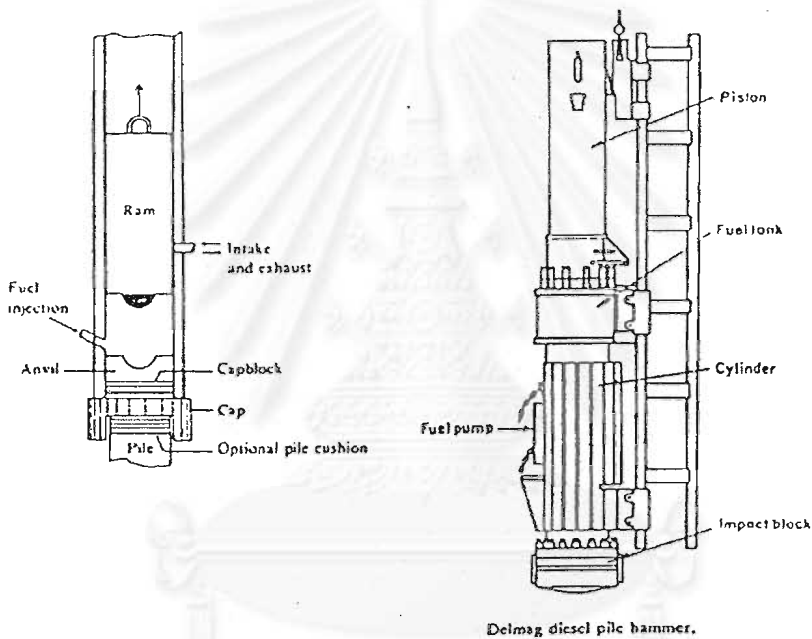
การเลือกใช้เครื่องมือแต่ละชนิดนั้นขึ้นอยู่กับสภาพของดินและขนาดหรือชนิดของเสาเข็ม โดยหลักการนั้นจะใช้หมอนหรือลูกตุ้มตกกระทบบนเสาเข็มที่มี Anvil หรือ Pile cap รองรับเสาเข็ม จะจมได้ง่ายหรือยากนั้นขึ้นอยู่กับน้ำหนักของลูกตุ้มหรือพลังงานที่ให้แก่เสาเข็ม เครื่องตอกเสาเข็มนี้จะยึดติดอยู่กับปั้นจั่น ซึ่งเป็นโครงเหล็กประเภทของเครื่องตอกที่ใช้กันอยู่มีดังนี้

ก. Drop Hammer เป็นการยกลูกตุ้มเหล็กให้สูงขึ้นด้วยลวดสลิงซึ่งได้กำลังจากเครื่องจุดแล้วปล่อยให้ตกอิสระเพื่อกระทบเสาเข็ม โดยมี Pile cap รองรับอยู่ แต่การตอกชนิดนี้จะควบคุมการตอกของลูกตุ้ม ได้ยากและปั้นจั่นต้องสูงพอที่จะยกลูกตุ้มได้ แผนภาพของลูกตุ้มชนิดนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.18



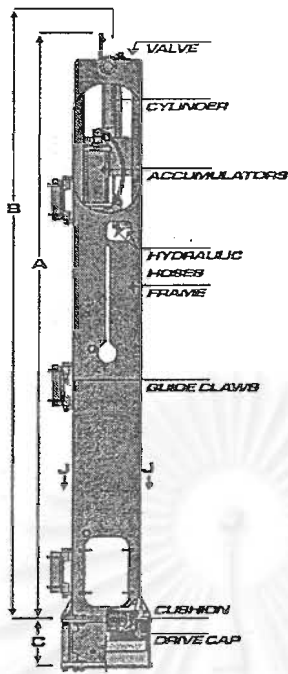
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะลูกตุ้มตอกเสาเข็มแบบ Drop Hammer

ข. Diesel Hammer เป็นการใช้อัดและระเบิดเชื้อเพลิงดีเซลขลุกลูกตุ้มให้สูงขึ้น ขณะเดียวกันก็จะถีบให้เสาเข็มจมลงในดินพร้อมกับการกระแทกของลูกตุ้ม โดยขั้นแรกนั้นจะตอก โดยการขลุกลูกตุ้มให้สูงขึ้นแล้วปล่อยให้ตกลงมาเพื่อเป็นการจุดระเบิดสตาร์ทเครื่องยนต์ให้ทำงาน จะเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากกับดินเหนียวที่แข็งหรือทรายที่แน่นซึ่งระยะเวลาจมของเสาเข็ม มีน้อยหากใช้กับดินที่อ่อน หรือเสาเข็มจมลงในดินมากในการตอกแต่ละครั้งแล้วเครื่องยนต์จะดับ เพราะระยะยกของลูกตุ้มไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการระเบิดของเชื้อเพลิงในครั้งต่อไป จำเป็นต้อง มีการสตาร์ทเครื่องยนต์ใหม่และทำให้การทำงานไม่ค่อยได้ผลเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่น แผนภาพ ของลูกตุ้มชนิดนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19

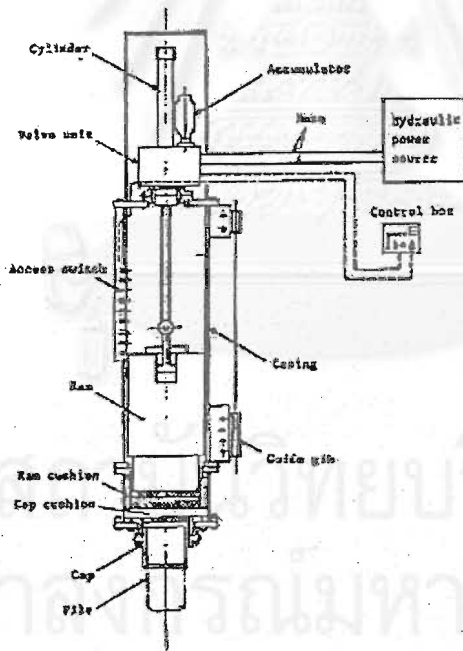


รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะของลูกตุ้มตอกแบบ Diesel hammer

ค. Hydraulic Hammer เป็นเครื่องตอกเสาเข็มที่มีพลังงานในการเร่งโดย Hydraulic oil จากเครื่องสูบลูกสูบและแก๊สความดันสูงเพื่อเพิ่มความเร่งของการกระแทกของการตอกที่ดีกว่า ทำให้ ประสิทธิภาพของการตอกเสาเข็มดีขึ้นเมื่อเทียบกับการตอกอิสระที่น้ำหนักเดียวกันและ Hydraulic Hammer ยังไม่มีผลกระทบทางด้านเสียงรบกวน , การสั่นสะเทือนและไอเสียจากการทำงานซึ่ง เหมาะสำหรับการตอก Sheet pile , Precast concrete , Steel tube pile และ Timber pile แผนภาพของ ลูกตุ้มชนิดนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ก แสดงลักษณะของลูกค้อนตอกแบบ Hydraulic Hammer



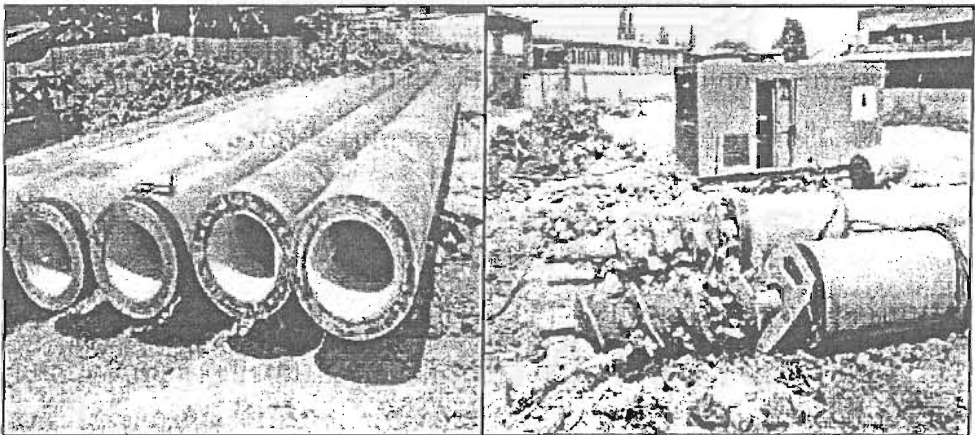
รูปที่ 2.20 ข แสดงลักษณะระบบการทำงานของลูกค้อนตอกแบบ Hydraulic Hammer

2.4.2 Auger Pressed Pile

การตอกเสาเข็มในบริเวณที่ใกล้สิ่งปลูกสร้างที่มีอยู่แล้ว หรือบริเวณที่มีตึกหรือที่อยู่อาศัยอยู่หนาแน่น มักจะพบปัญหา ต้นเสาเหิน เสียขด การเคลื่อนตัวและแรงดันของดิน ที่มีต่อสิ่งปลูกสร้างบริเวณข้างเคียง เพื่อลดปัญหานี้ ในสมัยก่อนจะใช้การก่อสร้างด้วยเข็มเจาะ แต่ในปัจจุบัน Auger Press Pile เป็นหนึ่งในวิธีการก่อสร้างที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้

Auger Press Pile โดยทั่วไปจะใช้ในการติดตั้งกับเสาเข็มคอนกรีตที่มีหน้าตัดกลมวง หรือเสาเข็ม Spun เพื่อที่จะสามารถใช้ส่วนสอดเข้าไปในรูเสาเข็มสำหรับเจาะดินได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.21

เทคนิคการก่อสร้างแบบ Auger Press Pile นี้ เนื่องจากจะต้องเจาะส่วนนำลงไปก่อนเพื่อนำดินจากปลายเสาเข็มขึ้นมา ส่วนในการเจาะส่วนผ่านชั้นทรายจะมีการเติมสารละลายเบนโทไนท์ผสมกับโพลีเมอร์ เพื่อที่จะให้ส่วนสามารถเจาะทรายขึ้นมาได้ ดังนั้นหากทำการ Auger จนถึงปลายเสาเข็มกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเข็ม (End Bearing Capacity) จะลดลงเนื่องจากดินที่ปลายเสาเข็มจะถูกรบกวน และสภาพดินที่ปลายเข็มไม่ได้ถูกอัดตัวให้แน่นมากนัก จึงมีการเพิ่มประสิทธิภาพของกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็มโดยทำการก่อสร้างดังต่อไปนี้

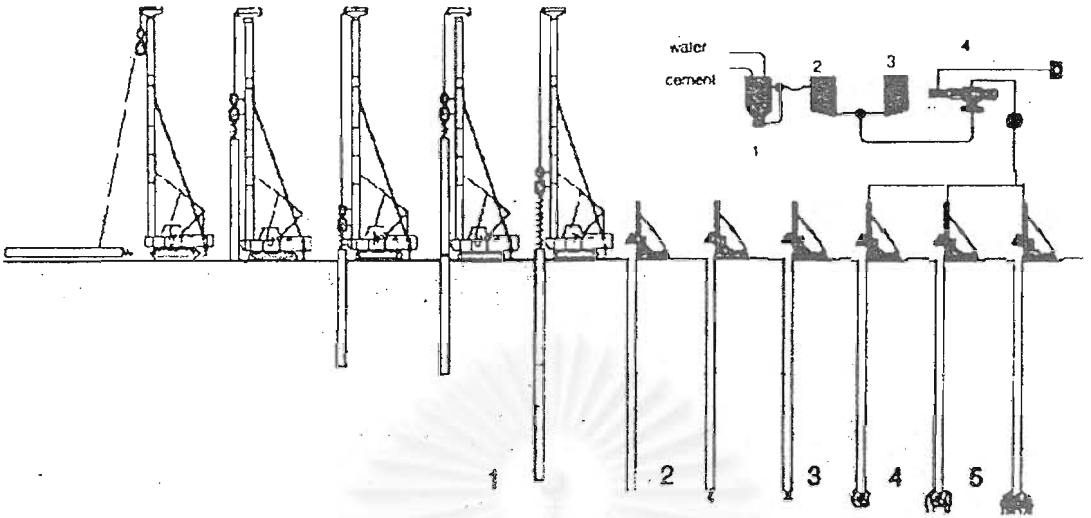


รูปที่ 2.21 แสดงเสาเข็ม Auger press spun pile และการนำดอกสว่านใส่ไว้ในส่วนกลวงของเสาเข็ม เพื่อใช้ในการเจาะดิน

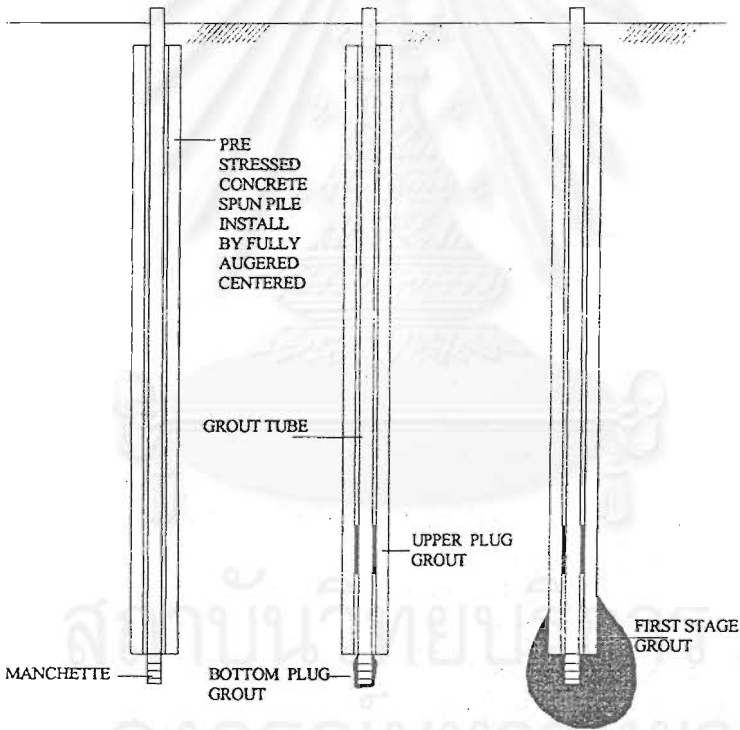
2.4.2.1 Fully Auger with Press into Sand layer ก่อสร้างโดยการเจาะดินด้วยสว่าน และกดเสาเข็มตามสลับกันจนถึงระดับความลึกสุดท้ายที่ต้องการ โดยต้องพยายามควบคุมให้ Auger ถึงปลายชั้นดินเหนียวต่อกับชั้นทราย โดยพยายามมิให้ Auger ถึงชั้นทรายเพื่อป้องกันการไหลขึ้นของน้ำใต้ดินจากนั้นจึงทำการกดเสาเข็มลงไปประมาณ 0.5 ถึง 1.0 เมตร ลงในชั้นทราย เพื่อให้ปลายเข็มจมอยู่ในชั้นทราย เมื่อเอาสว่านออกพร้อมทำการเติมน้ำให้เต็ม (วันชัย 2546)

24.2.2 Auger Press with Final Drive ทำการก่อสร้างโดยวิธี Auger Press ลงไปถึงชั้นดินเหนียวก่อนจะถึงชั้นทรายประมาณ 0.5 ถึง 1.0 เมตร แล้วทำการตอกส่งเสาเข็มลงไปในชั้นทราย โดยการตอกเสาเข็มที่ความลึกสุดท้าย เป็นการเพิ่ม End Bearing ให้เสาเข็ม

2.4.2.3 Full Auger with Pile Toe Grout ทำการก่อสร้างด้วยวิธี Full Auger Press ลงไปในชั้นทรายซึ่งจะเกิดปัญหา Loosening ของ Stress ที่ปลายเสาเข็ม เนื่องจากมีการ Auger รอบวนในชั้นทรายและเกิดการไหลขึ้นของน้ำใต้ดิน (Up lift Piezometric pressure) ทำให้ End Bearing ลดลงอย่างมาก การแก้ปัญหาทำได้โดยการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็ม (Based Grouting) โดยทำการติดตั้ง Casing และท่อฉีดน้ำปูนลงในรูกลางของเสาเข็ม (Inner Core) หลังจากติดตั้งเครื่องมือเสร็จ ทำการฉีดน้ำปูนไปที่ปลายท่อให้เกิด Grout Plug ที่ปลายเสาเข็ม เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของน้ำปูนระหว่างการทำ Grout ครั้งต่อไปโดยใช้น้ำปูนที่มี w / c เท่ากับ 0.6 ประมาณ 140 ลิตร ที่ปลายท่ออัดฉีดน้ำปูน และประมาณ 180 ลิตร ที่ระดับความสูงกว่าปลายเสาเข็ม 2 เมตร หลังจาก Grout Plug แข็งตัวแล้วซึ่งต้องใช้เวลาไม่น้อยกว่า 12 - 24 ชั่วโมง จึงเริ่มการทำ First Stage Grout ด้วยการอัดน้ำด้วยเครื่องอัดฉีดน้ำปูนโดยเพิ่มแรงอัดเพียงเล็กน้อยจนถึงแรงอัดสูงสุดที่สามารถทำให้ Grout Plug แฉก จากนั้นทำการอัดฉีดน้ำปูนที่มี w / c เท่ากับ 0.8 ประมาณ 760 ลิตร ด้วยความดันเพื่อสร้าง Cement Bulb รอบ ๆ ปลายเสาเข็ม เมื่อ First Stage Grout แข็งตัว ทำการอัดน้ำด้วยความดันเข้าไปเพื่อให้เกิดรอยแตกแล้วจึงทำ Second Stage Grout ต่อ โดยการอัดฉีดน้ำปูนที่มี w / c เท่ากับ 0.6 ประมาณ 420 ลิตร ด้วยความดัน ดังแสดงในรูปที่ 2.22 และ รูปที่ 2.23 การทำเช่นนี้จะเสริมความแข็งแรงของ Cement Bulb ที่ปลายของเสาเข็ม และเพิ่มประสิทธิภาพ End bearing ของเสาเข็ม



รูปที่ 2.22 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มด้วยวิธี Fully auger with pile toe grout



1. จะเจาะดินภายในเสาเข็ม $\phi 90$ มม. ถึงระดับต่ำกว่าปลายเสาเข็ม 0.6-0.7 ม.
2. ติดตั้งท่ออัดฉีดยังน้ำปูน หรือผสม อูปลงใน ปลายท่อต่ำกว่า ปลายเสาเข็ม 0.6-0.7 ม.
3. Plug grout w:c ratio = 0.6 จำนวน 140 ลิตร ที่ปลายท่ออัดฉีดยังน้ำปูน และ 180 ลิตร ที่ระดับความสูง กว่ปลายเสาเข็ม 2.0 ม.
4. น้ำปูนแข็งตัว ไม่น้อยกว่า 24 ชม.
5. Post grout อัดฉีดยังน้ำปูน w:c ratio = 0.8 จำนวน 760 ลิตร
6. เปลี่ยนอัตราส่วนผสม w:c ratio = 0.6 0 จำนวน 420 ลิตร

รูปที่ 2.23 แสดงขั้นตอนการทำ Stage grout ที่ปลายเสาเข็ม

2.5 การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Static Pile Load Test)

เป็นการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตามสภาพที่ใช้งานหรือตามความประสงค์อื่น ๆ เช่น หากความแข็งของดิน เสาเข็มที่ทดสอบส่วนมากจะใช้ขนาดและวิธีการก่อสร้างเดียวกันกับที่ใช้งานจริง โดยจะทำการวัดการทรุดตัวของเสาเข็มตามน้ำหนักบรรทุกที่ประเมินไว้ และบางครั้งอาจทำการทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกถึงการพังทลายของดิน แต่ส่วนใหญ่จะทดสอบถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ใช้ในการออกแบบแล้ววัดการทรุดตัวของเสาเข็ม วิธีการทดสอบนั้นมีอยู่หลายวิธีเป็นไปตามการพัฒนาการของเทคโนโลยีในการก่อสร้างเสาเข็ม หากทดสอบในดินเหนียวแล้วจะให้การทรุดตัวที่มีใช้เกิดขึ้นจริงเพราะต้องทิ้งไว้เป็นเวลานานสำหรับ Consolidation Settlement ให้เกิดขึ้นหมด อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์ของการทดสอบ จะต้องอยู่ในข้อใดข้อหนึ่งจากหัวข้อทั้งหมดหัวข้อต่อไปนี้

- ก. เพื่อกำหนดน้ำหนักบรรทุกประลัยที่เสาเข็มรับได้ (Ultimate Pile Capacity)
- ข. เพื่อหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มและการทรุดตัว (Load - Settlement Relationship)
- ค. สามารถประมาณหาแรงต้านทานส่วนปลายและแรงเสียดทานรอบผิวของเสาเข็ม

2.5.1 วิธีการทดสอบเสาเข็ม

การทดสอบเสาเข็มที่ใช้อยู่ แบ่งเป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

- ก. Maintain Load Test จัดอยู่ในประเภท Stress Control
- ข. Constant rate of Penetration จัดอยู่ในประเภท Strain Control

ก. Maintain Load Test (M.L) จัดอยู่ในประเภท Stress Control สามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น Slow Maintain Load Test และ Quick Maintain Load Test ซึ่งจะกล่าวโดยย่อ ดังต่อไปนี้

Slow Maintain Load Test ทำการทดสอบโดยบรรทุกน้ำหนัก 200 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ แบ่งการเพิ่มน้ำหนักเป็น 8 ขั้นเท่า ๆ กัน เมื่อเพิ่มน้ำหนักจนกระทั่งถึง 200 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบแล้ว ให้รักษาน้ำหนักบรรทุกนี้ไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ทำการลดน้ำหนักออกเป็น 4 ขั้นเท่า ๆ กัน ในการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแต่ละขั้นให้รักษาน้ำหนักไว้จนกว่าอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มน้อยกว่า 0.012 นิ้วต่อชั่วโมง หรือรักษาน้ำหนักไว้ 2 ชั่วโมงแล้วแต่อย่างไรจะเกิดก่อน

Quick Maintain Load Test ให้แบ่งขั้นตอนการเพิ่มน้ำหนักเป็น 20 ชั้นเท่า ๆ กันของการทดสอบน้ำหนัก 300 เอร์เซ็นต์ของน้ำหนักออกแบบ (แต่ละชั้น 15 เอร์เซ็นต์) และให้รักษาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นแต่ละชั้นนาน 15 นาที จดบันทึกการทรุดตัวทุก ๆ 3 นาที จะใช้เวลาในการทดลองจนแล้วเสร็จประมาณ 3 ถึง 5 ชั่วโมง

Fellini (1975) แนะนำการทดสอบแบบ Quick Maintain Load Test มีวัตถุประสงค์เพื่อการทำ Proof Test โดยแบ่งการเพิ่มน้ำหนักเป็น 16 ชั้นเท่า ๆ กันของ 250 เอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกใช้งาน น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นให้รักษาไว้นาน 15 นาที หลังจากนั้นให้ลดน้ำหนักลงทันทีทันใดและจดบันทึกค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเมื่อน้ำหนักอยู่ที่ 200, 150, 100, 50 เอร์เซ็นต์และ 0

ข. การทดสอบแบบ Constant rate of Penetration (CRP) จัดอยู่ในประเภท Strain Control ซึ่ง Whitaker (1957) สรุปการทดสอบเสาเข็มแบบ CRP นี้ว่า พฤติกรรมของดินรอบเสาเข็มที่ถูกกดดัน (Stress) ภายใต้ Constant rate of Strain จะมีลักษณะคล้ายกับ Quick Shear Test ของดินในห้องทดลอง ระยะเวลาที่ใช้ทดสอบเสาเข็มจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate Bearing Capacity) จะใกล้เคียงกับการทดลอง Quick Shear Test จากการทดสอบที่ผ่านมา พบว่าเสาเข็มในชั้นดินเหนียวใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 10 นาที และใช้เวลาถึง 1 ชั่วโมง สำหรับเสาเข็มในชั้นดินทราย เนื่องจาก Mobilization ของ Deformation ต้องมากกว่า เพราะการ Develop End Bearing

Whitaker (1970) สรุปว่าค่าอัตราการจม (Rate of Penetration) ประมาณ 0.75 มิลลิเมตรต่อนาที ทดสอบเสาเข็มรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวจะถึงจุดพิบัติเมื่อค่าการทรุดตัวไม่เกิน 25 มิลลิเมตร ส่วนเสาเข็มรับน้ำหนักที่ปลาย (End Bearing Pile) ในชั้นทรายและกรวด จะมีการทรุดตัวเกิดขึ้นมาก ให้ใช้ค่าอัตราการจมประมาณ 1.5 มิลลิเมตรต่อนาที หรือมากกว่านี้

Whitaker (1970) กล่าวเพิ่มเติมว่า การทดสอบเสาเข็มแบบ CRP Test บอกแต่เพียงค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate Bearing Capacity) ของเสาเข็มเท่านั้น ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัว ไม่ได้แสดงถึงความสมดุลระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัว (Equilibrium Relation of load and settlement) ฉะนั้นค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกใช้งาน (Working Load) จะประมาณจากการทดสอบแบบ CRP ไม่ได้ ค่าการทรุดตัวแบบ CRP นี้จะน้อยกว่าการทดสอบแบบ Maintain Load เนื่องจากไม่ได้ทิ้งช่วงเวลาสำหรับการทรุดตัวแบบ Plastic settlement ของแต่ละชั้นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก ซึ่งเป็นข้อเสียของการทดสอบเสาเข็ม

ด้วยวิธี CRP Test แต่อย่างไรก็ตาม ทำให้เราสามารถทราบว่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate Bearing Capacity) ของเสาเข็มได้ในเวลาอันรวดเร็ว แล้วลดน้ำหนักส่วนที่เพิ่มนั้นออก กลับไปที่น้ำหนักเดิมก่อนหน้านั้น ทิ้งไว้ 20 นาที

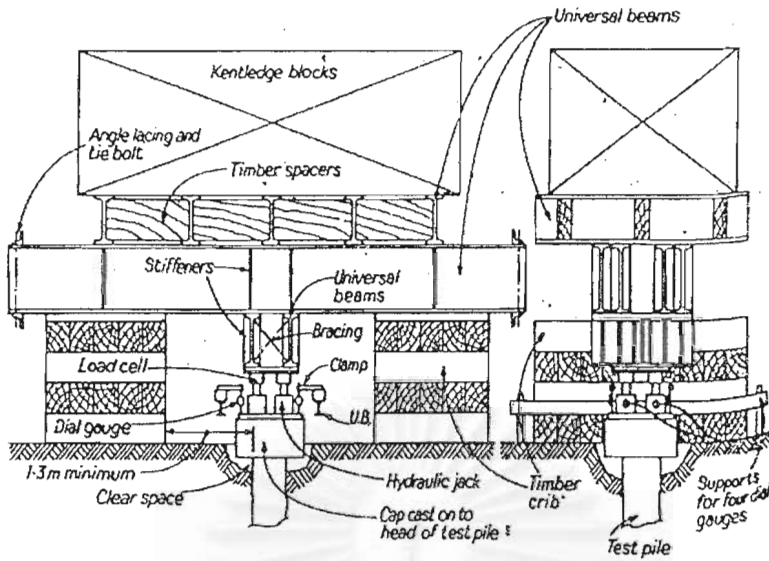
2.5.2 การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบเสาเข็ม

การทดสอบเสาเข็ม CRP และ ML Test ใช้ระบบในการให้น้ำหนักแบบเดียวกัน โดยอาจแบ่งตามประเภทการให้น้ำหนักได้เป็น 2 ระบบดังนี้

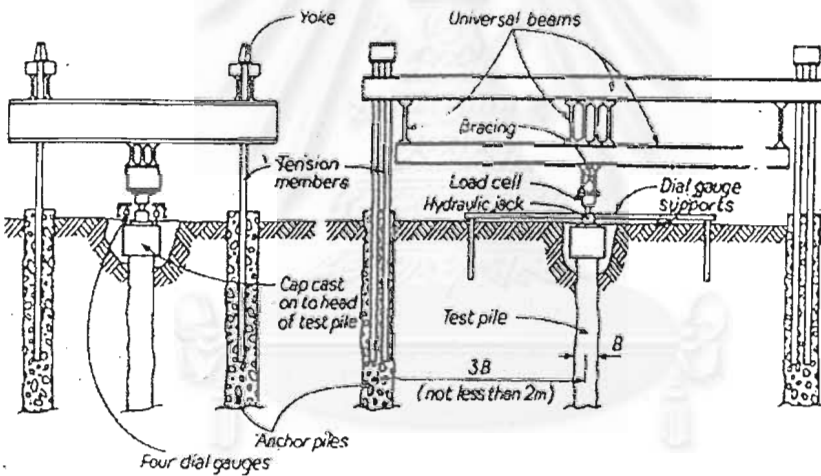
ระบบที่ 1 (Kentledge Method) เป็นระบบให้น้ำหนักด้วยแม่แรงโดยมีโครงเหล็กบรรทุกน้ำหนักเป็นตัวขึ้น โครงเหล็กตัวขึ้นมีลักษณะเป็นสะพานพาดข้ามหัวของเสาเข็มและวางอยู่บนไม้หมอนซึ่งเป็นที่รองรับชั่วคราวขณะที่แม่แรงยังไม่ทำงาน ไม้หมอนนี้จะต้องมีพื้นที่ผิวสัมผัสดินเพียงพอสำหรับการกระจายน้ำหนักไม่ให้เข็มขึ้นเกินกำลังของดินที่รองรับอยู่ น้ำหนักสำหรับขึ้นหัวแม่แรงปกตินิยมใช้แท่งเหล็กหรือแท่งคอนกรีตหลายๆ แท่ง ในบางครั้งเพื่อความสะดวกในการขนถ่ายน้ำหนักอาจใช้น้ำบรรจุใส่ถังเหล็กเพื่อใช้เป็นน้ำหนักขึ้นหัวแม่แรงได้ น้ำหนักที่กล่าวมานี้ไม่ใช่ตัวให้แรงในเสาเข็ม แรงที่กระทำบนเสาเข็มจริงๆ นั้นเกิดจากกำลังของแม่แรงไฮดรอลิกซึ่งติดตั้งไว้บนหัวของเสาเข็ม โดยตรงพร้อมกับมีเกอสำหรับวัดการ ทรุดตัวระหว่างเวลาที่แม่แรงทำงาน ในบางครั้ง แรงดันของแม่แรงอาจจะสูงมากพอๆ กับน้ำหนักของโครงเหล็กที่บรรทุกน้ำหนักอยู่เต็ม ดังนั้นจะต้องแน่ใจว่าแม่แรงไม่ถูกใช้งานเกินกว่าน้ำหนักที่กดแม่แรงไว้

ระบบที่ 2 เป็นระบบที่ใช้เข็มสมอยึดคานกดหัวแม่แรง ระบบการให้น้ำหนักแก่เสาเข็มแบบนี้เหมือนกับระบบที่ 1 คือใช้แม่แรงแต่ต่างกันที่ระบบนี้ใช้สมอเป็นเครื่องยึดคานกดหัวแม่แรง แทนที่จะใช้น้ำหนักวางไว้บนคานสมอนี้โดยปกติทำด้วยเสาเข็มธรรมดาขนาดโตพอต้านทานแรงดึงได้ และฝังอยู่สองข้างของเสาเข็มที่ต้องการทดสอบ โดยมีระยะห่างกันพอสมควรระหว่างเสาเข็มสมอ 2 ชุดนี้มีคานแข็งแรงพาดอยู่เหนือหัวของเสาเข็มที่ต้องการทดสอบ ปลายสุดทั้งสองของคานนี้ผูกติดกับเสาเข็มสมออย่างมั่นคง

ปกตินิยมใช้เครื่องมือวัดแรง เช่น Load Cell หรือ Proving Ring ถ้าการวัดนี้เป็นไปไม่ได้ แรงดันของแม่แรงอาจจะคำนวณหาได้จากความดันไฮดรอลิกของน้ำมันในแม่แรง แต่เพื่อความถูกต้อง เกจความดันของแม่แรงควรจะได้รับ การкалиเบรทกับเครื่องทดสอบวัสดุ รูปแสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบทั้ง 2 ระบบแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ก การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบ Static Load Test ระบบที่ 1



รูปที่ 2.24 ข การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบ Static Load Test ระบบที่ 2

2.5.3 การแปลผลการทดสอบเสาเข็ม เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

จากผลของการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ผลที่ได้คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกบนเสาเข็มและการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ดังนั้นการที่จะหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุด หรือ ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ จึงเป็นวิธีการที่มีหลากหลายและจะทำให้ได้ผลที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำการศึกษาในที่นี้

สำหรับการพิจารณาหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ โดยปกติจะหมายถึง การพิบัติในดิน ซึ่งมีหลักเกณฑ์แตกต่างกันดังนี้ (Chun, 1992)

1. กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ถูกกำหนดโดย ลักษณะปัดลงหรือเคลื่อนที่ลง โดยเร็วของเสาเข็ม โดยทั่วไปแล้วเสาเข็มจะเป็นวัสดุที่แข็งแรงกว่าดิน เมื่อเราทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักจนถึงจุดพิบัติ คือจุดที่ค่าการทรุดตัวจะมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ภายใต้การเพิ่มน้ำหนักเพียงเล็กน้อย หรือไม่เพิ่มน้ำหนักเลย อย่างไรก็ตามข้อกำหนดนี้ก็ยังไม่เป็นที่ยอมรับมากนัก เพราะลักษณะการปัดลง ไปของเสาเข็มนั้นต้องรอให้มีค่าการทรุดตัวที่มากจึงจะสามารถค่าน้ำหนักประลัยได้

2. กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ถูกกำหนดจากค่าการทรุดตัว โดยไม่คำนึงถึงกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม โดยกำหนดจากค่าน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เสาเข็มทรุดตัวเท่ากับ 10% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง สำหรับเสาเข็มตอก และเท่ากับ 25% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง สำหรับเสาเข็มเจาะ

3. กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ถูกกำหนดโดยการตัดกันของเส้นตรง 2 เส้นบนกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม บางครั้งค่าของกำลังประลัยถูกกำหนดที่จุดตัดของเส้นตรงสองเส้น เป็นการตัดกันของเส้นตรงในส่วน Pseudo - Elastic ส่วนตัดกันบนกราฟความสัมพันธ์ การตีความของข้อกำหนดนี้ขึ้นอยู่กับ การตัดสินใจของผู้นำไปใช้ และถ้าเปลี่ยนมาตราส่วนของกราฟ ค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยก็จะถูกเปลี่ยนไปด้วย

4. กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ที่ใช้สมการทางคณิตศาสตร์แทนเส้นกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็ม การที่จะเลือกใช้ข้อกำหนดของน้ำหนักที่เกิดการพิบัติจะต้องขึ้นกับความถูกต้องของสมการ และสามารถนำสมการนั้นไปใช้อย่างกว้างขวางและไม่ขึ้นกับมาตราส่วนของกราฟความสัมพันธ์ ต้องไม่คำนึงถึงความยาวของเสาเข็ม ถ้าใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เหมาะสมกับสภาพปัจจัยต่าง ๆ ของเสาเข็ม เช่น การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็ม ชนิดของเสาเข็ม ประเภทของดินที่ปลายเข็มแล้ว การหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดก็就会有ความผิดพลาดสูงมาก

ได้มีผู้ศึกษา วิเคราะห์รวบรวมออกมาเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุก และค่าการทรุดตัวที่เป็นสาเหตุมาจากการพิบัติที่แตกต่างกันของเสาเข็มในรูปแบบที่ 2.25 โดยแต่ละรูปแบบแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุก และค่าการทรุดตัวต่าง ๆ กันตามสภาพกำลังรับ

แรงเฉือนของดินรอบเสาเข็ม และกำลังต้านทานของชั้นดินที่ปลายเสาเข็ม โดยมีสภาพปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ (Kenzdi อ้าง โดย Winterkorn และ Fang, 1975)

ลักษณะที่ 1 แสดงถึงเสาเข็มตอก (ไม้, คอนกรีตอันแรง) ที่มีปลายเสาเข็มวางอยู่บนชั้นดินแข็งมาก (หิน) ชั้นดินโดยรอบผิวเสาเข็มเป็นดินอ่อนมาก ไม่สามารถเป็นแรงต้านด้านข้างได้ จะเกิดการพิบัติแบบ Bucking หลังจากรับแรงกดจะมีพฤติกรรมคล้ายกับเสาชะลูด (Slender Column) น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะถูกกำหนดได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (1)

ลักษณะที่ 2 เป็นรูปแบบของเสาเข็มที่ปักลงผ่านชั้นดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ และวางปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนสูง โดยไม่มีชั้นดินอ่อนอยู่ที่ปลายเสาเข็ม เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นจะเกิดการพิบัติแบบ General Shear Failure เฉพาะที่ชั้นดินปลายเสาเข็ม โดยจะเกิดการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยในชั้นดินรอบเสาเข็ม จึงเกิดการพัฒนากำลังรับแรงเสียดทานได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัวคล้ายกับฐานรากแบบตื้นที่วางตัวอยู่บนชั้นดินแน่น ดังในรูปที่ 2.25 (2)

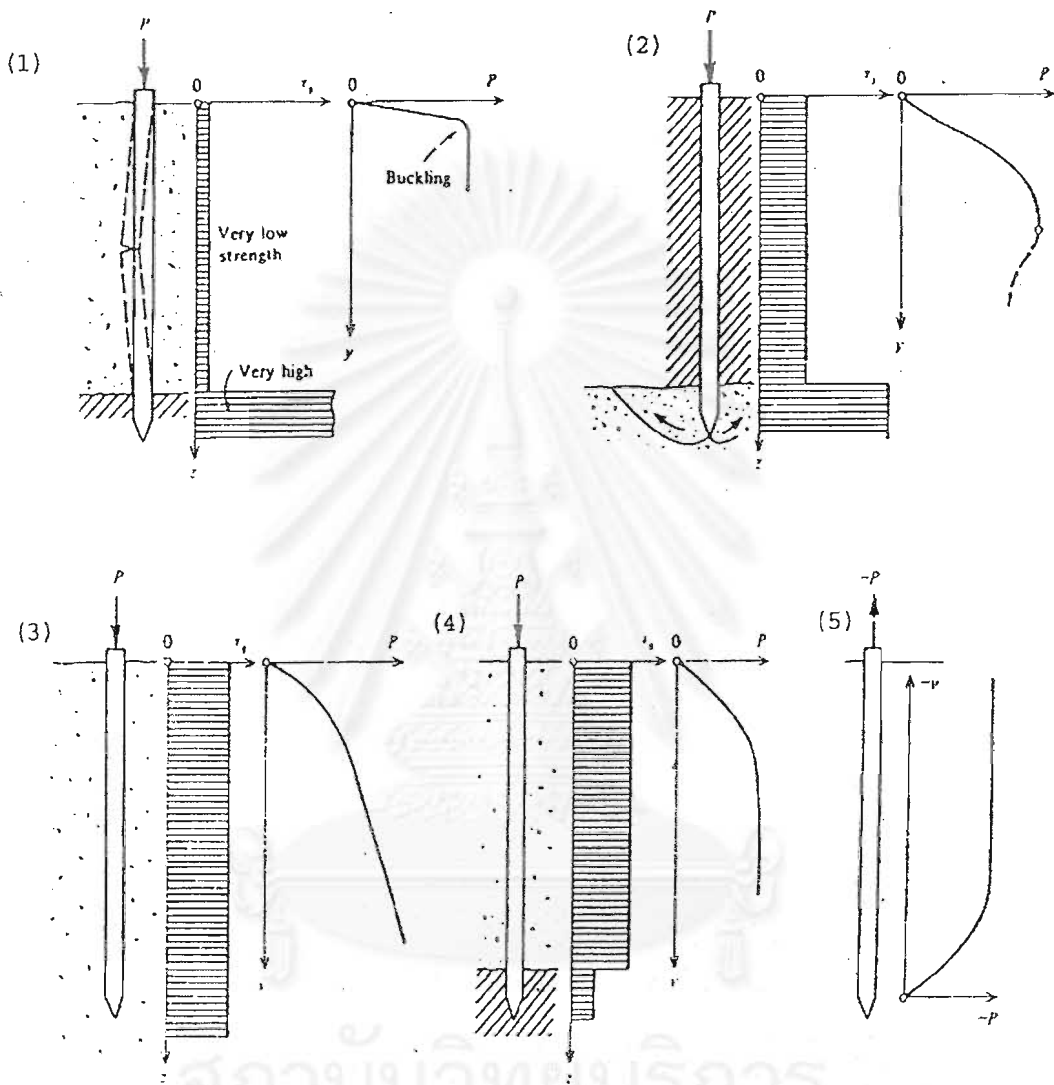
ลักษณะที่ 3 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินโดยรอบเสาเข็ม ค่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ ดังนั้นจะเกิด Punching Failure รูปแบบกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัวจะไม่เป็นเส้นในแนวโค้ง ดังนั้น ค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติไม่สามารถกำหนดได้อย่างชัดเจน แสดงในรูปที่ 2.25 (3) รูปแบบนี้ถูกพิจารณาว่าน้ำหนักบรรทุกถูกต้านทานด้วยแรงเสียดทานที่ผิว และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มเท่า ๆ กัน

ลักษณะที่ 4 ไม่ใช่รูปแบบทั่ว ๆ ไปของเสาเข็ม ชั้นดินที่ปลายเสาเข็มมีกำลังอ่อนกว่าชั้นดินโดยรอบเสาเข็ม ดังนั้น น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดจึงถูกต้านทานโดยแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มเพียงอย่างเดียว รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัวที่จุดพิบัติจะมีรูปแบบเป็นเส้นแนวโค้ง ซึ่งเป็นจุดที่แรงเสียดทานถูกพัฒนาเต็มที่แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (4)

ลักษณะที่ 5 เป็นเสาเข็มรับแรงดึง ที่แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มถูกพิจารณาเป็นศูนย์และรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัวมีพฤติกรรมเหมือนกับในลักษณะที่ 4 แต่มีพฤติกรรมของ Heave เกิดขึ้น

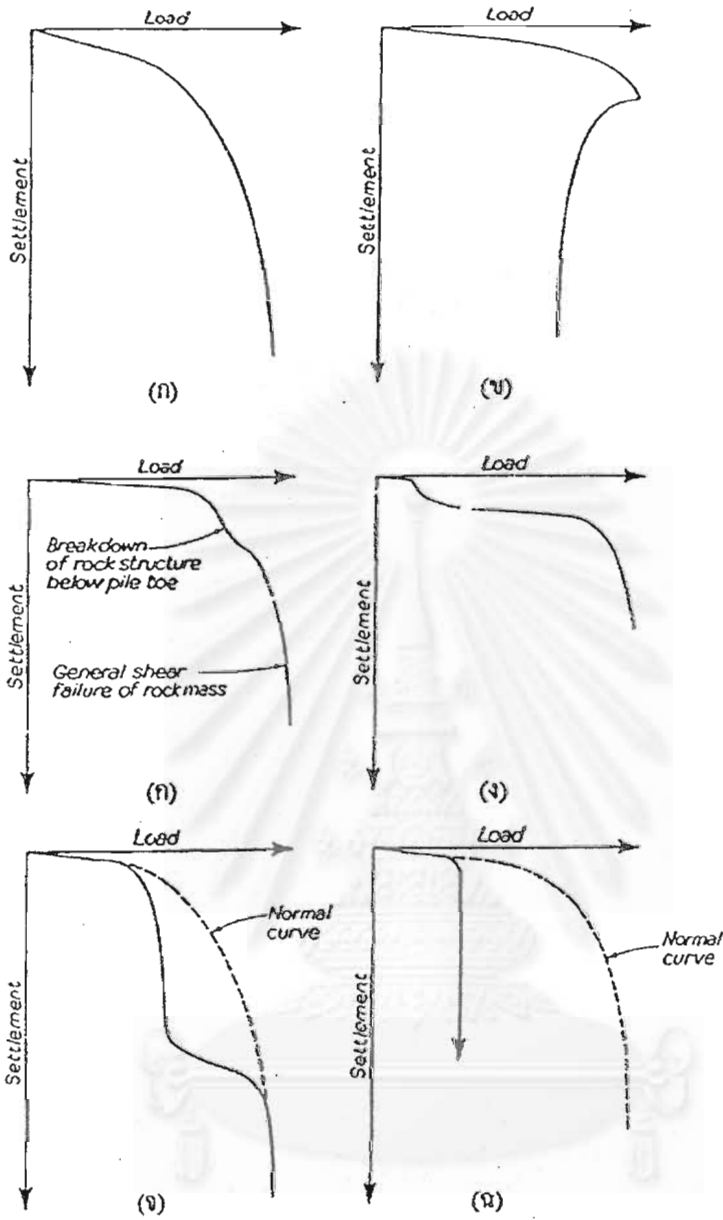
ถ้าเราพิจารณารูปแบบกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็ม อาจกล่าวได้ว่า รูปแบบการพิบัติของปลายเสาเข็ม (End Bearing) มีอิทธิพลต่อรูปแบบการพิบัติของเสาเข็มจากประสบการณ์ การศึกษารูปแบบกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับค่า

การทรุดตัวจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม สามารถแยกแยะเป็นรูปแบบทั่วไปของพฤติกรรมการรับน้ำหนักตามสภาพปัจจัยโดยรอบเสาเข็ม ซึ่งมีรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.26



- (1) Buckling ในชั้นดินอ่อนมารอบเสาเข็ม
- (2) General Shear Failure ในชั้นดินแข็งที่ปลายเสาเข็ม
- (3) การพืดของเสาเข็มในชั้นดินที่มีกำลังต้านทานสม่ำเสมอตลอดความยาวเสาเข็ม
- (4) เสาเข็มที่มีแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มเป็นหลักเนื่องจากวางปลายเสาเข็มในชั้นดินอ่อน
- (5) เสาเข็มรับแรงดึง

รูปที่ 2.25 รูปแบบการพืดของเสาเข็มตามลักษณะความแข็งแรงของชั้นดิน (Winterkorn & Fang , 1975)



- ก) เสาเข็มรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวอ่อนหรือทรายหลวม
 ข) เสาเข็มมีแรงเสียดทานในชั้นดินดาน
 ค) เสาเข็มที่มีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นหินปูน
 ง) เสาเข็มที่ถูกน้ำหนักรรทุกันให้ปลายเสาเข็มที่วางอยู่บนชั้นที่วางอยู่บนชั้นหินแข็งทะลุไปสู่ชั้นหินใหม่
 จ) เสาเข็มที่มีช่องว่างเกิดขึ้นที่ผิวเสาเข็ม
 ฉ) เสาเข็มที่มีกำลังคอนกรีตต่ำ จะถูกเฉือนโดยน้ำหนักรรทุกทดสอบ

รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักรรทุกและการทรุดตัวในรูปแบบสภาวะต่าง ๆ

(Tomlinson, 1994)

2.6 ผลกระทบต่อสภาพชั้นดินเนื่องจากการติดตั้งเสาเข็ม

เมื่อพิจารณาสภาพชั้นดินโดยรอบเสาเข็มที่ทำการติดตั้งไม่ว่าจะด้วยวิธีเจาะหรือตอกลงไป จะมีผลทำให้ดินโดยรอบเกิดเหตุพิบัติ เสาเข็มจึงยังไม่สามารถรับน้ำหนักได้ในทันทีที่ติดตั้งเสร็จ หลังจากนั้นจะต้องรออยู่ช่วงระยะเวลาหนึ่ง เพื่อให้ชั้นดินโดยรอบเสาเข็มพัฒนากำลังรับแรงเฉือน จากนั้นจึงจะทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มได้ ซึ่งจะใช้เวลาทำการทดสอบในช่วง 1-3 วัน ด้วยเหตุนี้การเคลื่อนตัวของดินรอบเสาเข็มจะเกิดในสภาพที่ไม่มีภาระขยับน้ำ ออกจากมวลดินขณะทำการทดสอบ (Undrained Deformation) แต่ในระหว่างที่เสาเข็มรับน้ำหนักใช้งานจากอาคาร จะถ่ายหน่วยแรงที่ละน้อย ๆ และค่อย ๆ เพิ่มมากขึ้นในขณะทำการก่อสร้าง จนกระทั่งน้ำหนักทั้งหมดถูกถ่ายลงสู่เสาเข็มเมื่อทำการก่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วพร้อมกับมีการทรุดตัวเกิดขึ้นในชั้นดิน ซึ่งเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างนี้อาจจะนานหลายเดือนหรือเป็นปี จึงทำให้น้ำในมวลดินระบายออกได้ทัน ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกในการใช้งานจริงจึงมีค่าสูงกว่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบในสนาม

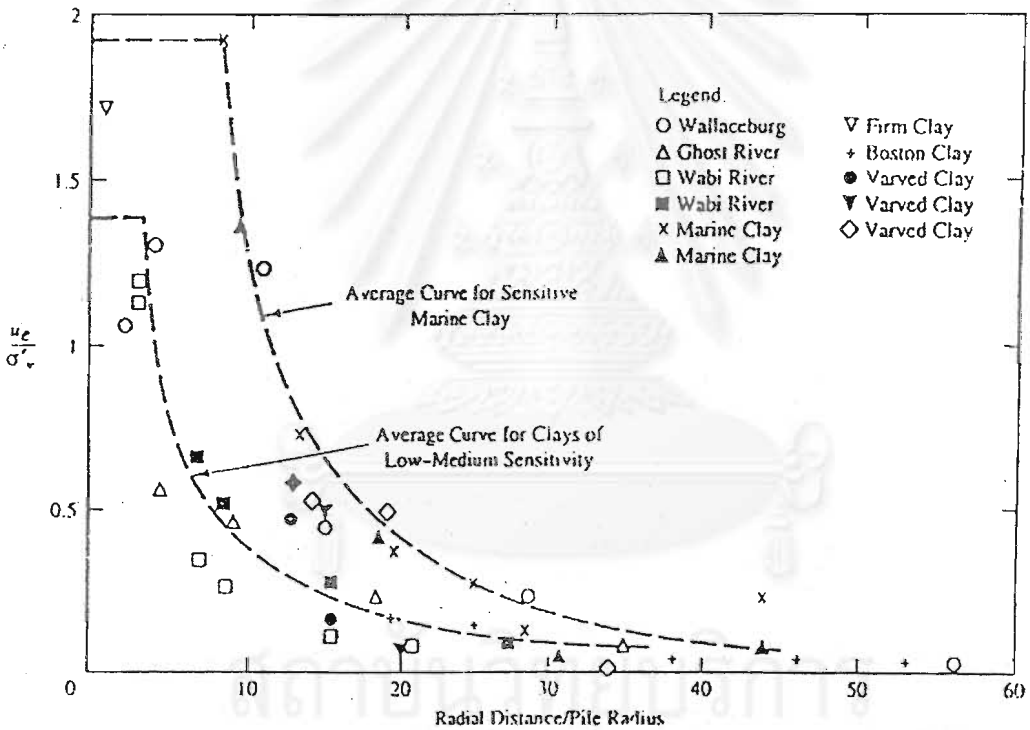
2.6.1 ผลกระทบของการติดตั้ง เสาเข็มในชั้นดินเหนียว

ในสภาพของดินเหนียว (Cohesive soil) ขณะถูกเสาเข็มแทนที่ลงไป ชั้นดินเหนียวจะมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไป ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมกรรับน้ำหนักของเสาเข็มขณะทดสอบ และมีผลต่อการแปลผลการทดสอบ โดยชั้นดินเหนียวมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงที่น่าสนใจดังนี้

ก. การเคลื่อนตัวแบบแรงเฉือน (Distortion) เมื่อเสาเข็มถูกตอกลงไปชั้นดินสภาพดินภายใต้เสาเข็มจะถูกอัดตัวออก ทำให้เกิดแรงเฉือน และการเคลื่อนตัวแบบเฉือนในชั้นดิน (Compressive distortions) เกิดผลของการเคลื่อนตัวของดิน โดยรอบของเสาเข็มเมื่อถูกตอกลงไปชั้นดิน และจะเกิดการเคลื่อนตัวแบบเฉือนที่มากในเสาเข็มแทนที่ดิน เช่น Close - End steel pipe piles Cooks และ Price (1973) ได้ทำการสังเกตการเกิดการบิดตัวนี้ใน London Clay ของการตอกเสาเข็ม Close - End Pipe ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 นิ้ว (168 มม.) ชั้นดินโดยรอบเสาเข็มห่างจากตัวเสาเข็มภายในรัศมี 1.2 ของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม ถูกลากลงข้างล่างขณะที่ชั้นดินที่ห่างออกไป 1.2 และ 9 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางจะเคลื่อนตัวขึ้น การรบกวนชั้นดินเหนียวนี้จะทำให้ดินเหนียวมีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปและจะมีค่า Residual Strength ลดลง เทคนิคการวิเคราะห์ในปัจจุบันจะใช้ค่า Peak strength ในการวิเคราะห์ ซึ่งถือได้ว่าเมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์โดยใช้ Peak Strength และ Residual Strength พบว่า การใช้ Residual Strength อาจจะให้ค่าที่เหมาะสมกว่า แต่ยังไม่ใช่วิธีที่สมบูรณ์ที่สุด (Coduto, 1994)

ข. แรงกด และแรงดันน้ำส่วนเกิน (Compression and Excess Pore water Pressure)

การตอกเสาเข็มเป็นการกดอัดดินให้แนบประชิดกับตัวเสาเข็ม ถ้าบริเวณโดยรอบเสาเข็มเป็นดินเหนียวอิมตัว การกดอัดนี้จะทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินจำนวนมาก อัตราส่วนของแรงดันน้ำส่วนเกิน u_e กับแรงดันประสิทธิผลของดินในแนวตั้ง σ'_v อาจสูงถึง 1.5 ถึง 2.0 ที่บริเวณรอบ ๆ เสาเข็ม และจะมีค่าลดน้อยลงอย่างสม่ำเสมอจนเป็นศูนย์ที่ระยะห่าง 30 ถึง 40 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 2.27 แรงกดอัดจะมีค่ามากที่สุดบริเวณใกล้กับปลายเสาเข็ม โดยค่า u_e / σ'_v บริเวณปลายเข็มอาจสูง 3 ถึง 4 (Airhart et al, 1969 อ้างโดย Poulos and Davis 1980) ค่าแรงดันน้ำที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วนี้มีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้ง่ายในการตอกเสาเข็มยิ่งขึ้น แต่ก็ยังมีผลให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มมีค่าต่ำมากในช่วงระยะเวลาหนึ่งภายหลังการติดตั้ง



รูปที่ 2.27 ผลการตรวจวัดแรงดันน้ำส่วนเกิน, u_e ในดินรอบ ๆ เสาเข็มตอกเดี่ยวในชั้นดินเหนียว (Poulos & Davis, 1980)

สถานะของแรงดันน้ำส่วนเกินนี้จะเป็นสถานะชั่วคราวเท่านั้น เพราะน้ำในมวลดินจะพยายามระบายแรงดันน้ำออกไปตามแนวรัศมีของเสาเข็มจนแรงดันน้ำนั้นกลับไปสู่สถานะ Hydrostatic ทำให้ชั้นดินเกิดสภาพ Thixotrophy และ Consolidation ทำให้ชั้นดินเหนียวมีกำลังต้านทานเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถตั้งข้อสังเกตได้ว่า หลังจากที่ทิ้งช่วงการตอกเสาเข็มไว้ประมาณ 2 วัน แล้วจึงมาทำการตอกเสาเข็มใหม่อีกครั้ง จะทำให้ค่าจำนวนครั้งของการตอก (blow / ft) เพิ่มขึ้นอยู่

ช่วงระยะเวลาหนึ่ง เราเรียกพฤติกรรมของเสาเข็มที่มีการพัฒนากำลังขึ้นนี้ว่า Set up หรือ Freeze จนการตอกทำให้ชั้นดินมีสภาพของแรงดันน้ำส่วนเกินโดยรอบผิวเสาเข็มสูงขึ้นเท่าเดิมหรือกล่าวได้ว่าชั้นดินรอบผิวเสาเข็มเกิดการบีบอัด จึงทำให้จำนวนครั้งของการตอก (blow / ft) มีค่าเท่าเดิมก่อนทำการหยุดตอกครั้งก่อน

ค. การสูญเสียผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดิน ในระหว่างการตอกเสาเข็มจะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างเสาเข็มและดิน ซึ่งในชั้นดินเหนียวอ่อนช่องว่างนี้ จะถูกแทรกตัวให้เต็มได้ในเวลาต่อมา โดยเสาเข็มจะมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักดังในรูปที่ 2.26c แต่ในชั้น Stiff Clay จะไม่เกิดการแทรกตัวนี้หรือเกิดขึ้นช้ามาก ซึ่งในสูตรคำนวณจะมีค่าความสัมพันธ์ของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Adhesion Factor) เป็นตัวปรับแก้ให้กับพื้นที่ช่องว่างโดยใช้คูณกับหน่วยแรงเฉือนของดินในชั้น Stiff Clay ให้มีค่าต่ำลง

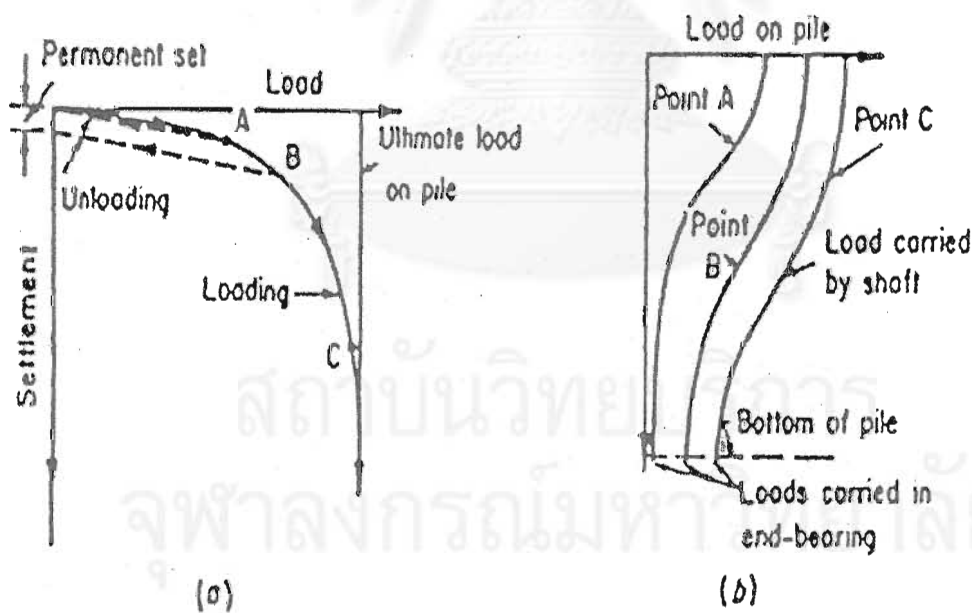
2.6.2 ผลกระทบของการติดตั้งเสาเข็มที่มีต่อชั้นทราย

อิทธิพลของฐานรากเสาเข็มที่มีต่อ (Cohesionless Soil) ชั้นทรายหลวมอัดตัวที่ถูกกดอัดจากการตอกเสาเข็มทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในชั้นทราย แรงดันน้ำนี้สามารถจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคุณสมบัติทางด้านความซึมน้ำค่อนข้างสูง จึงทำให้เสาเข็มพัฒนากำลังรับน้ำหนักเต็มประสิทธิภาพได้เกือบทันทีทันใด ภายหลังจากการตอกเสาเข็ม และในขณะเดียวกัน การเบียดชิดตัวกันของเม็ดดินสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อตอกเสาเข็มผ่านชั้นทรายแน่นทำให้เกิด negative excess pore water pressure ขึ้นชั่วคราว ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของทรายสูงขึ้น มีผลให้การตอกเสาเข็มยากขึ้นด้วย โดยเฉพาะวิธีการตอกเสาเข็มที่ใช้ความถี่สูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเราสนใจที่จะศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็มในชั้นทราย พบว่าการกดอัดและการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มทำให้เม็ดทรายอัดเรียงตัวกันใหม่มีความแน่นมากขึ้น ในทรายหลวมจะทำให้ทรายแน่นขึ้นได้จากการตอกเสาเข็ม ซึ่งในบางครั้งการตอกเสาเข็มลงไปชั้นทรายแน่นอาจจำเป็นต้องทำการเจาะนำหรือฉีดพ่น นำลงไปก่อนบางส่วนหรือตลอดความยาวเสาเข็มเพื่อติดตั้งเสาเข็มลงในชั้นทราย

2.7 พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

2.7.1 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ลงเพื่อถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มลงบนชั้นดินฐานราก

เมื่อมีน้ำหนักมากระทำกับเสาเข็มในแนวตั้ง เสาเข็มจะมีการทรุดตัวเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.28 เมื่อมีน้ำหนักน้อย (จุด A) การทรุดตัวจะเกิดน้อยมาก และเกือบทั้งหมดจะเป็นการทรุดตัวแบบ อีลาสติกของตัวเสาเข็ม น้ำหนักจะถูกรับโดยแรงเสียดทานรอบ ๆ เข็ม (Friction Capacity) เกือบทั้งหมดในระยะนี้หากเอาน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มออก เสาเข็มจะคืนตัว (Rebound) จนเกือบเท่าเดิม ต่อมาเมื่อเพิ่มน้ำหนักมากขึ้น (จุด B) การทรุดตัว จะเพิ่มเร็วขึ้น ซึ่งเห็นว่ากราฟมีความชันเพิ่มขึ้น หากเอาน้ำหนักบรรทุกออก เสาเข็มจะคืนตัวไม่หมดและเกิดการทรุดตัวแบบถาวร (Permanent set) ที่ระยะนี้น้ำหนักกระทำจะถูกรับไว้ได้โดยแรงเสียดทานรอบ ๆ เข็มและแรงต้านทานที่ปลายเข็ม (End bearing) บางส่วน เพื่อเพิ่มน้ำหนักขึ้นจนเกือบถึงจุดประลัย (จุด C) การเพิ่มน้ำหนักเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และกำลังต้านทานจากแรงเสียดทานจะน้อยลงกว่าตอนยังไม่ถึงจุดประลัย โดยเฉพาะที่บริเวณใกล้ ๆ ปลายเข็มเนื่องจากเสาเข็มที่มีการเคลื่อนตัวมาก

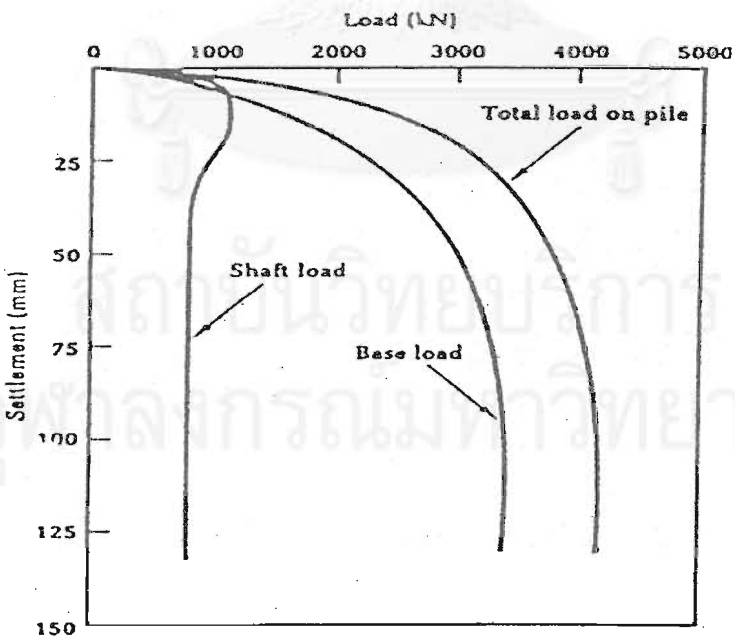


Effects of loading a pile. (a) Load-settlement curve. (b) Strain gauge readings on pile shaft.

รูปที่ 2.28 แสดงพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

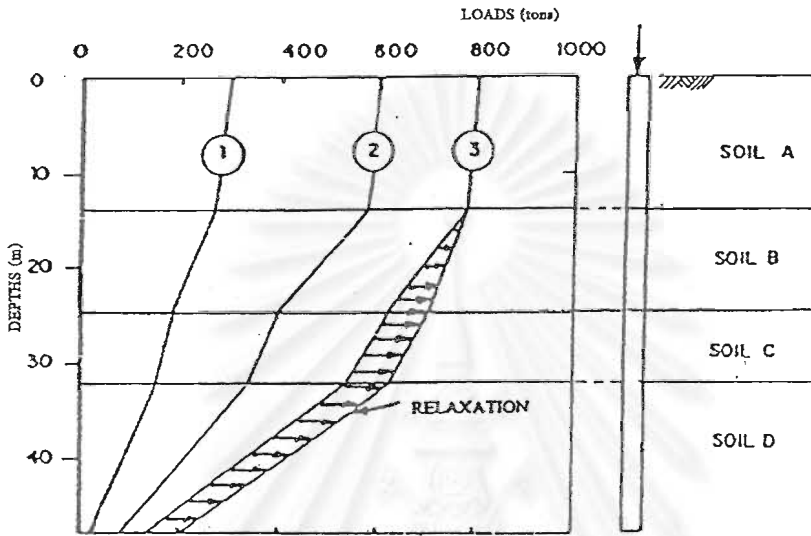
โดยทั่วไปแล้ว การเคลื่อนที่ที่เป็นสาเหตุจากคุณสมบัติทางด้านอีลาสติก มีค่าเพียงพอที่จะทำให้เกิดการพัฒนากำลังของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม ส่วนแรงด้านทานที่ปลายจะถูกพิจารณา เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ลงมากกว่า 10% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มตอก และอาจถึง 30% ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มเจาะ (Carrol, 1987) เนื่องจากเสาเข็มตอก สภาพดินที่ปลายเสาเข็มจะถูกอัดตัวให้แน่นในกระบวนการตอกมากกว่ากระบวนการเจาะเสาเข็ม เพราะฉะนั้นเสาเข็มตอกจะเคลื่อนตัวน้อยกว่าเสาเข็มเจาะในการเคลื่อนตัวจนถึงจุดพิบัติ การที่เสาเข็มมีแรงด้านทานที่ผิวจนเต็มกำลัง จำเป็นที่จะต้องเกิดการเคลื่อนที่ลงระยะหนึ่ง ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนที่ลงที่จะต้องใช้ในการพัฒนาจนถึงแรงด้านทานสูงสุดที่ปลายเข็ม กำลังด้านทานที่ผิวเสาเข็ม เมื่อพัฒนาถึงค่าสูงสุดแล้ว จะมีค่าค่อนข้างคงที่ แม้ว่าจะมีการเคลื่อนที่ลงของเสาเข็มอยู่อีกยกเว้นในชั้น Stiff Clay อาจจะทำให้กำลังด้านทานที่ผิวลดลง หลังจากที่เสาเข็มเคลื่อนที่ลงเพื่อพัฒนากำลังไปจนถึงจุดสูงสุดแล้ว

พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มหากติดตั้งเครื่องมือวัดแยกระหว่างกำลังด้านทานจากแรงเสียดทานข้างเข็มและกำลังด้านทานที่ปลายเข็ม แล้วจะได้ความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 จะเห็นว่าในระยะแรกกำลังจากแรงเสียดทานข้างเข็มจะเพิ่มขึ้นเร็วจนถึงค่าสูงสุด แล้วจะลดลงเมื่อมีการทรุดตัวเพิ่มขึ้นอีก ในขณะที่กำลังด้านทานที่ปลายเข็มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้น



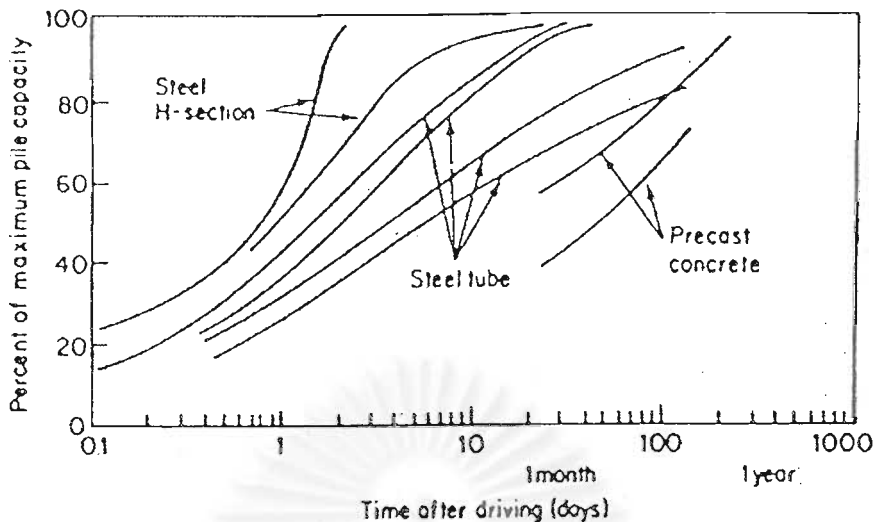
รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็ม โดยแยกกำลังด้านทานที่ข้างเข็ม และกำลังด้านทานที่ปลายเข็ม

จากที่มีผู้ศึกษาไว้พบว่า น้ำหนักที่ถ่ายลงชั้นดินเหนียว เช่น ในกรุงเทพฯ ส่วนใหญ่เป็นการถ่ายแรงที่ส่งผ่านทางผิวเสาเข็ม (Friction Resistance) ประมาณ 75-90% ของน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ส่วนที่ปลายเสาเข็มมีน้ำหนักถ่ายลงชั้นดิน (End Bearing) เพียง 10-25% แต่แรงต้านที่ปลายเข็มนี้อาจจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงรูปแบบจำลองการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มบนดินหลายชั้น (วรากร, 2539)

ลักษณะสำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การตอกเสาเข็มในชั้นดินเหนียวจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินเกิด Consolidation มี Excess Pore Pressure เกิดขึ้น และ Effective Overburden Pressure ลดลง ซึ่งทำให้ค่าแรงเสียดทานที่ผิวลดลงด้วย Pore Pressure ส่วนที่เกินมานี้จะค่อย ๆ กระจายออกไปอย่างช้า ๆ ผลของการกระจายออกไปนี้จะทำให้ Effective Overburden Pressure เพิ่มขึ้นและส่งผลให้แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มเพิ่มกลับขึ้นมาด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.31 จะเห็นได้ว่า ประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ ของเสาเข็มตอกในดินเหนียว จะต้องใช้เวลาประมาณ 1 เดือน จึงจะได้ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุด ดังนั้นในการทดสอบกำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม เช่น Pile Load Test จึงควรทำเมื่อเสาเข็มมีอายุครบ 1 เดือนแล้ว



รูปที่ 2.31 แสดงการเพิ่มของกำลังต้านทานของเสาเข็มตอกใน Soft clay และ Stiff clay ตามเวลา

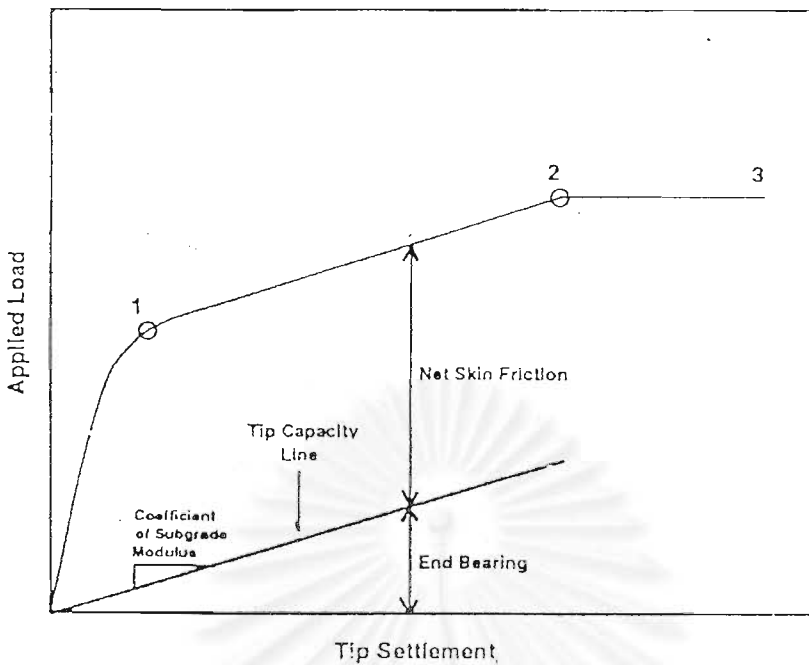
2.7.2 การแปลค่า End-Bearing Load จากการทดสอบเสาเข็ม

เทคนิคในการแปลค่า End-Bearing Load จากการทดสอบเสาเข็มจะยึดถือตาม รูปที่ 2.32 เป็นหลัก ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (Load-Settlement curve) โดยสามารถอธิบายพฤติกรรมของการรับน้ำหนักของเสาเข็มจากกราฟ ในรูปที่ 2.32 ไว้ดังนี้

Segment 0 – 1 น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทั้งหมดจะถูกรองรับโดยแรงเสียดทานด้านข้าง (Skin friction) ของเสาเข็ม โดยการทรุดตัวของเสาเข็มในช่วงนี้จะเป็นแบบอีลาสติก

Segment 1 – 2 แรงเสียดทานด้านข้าง (Skin friction) ของเสาเข็มถูกพัฒนาจนถึงค่าสูงสุด และเมื่อมีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นก็จะถ่ายเทน้ำหนักไปสู่ปลายของเสาเข็มเป็นแรงต้านทานที่ปลาย (End Bearing) ของเสาเข็ม ทำให้อัตราการทรุดตัวของเสาเข็มเพิ่มมากขึ้น

Segment 2 – 3 เมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักจนถึงจุดประลัย เกิด failure ที่ปลายของเสาเข็ม ทำให้การทรุดตัวที่ปลายเพิ่มขึ้นอย่างมาก



รูปที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (Load-Settlement curve)

2.7.3 กลไกการถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มไปสู่ดิน (Pile load transfer)

เมื่อเข็มรับน้ำหนักบรรทุก น้ำหนักบรรทุกจากตัวเข็มจะส่งถ่ายไปยังดินที่อยู่รอบๆ ตัวเสาเข็ม การส่งถ่ายน้ำหนัก (Load transfer) นี้ เป็นกลไกที่ค่อนข้างซับซ้อน ได้มีผู้ศึกษาไว้หลายราย

Whitaker and Cooke (1966) O' Neill and Reese (1970) ได้ศึกษาและพบว่า องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อการส่งถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็ม ไปสู่ดินในชั้นดินเหนียวคือ Shear Strength ของดิน

Cooke and Whitaker (1961) โดยการจำลองเข็มในห้องทดลองเพื่อหาอัตราส่วนของน้ำหนักบรรทุกที่รับโดยดินรอบๆ ลำตัวเสาเข็มและปลายเสาเข็ม พบว่า ความต้านทานของดินที่อยู่รอบลำตัวเสาเข็ม (Side Resistance) จะเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ (Fully Mobilized) เมื่อการเคลื่อนตัวของเข็มเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น คือ ประมาณ 0.5% ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม ในขณะที่ความต้านทานของดินที่ปลายเข็ม จะเกิดขึ้นเต็มที่เมื่อการทรุดตัวของเข็มมีค่าอยู่ระหว่าง 10-15% ของเส้นผ่าศูนย์กลางเข็ม

Aurora and Reese (1976) ได้ศึกษาการส่งถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มไปสู่ดินของเข็มใน Clay Shale พบว่า การส่งถ่ายน้ำหนักจากเข็มไปสู่ดินรอบลำตัวเสาเข็มจะมีค่าสูงสุด เมื่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็มมีค่าประมาณ 0.25 นิ้ว หรือ 0.8% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง และความต้านทานของดินสูงสุดที่ปลายเข็ม (Ultimate Tip Resistance) จะเกิดขึ้นที่การเคลื่อนตัวของเข็มโดยเฉลี่ยเท่ากับ 5% ของเส้นผ่าศูนย์กลางหรือประมาณ 1.5 นิ้ว แต่โดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้นที่การเคลื่อนตัวของเสาเข็มประมาณ 0.75 นิ้ว ส่วนการขุดหลุมเจาะเพื่อทำเสาเข็มเจาะนั้น จะทำให้ Shear Strength ของดินลดลงเนื่องจาก Confining Pressure ลดลง

อย่างไรก็ตาม วิธีการศึกษากลไกการส่งถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มไปสู่ดินที่เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างกว้างขวางในทางปฏิบัติคือ วิธี Distribution Function Approach ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วิธี Distribution Function Approach

วิธีนี้เสนอโดย Seed and Reese (1957) ดังรูปที่ 2.33 การเปลี่ยนแปลงของแรงภายในตัวเข็มตามแนวความยาวของเข็ม จะเขียนอยู่ในรูปของ Load Distribution Curve ดังรูปที่ 2.33b ที่ความลึก Z ใด ๆ แรงภายในตัวเข็มจะเท่ากับผลต่างระหว่างแรงกระทำที่หัวเข็ม Q_T และแรงความต้านทานด้านข้างของดิน (Side Resistance of Soil) ที่กระทำอยู่รอบ ๆ ลำตัวเสาเข็มตั้งแต่หัวเข็มจนถึงความลึก Z ดังนั้น ที่ปลายเข็มจะได้สมการ $Q_T = Q_B + Q_s$ เมื่อ Q_B คือ ความต้านทานของดินที่ปลายเข็ม และ Q_s คือ แรงต้านทานของดินรอบ ๆ ลำตัวเสาเข็มทั้งหมดตลอดทั้งเข็ม การเคลื่อนตัวของผนังเข็มที่ความลึก Z จะต่างกับที่ความลึก $Z + dZ$ เท่ากับ Elastic Compression ของขนาดความยาวของเข็ม dZ และ $\frac{dW_z}{dz} = \frac{Q_z}{AE}$

เมื่อ W_z คือการเคลื่อนตัวของผนังของเข็มที่ความลึก Z เนื่องจากการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ดังนั้น dW_z ก็คือ Elastic Compression ของขนาดของเข็ม dZ ส่วน A คือพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม และ E คือ Modulus of Elasticity ของเข็ม

ดังนั้น ถ้าแรงที่เกิดขึ้นภายในตัวเข็มที่ความลึก Z เนื่องจากเข็มรับน้ำหนัก Q_T ที่หัวเข็มมากกว่าแรงที่เกิดขึ้นภายในตัวเข็มที่ความลึก $Z + dZ$ ด้วยปริมาณ dQ_z แล้ว

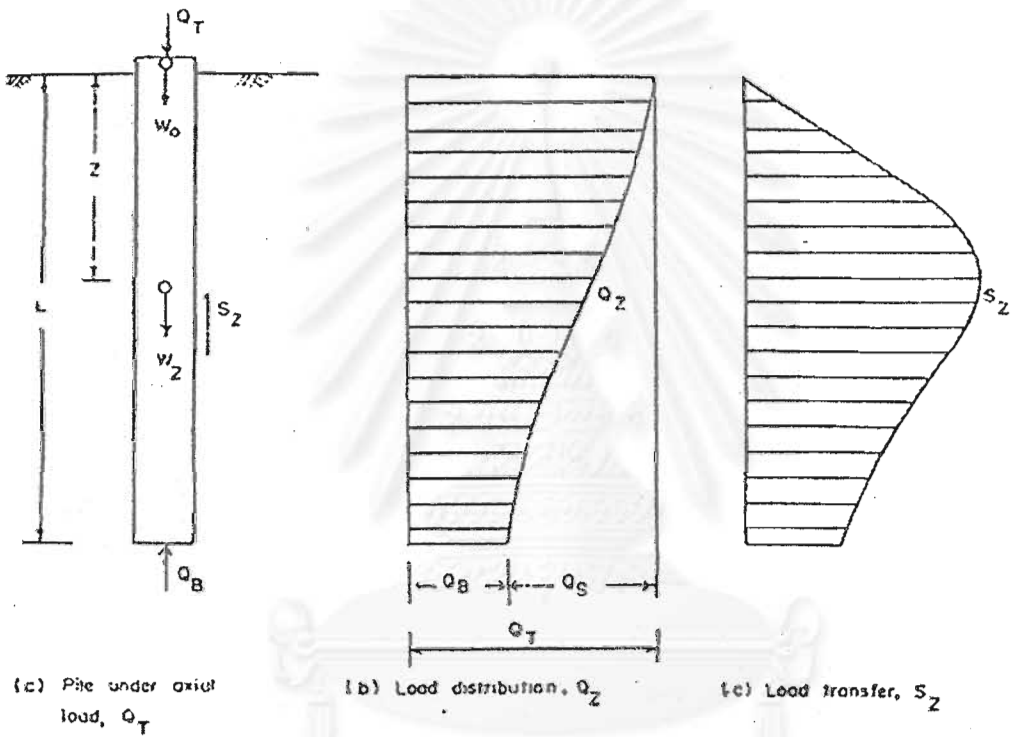
$$dQ_z = -(S_z) \cdot (L_c) \cdot (d_z) \text{ (เครื่องหมายลบหมายถึงทิศทางตรงข้ามกันระหว่าง } dQ_z$$

และ S_z)

เมื่อ S_z คือ น้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเข็มไปสู่ดินรอบลำตัวเสาเข็มที่ความลึก Z โดยคิดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของลำตัวเสาเข็ม

และ L_c คือ เส้นรอบรูปของเสาเข็ม ดังนั้น

$$S_z = -\left(\frac{1}{L_c}\right)\left(\frac{dQ_z}{dz}\right)$$



รูปที่ 2.33 Distribution Function Approach สำหรับเข็มเดี่ยว

ดังนั้น น้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเสาเข็มไปสู่ดินที่ความลึก Z โดยคิดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของลำตัวเสาเข็มจะเท่ากับ Slope ของ Load Distribution Curve ที่ความลึก Z นั้น หาด้วยเส้นรอบรูปของเสาเข็ม

สมการข้างต้นสามารถใช้หาการทรุดตัวของเสาเข็ม w_z ที่ความลึก Z ถ้ารู้การทรุดตัวที่หัวเข็ม w_0 ดังนี้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

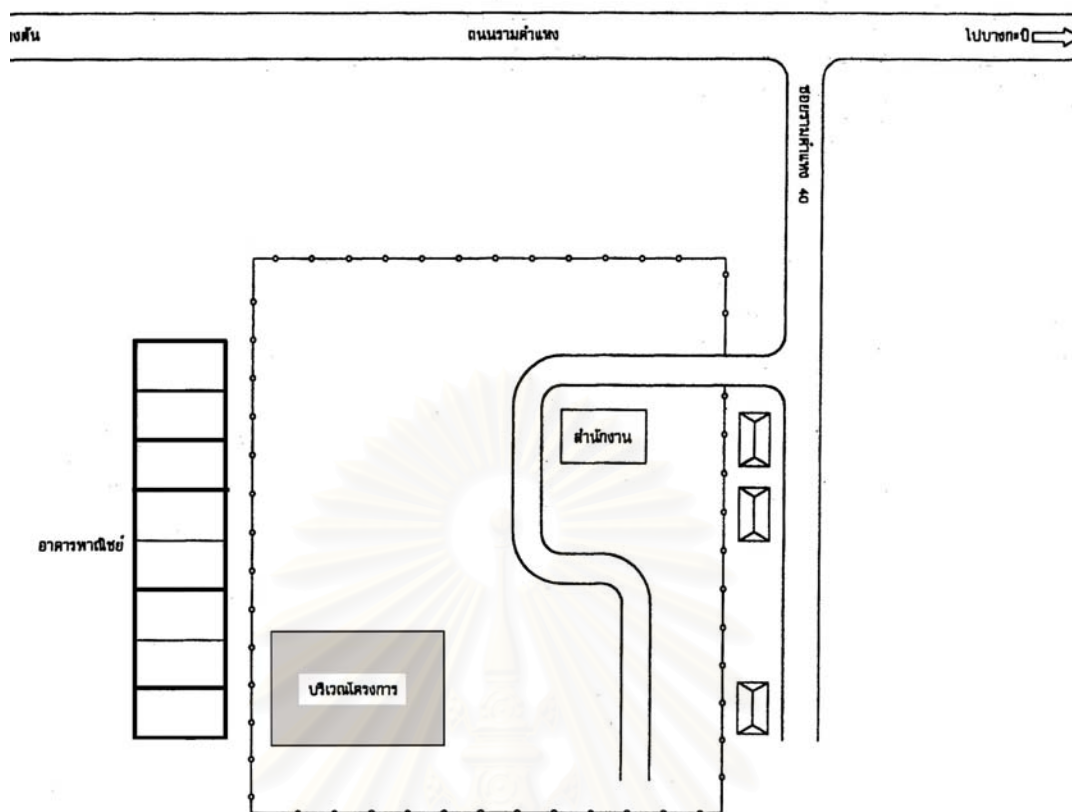
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ข้อมูลเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัย

ประเภทเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง (Spun Pile) ที่แบ่งตามชนิดของการก่อสร้างออกเป็นเสาเข็มตอก และ Auger Press Pile แบบต่าง ๆ โดยข้อมูลที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นข้อมูลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มที่รวบรวมจากพื้นที่การก่อสร้าง 2 แห่ง คือ โครงการก่อสร้างอาคารพักชาวโพด (BMA-Apartment,BMA-AP) ที่ถนนรามคำแหง 40 และโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำในสถานีสูบน้ำจ่ายน้ำประปาของการประปานครหลวง (MWA) ที่บางเขน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 โดยที่งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์และแปลผลจากข้อมูล Load – Settlement ของการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเสาเข็มที่ทำการทดสอบไม่ได้ติดตั้งเครื่องมือเพื่อวัดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในแต่ละช่วงความยาว

ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จำนวนทั้งหมด 12 ต้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยรายละเอียดข้อมูลการทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก และคุณสมบัติของเสาเข็มที่นำมาใช้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

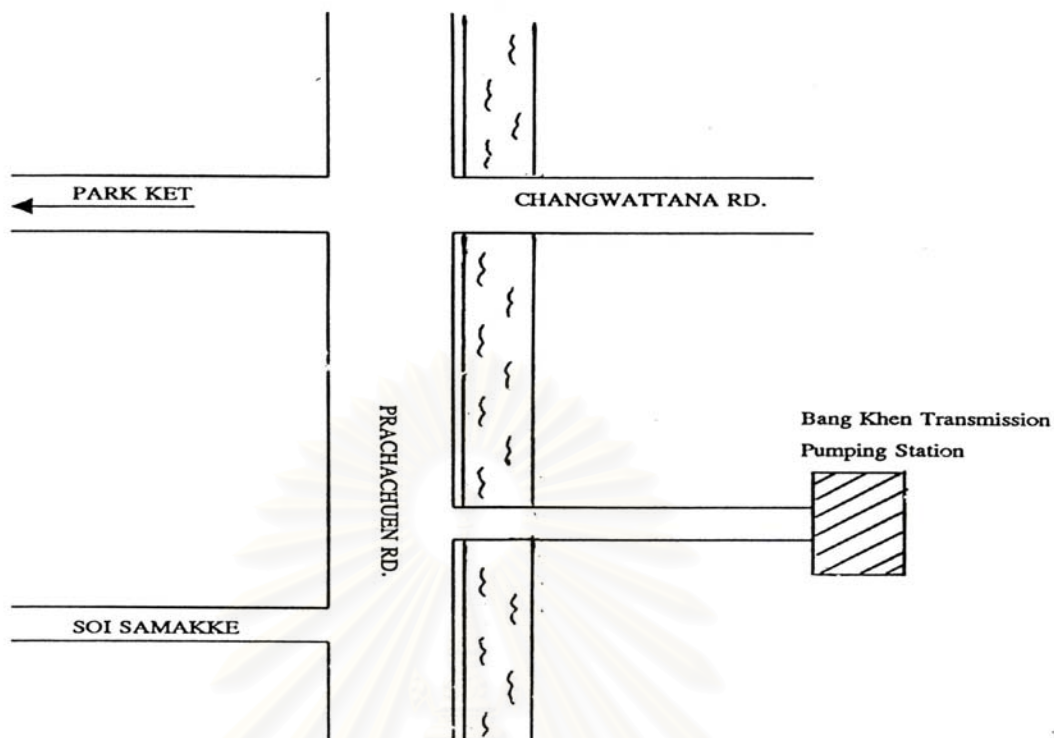
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ก แสดงพื้นที่โครงการอาคารฝึกข้าวโพด



รูปที่ 3.1 ข แสดงลักษณะตำแหน่งที่ตั้งของโครงการก่อสร้างอาคารฝึกข้าวโพด



รูปที่ 3.2 ก แสดงพื้นที่โครงการก่อสร้างสถานีสูบน้ำประปา ของการประปานครหลวง



รูปที่ 3.2 ข แสดงลักษณะตำแหน่งเสาเข็มของโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปา

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลเสาเข็มทดสอบที่รวบรวมได้

หมายเลข เสาเข็ม	ขนาด x ความลึก (m x m)	หมายเลข หลุมเจาะ สำรวจดิน	โครงการ	ตำแหน่งที่ตั้ง
DP-1	φ 0.50 x 22.30	BH – 1T	MWA	ถ. ประชาชื่น บางเขน กรุงเทพฯ
DP-2 ^(*)	φ 0.50 x 25.60	BH – 2T	MWA	ถ. ประชาชื่น บางเขน กรุงเทพฯ
DP-3	φ 0.50 x 23.20	BH – 5A	MWA	ถ. ประชาชื่น บางเขน กรุงเทพฯ
DP-4 ^(*)	φ 0.50 x 20.30	BH – 6A	MWA	ถ. ประชาชื่น บางเขน กรุงเทพฯ
DP-5	φ 0.50 x 24.10	BH – 2T	MWA	ถ. ประชาชื่น บางเขน กรุงเทพฯ
DP-6	φ 0.50 x 22.90	BH – 8A	MWA	ถ. ประชาชื่น บางเขน กรุงเทพฯ
AP-1 ^(*)	φ 0.50 x 19.30	BH – 4A	MWA	ถ. ประชาชื่น บางเขน กรุงเทพฯ
AP-2 ^(*)	φ 0.50 x 19.30	BH – 4A	MWA	ถ. ประชาชื่น บางเขน กรุงเทพฯ
AP-3 ^(*)	φ 0.50 x 20.45	BH – 4A	MWA	ถ. ประชาชื่น บางเขน กรุงเทพฯ
AP-4 /1	φ 0.80 x 35.89	BH – 2S	BMA-AP	ถ. รามคำแหง40 บางกะปิ กรุงเทพฯ
AP-4 /2	φ 0.80 x 35.89	BH – 2S	BMA-AP	ถ. รามคำแหง40 บางกะปิ กรุงเทพฯ
AP-5	φ 0.80 x 37.04	BH – 2S	BMA-AP	ถ. รามคำแหง40 บางกะปิ กรุงเทพฯ

หมายเหตุ

MWA : โครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำในสถานีสูบน้ำประปา ของการประปานครหลวง

BMA-AP : โครงการก่อสร้างอาคารฝึกข่าวโศค

DP-2 ความยาวของเข็มเท่ากับ 25 เมตร

DP-4 ความยาวของเข็มเท่ากับ 20 เมตร

AP-1 ความยาวของเข็มเท่ากับ 19 เมตร

AP-2 ความยาวของเข็มเท่ากับ 19 เมตร

AP-3 ความยาวของเข็มเท่ากับ 20 เมตร

ตารางที่ 3.2 แสดงลักษณะและคุณสมบัติของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง

Outer Diam. (mm)	Wall Thickness (mm)	Length per Piece (m)	Concrete Cross Section Area (cm ²)	Total Cross Section Area (cm ²)	Moment of Inertia of Concrete (cm ⁴)	Weight (kg/m)	Allowable Axial Load on Pile (ton)	Recommend safe Load (BKK Area) (ton)
250	55	7-15	337	491	17289	88	39	25-35
300	60	7-16	452	707	34608	117	52	35-50
350	65	7-16	582	962	62189	151	67	50-65
400	75	7-17	766	1257	106489	199	88	65-80
450	80	7-17	930	1591	166570	242	107	80-100
500	90	7-17	1159	1964	255324	301	133	90-120
600	100	7-17	1571	2828	510509	408	181	100-160
700	110	7-15	2039	3850	918012	530	234	140-210
800	120	7-14	2564	5028	1527870	667	295	180-270
900	130	7-13	3146	6358	2397072	820	360	230-310
1000	130	7-13	3782	7857	3589571	983	435	220-410

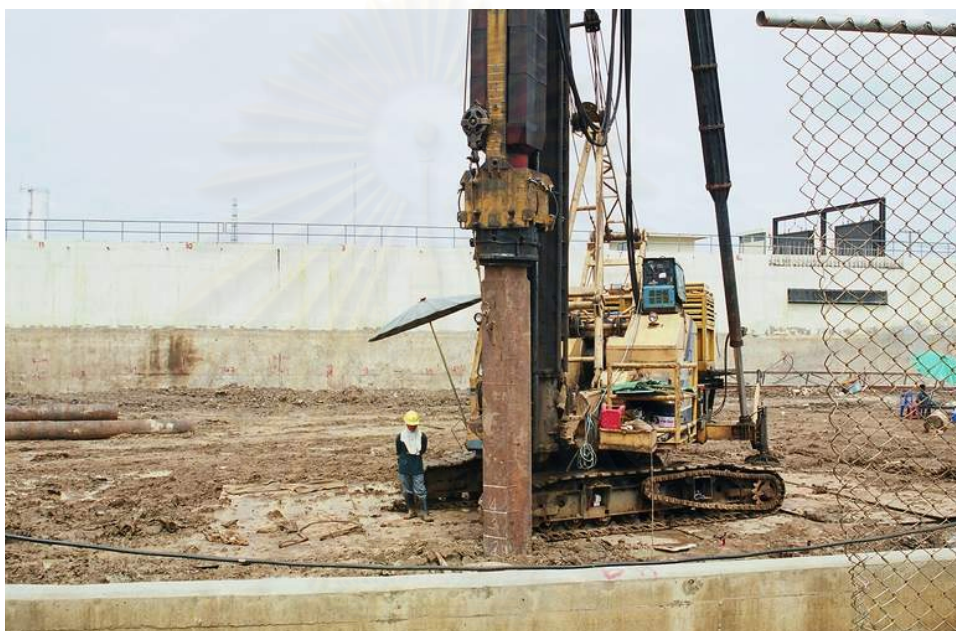
Remarks: Recommended safe load depends on soil condition and total length of pile. All design referred from TIS 398-2537 (1994)

Ultimate Compressive Concrete Cylinder Strength is more than 500 ksc.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.1.1 เสาเข็มตอก (Pure drive)

เสาเข็มตอกที่มีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่รวบรวมได้มีจำนวน 6 ต้น ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.05 เมตร โดยมีความยาวอยู่ระหว่าง 20 - 25 เมตร ประกอบด้วย เสาเข็ม DP- 1, DP - 2, DP - 3, DP - 4, DP - 5 และ DP - 6 รูปถ่ายขณะทำการตอกเสาเข็ม Spun pile แสดงในรูปที่ 3.3 และมีรายละเอียดของการทดสอบเสาเข็ม ดังแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปถ่ายขณะตอกเสาเข็ม Spun Pile (โครงการ โรงกรองน้ำ)

3.1.1.2 Auger Press Pile

Auger Press Pile ที่ทดสอบกำลังรับน้ำหนักที่รวมได้มีจำนวน 6 ต้น โดยสามารถแยกประเภทเสาเข็มตามลักษณะการก่อสร้างได้ดังนี้

Fully Auger with Press

เสาเข็มทดสอบ Fully Auger with Press เป็นเสาเข็มที่ก่อสร้างขึ้นเพื่อลดแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม โดยเสาเข็มทดสอบชนิดนี้ที่รวบรวมได้มี 1 ต้น คือ AP-4/1 รูปถ่ายขณะทำการ Auger และ กดเสาเข็ม Spun pile แสดงในรูปที่ 3.4 และมีรายละเอียดของการทดสอบเสาเข็ม ดังแสดงในตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ก รูปถ่ายขณะAuger ในชั้นดินเหนียว



รูปที่ 3.4 ข รูปถ่ายขณะAuger ผ่านชั้นทรายชั้นแรก



รูปที่ 3.4 ค รูปถ่ายขณะทำการกดหัวเสาเข็ม (Press)

Auger Press with Final Drive

เสาเข็มทดสอบชนิดนี้ ทำการก่อสร้างโดยการเจาะและกดสลัดกันไปจนกระทั่งปลายเสาเข็มอยู่เหนือชั้นทรายเล็กน้อยจากนั้นจึงทำการตอกเสาเข็มเพื่อเพิ่ม End Bearing ที่ความลึกสุดท้าย เสาเข็มทดสอบชนิดนี้คือ AP 1 และ AP 2 รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

Fully Auger Press Pile with Toe Grout

เสาเข็มทดสอบชนิดนี้มีการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มด้วยการ Grout ที่ปลายเสาเข็ม โดยรวบรวมได้จำนวน 2 ต้น คือ AP 4 / 2 และ AP 5 ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.4

Fully Auger with Pile Toe Grout and Redrive

ในบางกรณีเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างแบบ Fully Auger Press with Pile toe Grout ยังไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ถึงที่ต้องการได้ จึงทำการตอกอีกครั้งหลังการ grout เพื่อเพิ่มกำลังรับน้ำหนัก โดยทำการเก็บข้อมูลทดสอบเสาเข็มชนิดนี้ได้ 1 ต้น คือ AP 3 รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของเสาเข็มตอกที่รวบรวมได้

Pile No.	Pile Size (m x m)	Soil layer at pile tip	Date of Piling	Type of Load Test	Date of Pile Testing	Result at Design load		Result at Ultimate Load		Initial settle ment (mm)	Remark
						Load (kN)	settle ment (mm)	Load (kN)	settle ment (mm)		
DP-1	Φ 0.50 x 22.30	1 st Sand	11/04/02	ML	25/05/02	750	2.39	1875	7.52	0.17	
DP-2	Φ 0.50 x 25.60	1 st Sand	08/04/02	ML	07/05/02	750	2.38	1875	7.49	0.53	
DP-3	Φ 0.50 x 23.20	1 st Sand	25/04/02	ML	25/05/02	750	1.82	1875	7.00	0.09	
DP-4	Φ 0.50 x 20.30	1 st Sand	18/07/02	ML	12/09/02	750	4.24	1875	9.50	1.75	
DP-5	Φ 0.50 x 24.10	1 st Sand	06/04/02	ML	07/05/02	750	2.38	1875	7.28	0.53	
DP-6	Φ 0.50 x 22.90	1 st Sand	25/04/02	ML	25/05/02	750	2.67	1875	8.48	0.40	

หมายเหตุ

Initial settlement = Initial settlement before starting the next cycle.

ML = Maintain load test

ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของเสาเข็ม Auger press ที่รวบรวมได้

Pile No.	Pile Size (m x m)	Soil layer at pile tip	Date of Piling	Type of Load Test	Date of Pile Testing	Result at Design load		Result at Ultimate Load		Initial settle ment (mm)	Remark
						Load (kN)	settle ment (mm)	Load (kN)	settle ment (mm)		
AP-1	φ 0.50 x 19.30	Stiff clay	01/07/02	ML	12/09/02	750(f)	71.80	1875(f)	-	0.00	Final drive
AP-2	φ 0.50 x 19.30	1 st Sand	11/07/02	ML	05/11/02	750	2.42	1875	12.62	0.54	Final drive
AP-3	φ 0.50 x 20.45	1 st Sand	15/10/02	ML	05/11/02	750	1.84	1875	7.14	0.41	Grout &redrive
AP-4/1	φ 0.80 x 35.89	2 nd Sand	26/12/02	ML	20/02/03	2400	5.53	4910(f)	93.88	1.76	
AP-4/2	φ 0.80 x 35.89	2 nd Sand	26/12/02	ML	08/04/02	2400	3.87	6000	13.40	0.16	Pile toe grout
AP-5	φ 0.80 x 37.04	2 nd Sand	10/05/02	ML	18/06/02	2400	4.41	6000	18.37	0.07	Pile toe grout

หมายเหตุ

Initial settlement = Initial settlement before starting the next cycle.

ML = Maintain load test

f = fail

3.1.2 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ชั้นดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินทั้งใน ห้องปฏิบัติการและในสนาม เช่น ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าหน่วยน้ำหนักของมวล ดิน รวมทั้งค่า N จากการทดสอบ Standard Penetration Test (SPT) ในแต่ละชั้นดิน มีความจำ เป็นมากในการออกแบบฐานราก และหาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์และคุณสมบัติของดิน ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อมูลดินที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์บางข้อมูลเป็นข้อมูลดินที่ได้จาก บริเวณพื้นที่โครงการก่อสร้าง เสาเข็มไม่ใช่ตำแหน่งก่อสร้างเสาเข็มทดสอบโดยตรง รวมทั้งการ แปรผลข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ ขึ้นอยู่กับวิจารณ์และประสบการณ์ของแต่ละบุคคล ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ อาจคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงบ้าง

ข้อมูลผลการเจาะสำรวจชั้นดินที่รวบรวมได้สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ แสดงไว้ใน ภาคผนวก

3.2 วิธีการวิเคราะห์และข้อจำกัดในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ อาศัยข้อมูล Load – Settlement จากข้อมูลการทดสอบเสาเข็ม และผลการศึกษาที่ผ่านมา รวมทั้ง ทฤษฎีบทที่เกี่ยวกับเสาเข็ม ซึ่งจะให้ผลวิเคราะห์หาค่าแรงเสียดทาน (Unit Skin Friction, f_s) และ แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Unit End Bearing Resistance, q_b) ได้

3.2.1 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย

จากผลการวิจัยของ Pimpasugdi (1989) Wachiraprakarnpong (1993) และ Soontornsiri (1995) พบว่าทฤษฎี Butter & Hoy (1977) และ Mazurkiewicz (1972) มีความ เป็นไปได้ (ใกล้เคียง) มากที่สุดในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มในดิน กรุงเทพฯ ฯ

การทดสอบเสาเข็มเกือบทั้งหมดในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพียงถึงค่าน้ำหนัก บรรทุกเป็น 2.5 เท่า ของน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบ จะไม่สามารถหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ จุดวิบัติตามทฤษฎีของ Butter & Hoy ได้ ดังนั้นจึงใช้ทฤษฎีของ Mazurkiewicz (1972) ในการหา ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มสำหรับเสาเข็มทดสอบในงานวิจัยนี้

3.2.2 การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม

3.2.2.1 ชั้นดินเหนียว

การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวจะเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor (α) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) จากการทดสอบ Unconfined Compression Test และความสัมพันธ์ระหว่างค่า Skin Friction Ratio (f_s/N) กับค่า N จากการทดสอบ SPT โดยการวิเคราะห์กลับจากหน่วยแรงเสียดทาน (Unit Skin Friction, f_s) ในชั้นดินเหนียว ค่า α หาได้จาก

$$\alpha = \frac{f_s}{S_u}$$

ค่า S_u ในชั้นดินเหนียวอ่อนใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบ Unconfined Compression Test และเปรียบเทียบกับค่า Water Content และหน่วยน้ำหนักของดินในแต่ละชั้นประกอบ แล้วนำมาเฉลี่ยตลอดชั้นดิน สำหรับชั้นดินเหนียวแข็งค่า S_u หาจากความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างค่า N จากการทดสอบ SPT กับค่า S_u ที่เสนอโดย วีรนนท์ (2526) โดยที่ค่า N หาจากการทดสอบ SPT

ข้อมูลดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ส่วนใหญ่ไม่ใช่ข้อมูลดินบริเวณตำแหน่งก่อสร้างเสาเข็มทดสอบโดยตรงแต่เป็นข้อมูลดินบริเวณพื้นที่โครงการเดียวกันที่อยู่ใกล้เคียง ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ค่า α อาจคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงบ้าง

3.2.2.2 ชั้นทราย

การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มในชั้นทรายจะเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า Friction Factor (β) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $K_s \tan \delta$ กับมุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') โดยการวิเคราะห์กลับจากหน่วยแรงเสียดทาน (Unit Skin Friction, f_s) ในชั้นทรายโดยค่า $K_s \tan \delta$ หาได้จาก

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

ค่า f_s ในชั้นทรายเป็นค่า f_s ณ ค่าการทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม (Deformation at pile top)
 ที่ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Q_{ult}) ที่หาได้จากทฤษฎีของ Mazurkiewicz (1972) และค่า
 มุม (ϕ') เป็นค่าที่หาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า N จากการทดสอบ SPT ภายหลังการปรับแก้ผล
 ของ σ'_{vi} กับค่ามุม ϕ' ที่เสนอโดย Peck, Hanson & Thornburn (1974)

ค่า σ'_{vi} เป็นค่า Effective Overburden Pressure ณ จุดกึ่งกลางของชั้นทรายที่
 พิจารณา

3.2.3 การประมาณค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

การประมาณค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจะเสนอในรูปค่า Bearing Capacity Factor, N_q
 สำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทราย และค่า Bearing Capacity Factor, N_c สำหรับเสาเข็มที่มี
 ปลายอยู่ในชั้นดินเหนียว สำหรับเสาเข็มที่ปลายอยู่ในชั้นทรายจะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า
 Mobilized, N_q กับค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') ซึ่งค่า Mobilized, N_q วิเคราะห์กลับจาก
 ค่าหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (q_b) ดังสมการ

$$N_q = q_b / \sigma'_{vi}$$

ค่า q_b เป็นค่า factor ณ การทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม (Deformation at Pile Top) ทำให้ค่า
 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Q_{ult}) ที่หาได้จากทฤษฎีของ Mazurkiewicz (1972)

ค่า σ'_{vi} เป็นค่า Effective Overburden Pressure ณ จุดกึ่งกลางจากระดับความลึก
 เริ่มต้นของชั้นทราย กับค่าระดับปลายเสาเข็ม

สำหรับเสาเข็มที่ปลายอยู่ในชั้นดินเหนียว ผลวิเคราะห์จะแสดงค่าในรูปค่า Bearing
 Capacity Factor, N_c ซึ่งหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Bearing Capacity } (N_c) = q_b / S_u$$

ผลการทดสอบ, การวิเคราะห์ผลและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาสมบัติของดินบริเวณสถานที่ก่อสร้างที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติของดินแบ่งเป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ 1) สมบัติขั้นพื้นฐาน (Basic Soil Properties) ประกอบด้วย ปริมาณความชื้นของดิน (Water Content) ค่าพิกัด Atterberg (Atterberg Limits) และค่าความหนาแน่นรวมของดิน (Total Unit Weight, γ) 2) สมบัติทางด้านวิศวกรรม ประกอบด้วย ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) ในชั้นดินเหนียว ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน (ϕ') สำหรับชั้นทราย และค่า N จากการทดสอบ SPT สำหรับชั้นเหนียวแข็งและชั้นทราย

ข้อมูลการเจาะสำรวจดินบริเวณสถานที่ก่อสร้างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ทั้งหมด 7 หลุม คือ BH-1T, BH-2T, BH-4A, BH-5A, BH-6A, BH-8A ซึ่งรวบรวมมาจากโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปานครหลวง ที่บางเขน และ BH-2S จากโครงการก่อสร้างอาคารฝึกข้าวโพด ที่ถนนรามคำแหง 40 ซึ่งแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก โดยเสาเข็มแต่ละต้นจะใช้ข้อมูลดินจากหลุมเจาะที่มีตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่งก่อสร้างเสาเข็มมากที่สุดในการออกแบบ โดยรายละเอียดของเสาเข็มและค่าคุณสมบัติของดินที่ได้จากการแปรผลข้อมูลดินจากการเจาะสำรวจ และข้อมูลการตอกเสาเข็มทดสอบสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ข

4.2 การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

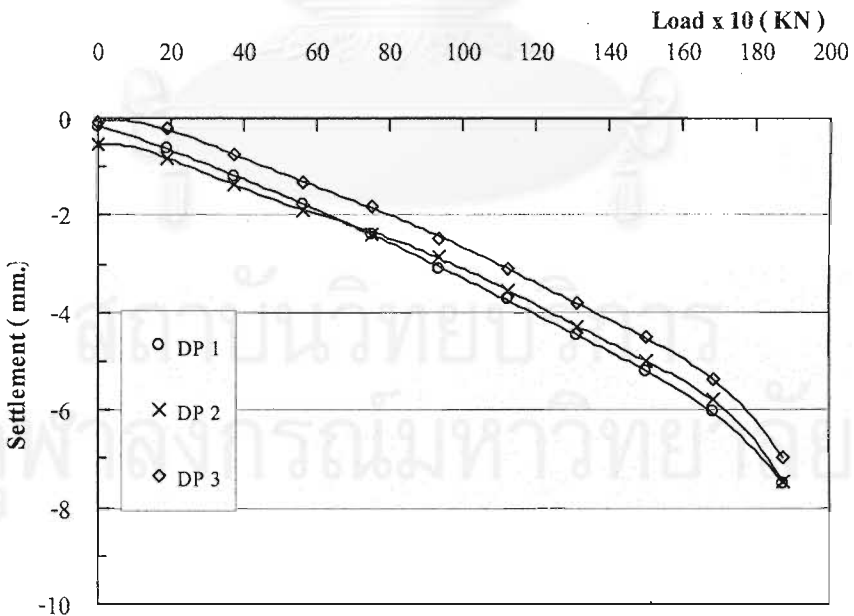
ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตศาสตร์แสดงในรูปกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่มากระทำกับค่าการทรุดตัว (Load - Settlement curve) ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ข โดยการแปลผลการทดสอบเพื่อให้ได้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มในงานวิจัยนี้ใช้ทฤษฎีของ Mazurkiewicz (1972) เนื่องจากเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพียงถึงค่าน้ำหนักบรรทุกเป็น 2.5 เท่า ของน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบ และค่ากำลังรับแรงเสียดทานคำนวณข้างหากจากกราฟ Load - Settlement โดยใช้เทคนิคการแปรค่า End-Bearing Load จากการทดสอบเสาเข็มในหัวข้อที่ 2.7.2 ของบทที่ 2

รายละเอียดของการทดสอบเสาเข็ม ผลของการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุก ประลัย และค่าของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มทดสอบโดยใช้ทฤษฎีและเทคนิคการแปรค่า การรับน้ำหนักของเสาเข็มที่กล่าวไว้ในข้างต้น มีรายละเอียดแยกตามประเภทของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยได้ดังนี้

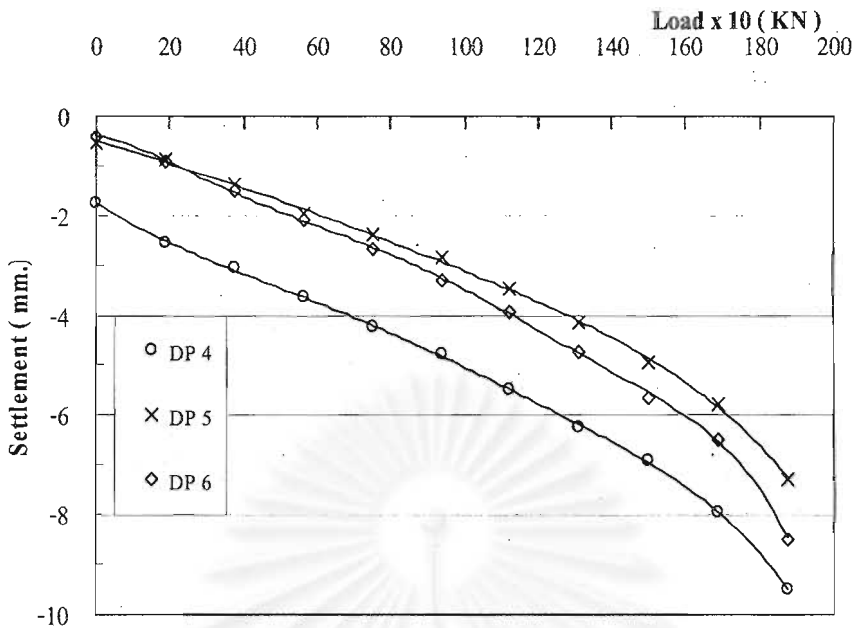
4.2.1 เสาเข็มตอก (Driven Pile)

ข้อมูลของเสาเข็มตอกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีจำนวนทั้งหมด 6 ต้น เป็นเสาเข็มที่รวบรวมมาจากโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำ ของการประปานครหลวง โดยปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก ดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 3.3

เสาเข็ม Spun Pile ที่ทำการก่อสร้างโดยการตอกทั้ง 6 ต้น ได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุก (Pile Load Test) ด้วยวิธี Static Pile Load Test เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักออกแบบ (Allowable Load, Q_{all}) ได้เท่ากับ 75 ตัน (750 kN) โดยมีค่า Safety Factor เท่ากับ 2.5 เพื่อให้ได้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Load, Q_{ult}) เท่ากับ 187.5 ตัน (1,875 kN) โดยกราฟของการทรุดตัวกับน้ำหนักที่มากกระทำ แสดงไว้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ก. Load Settlement Curve for Driven pile DP1, DP2 and DP3



รูปที่ 4.1 ข. Load Settlement Curve for Driven pile DP4, DP5 and DP6

การทดสอบเสาเข็มตอกในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยและค่าของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มตอกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ ค1 ในภาคผนวก ค

4.2.2 เสาเข็ม Auger Press Pile

เสาเข็ม Auger press pile ที่นำมาใช้ในงานวิจัยรวบรวมมาจากโครงการก่อสร้าง 2 แห่ง โดยแบ่งเสาเข็มออกเป็น 6 กรณี ตามวิธีการก่อสร้าง และชั้นดินที่ปลายของเสาเข็ม มีรายละเอียดดังนี้

- เสาเข็ม Auger press pile ที่รวบรวมมาจากโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปานครหลวง สามารถแบ่งเสาเข็ม ออกเป็น 3 กรณี คือ

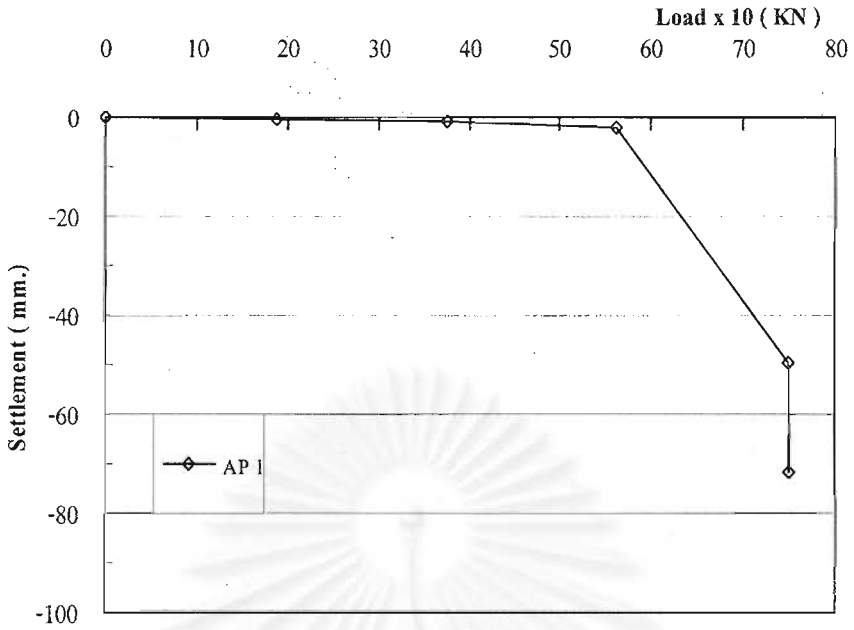
- เสาเข็มที่ก่อสร้างแบบ Auger press in clay with final drive โดยมีปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก จำนวน 1 ต้น
- เสาเข็มที่ก่อสร้างแบบ Auger press in clay with final drive into sand โดยมีปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก จำนวน 1 ต้น
- เสาเข็มที่ก่อสร้างแบบ Full auger into sand layer with toe grout and redrive โดยมีปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก จำนวน 1 ต้น

● เสาค้ำ Auger press pile ที่รวบรวมมาจากโครงการก่อสร้างอาคารฝึกข้าวโพดสูง 21 ชั้น สามารถแบ่งเสาค้ำ ออกเป็น 3 กรณี คือ

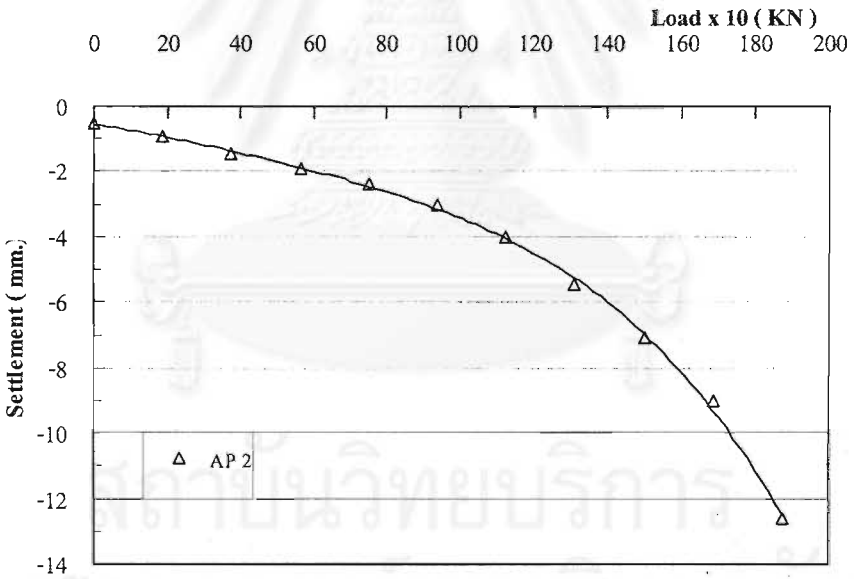
- เสาค้ำที่ก่อสร้างแบบ Full auger in clay with press into sand โดยมีปลายของเสาค้ำอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง จำนวน 1 ต้น
- เสาค้ำที่ก่อสร้างแบบ Full auger in clay with press into sand with single stage of grout โดยมีปลายของเสาค้ำอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง จำนวน 1 ต้น
- เสาค้ำที่ก่อสร้างแบบ Full auger in sand with two stage of grout โดยมีปลายของเสาค้ำอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง จำนวน 1 ต้น

ข้อมูลของเสาค้ำ Auger press pile ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 3.3

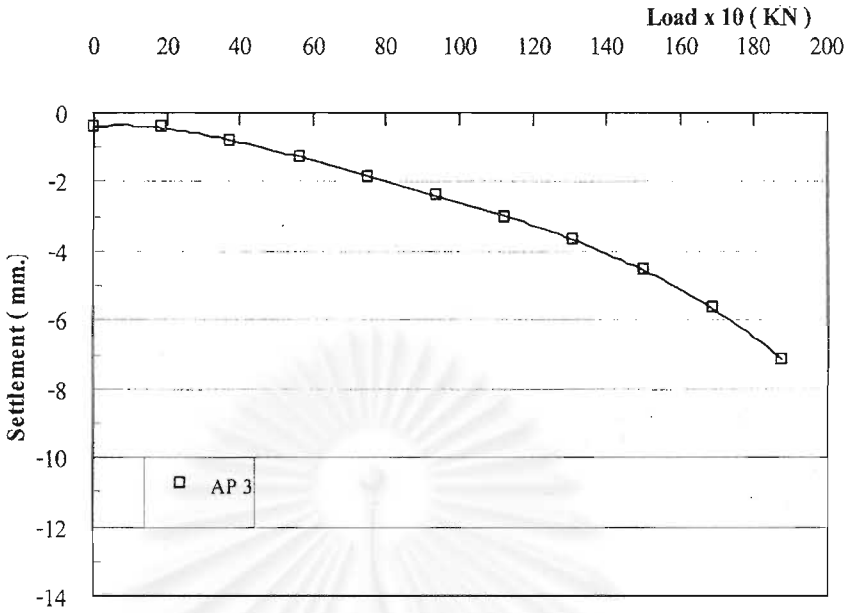
เสาค้ำ Auger press pile ที่ทำการก่อสร้างด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 6 รูปแบบจำนวน 6 ต้น ได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุก (Pile Load Test) ด้วยวิธี Static Pile Load Test เพื่อให้เพื่อให้เสาค้ำสามารถรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ (Allowable Load, Q_{all}) ได้ สำหรับโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปานครหลวง น้ำหนักออกแบบของเสาค้ำ เท่ากับ 75 ตัน (750 kN) โดยมีค่า Safety Factor เท่ากับ 2.5 เพื่อให้ได้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Load, Q_{ult}) เท่ากับ 187.5 ตัน (1,875 kN) และโครงการก่อสร้างอาคารฝึกข้าวโพด น้ำหนักออกแบบของเสาค้ำ เท่ากับ 240 ตัน (2,400 kN) และมีค่า Safety Factor เท่ากับ 2.5 และค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Load, Q_{ult}) เท่ากับ 600 ตัน (6,000 kN) กราฟของการทรุดตัวของเสาค้ำกับน้ำหนักบรรทุกที่มากระทำกับเสาค้ำ Auger press แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ถึง 4.7



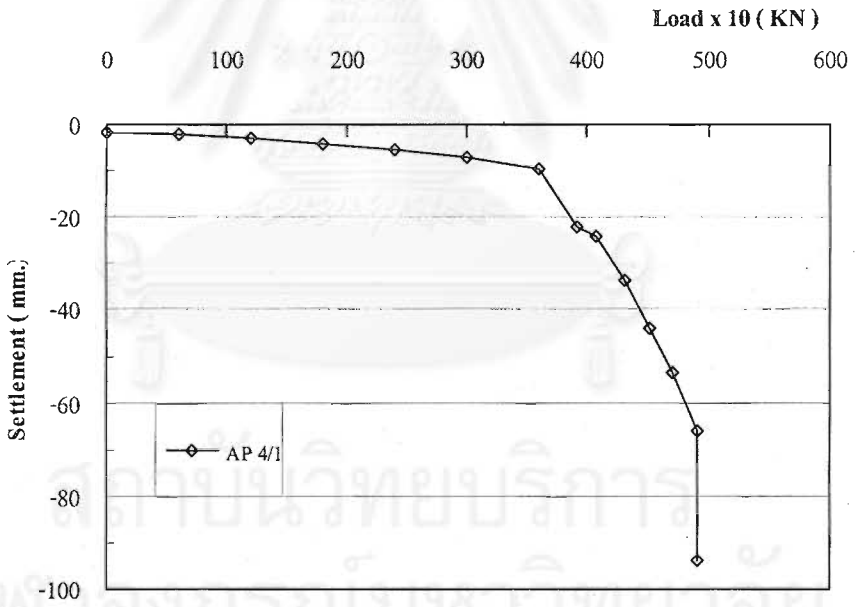
รูปที่ 4.2 Load Settlement Curve for Auger press in clay with final drive with tip in Stiff clay



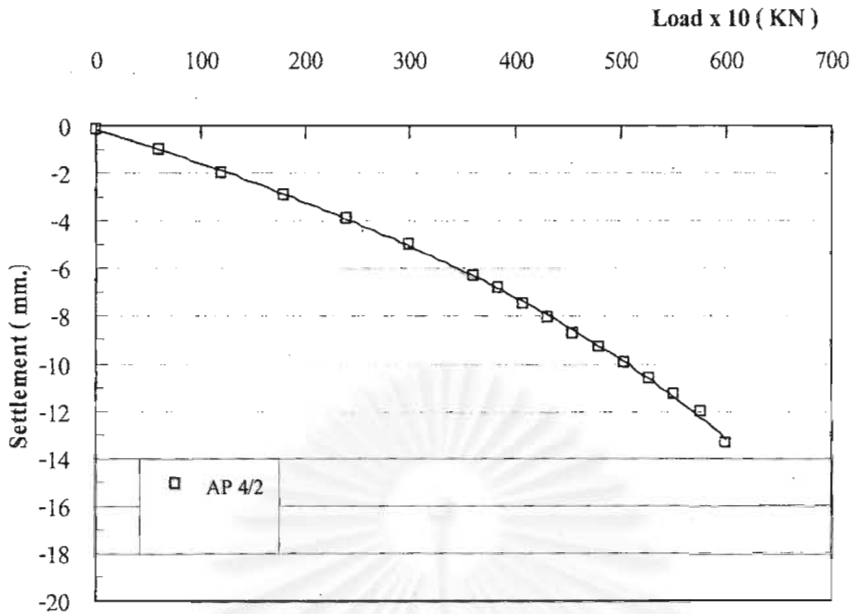
รูปที่ 4.3 Load Settlement Curve for Auger press in clay with final drive into sand with tip in 1st Sand



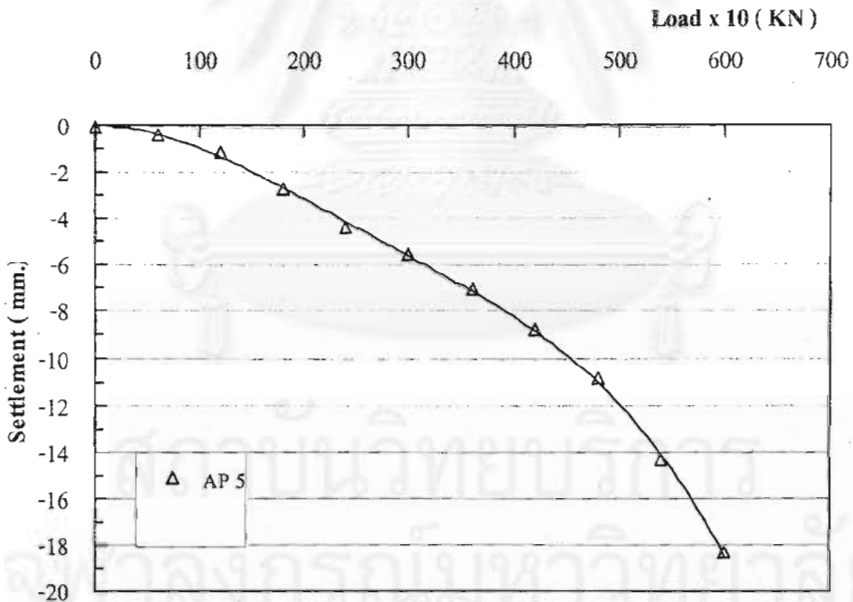
รูปที่ 4.4 Load Settlement Curve for Full auger into sand layer with toe grout and redrive with tip in 1st Sand



รูปที่ 4.5 Load Settlement Curve for Full auger in clay with press into sand with tip in 2nd Sand



รูปที่ 4.6 Load Settlement Curve for Full auger in clay with press into sand with single stage of grout with tip in 2nd Sand



รูปที่ 4.7 Load Settlement Curve for Full auger in sand with two stage of grout with tip in 2nd Sand

การทดสอบเสาเข็ม Auger press pile ในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1 และผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยและค่าของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม Auger press pile ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ ค1. ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ Static Pile Load Test ของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัย

Case	Piling Method	Pile No.	Pile Size (m x m)	Project	Depth of Auger press (m)	Depth of Final drive (m)	Pile Tip		Result of Pile Test				Initial Settle ment (mm)
							Depth (m)	Soil layer	At Q_{all}		At Q_{ult}		
									Load (kN)	Sett. (mm)	Load (kN)	Sett. (mm)	
1	Full Drive with tip in sand	DP 1	0.50x25.0	MWA	-	Full drive	22.30	1 st Sand	750	2.39	1875	7.52	0.17
		DP 2	0.50x25.0	MWA	-	Full drive	25.60	1 st Sand	750	2.38	1875	7.49	0.53
		DP 3	0.50x25.0	MWA	-	Full drive	23.20	1 st Sand	750	1.82	1875	7.00	0.09
		DP 4	0.50x20.0	MWA	-	Full drive	20.30	1 st Sand	750	4.24	1875	9.50	1.75
		DP 5	0.50x25.0	MWA	-	Full drive	24.10	1 st Sand	750	2.38	1875	7.28	0.53
		DP 6	0.50x25.0	MWA	-	Full drive	22.90	1 st Sand	750	2.67	1875	8.48	0.40

ตารางที่ 4.1(ต่อ) ผลการทดสอบ Static Pile Load Test ของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัย

Case	Piling Method	Pile No.	Pile Size (m x m)	Project	Depth of Auger press (m)	Depth of Final drive (m)	Pile Tip		Result of Pile Test				Initial Settle ment (mm)
							Depth (m)	Soil layer	At Q_{all}		At Q_{ult}		
									Load (kN)	Sett. (mm)	Load (kN)	Sett. (mm)	
2	Auger press in clay with final drive. (Blow in final drive is small)	AP 1	0.50x19.0	MWA	18.10	1.20	19.30	Stiff Clay	750	71.80	750	71.8	0.00
3	Auger press in clay with final drive into sand	AP 2	0.50x19.0	MWA	18.10	1.20	19.30	1 st Sand	750	2.42	1875	12.62	0.54
4	Full auger into sand layer with toe grout and redrive	AP 3	0.50x20.0	MWA	20.00	0.45	20.45	1 st Sand	750	1.84	1875	7.14	0.41

ตารางที่ 4.1(ต่อ) ผลการทดสอบ Static Pile Load Test ของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัย

Case	Piling Method	Pile No.	Pile Size (m x m)	Project	Depth of Auger press (m)	Depth of Final drive (m)	Pile Tip		Result of Pile Test				Initial Settlement (mm)
							Depth (m)	Soil layer	At Q_{all}		At Q_{ult}		
									Load (kN)	Sett. (mm)	Load (kN)	Sett. (mm)	
5	Full auger in clay with press into sand	AP4/1	0.8x35.89	BMA-AP	35.89	-	35.89	2 nd Sand	2400	5.53	4910	93.88	1.76
6	Full auger in clay with press into sand with single stage of grout	AP4/2	0.8x35.89	BMA-AP	35.89	-	35.89	2 nd Sand	2400	3.87	6000	13.40	0.16
7	Full auger in sand with two stage of grout	AP5	0.8x37.04	BMA-AP	37.04	-	37.04	2 nd Sand	2400	4.41	6000	18.37	0.07

4.3 พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม Auger Press Spun Pile

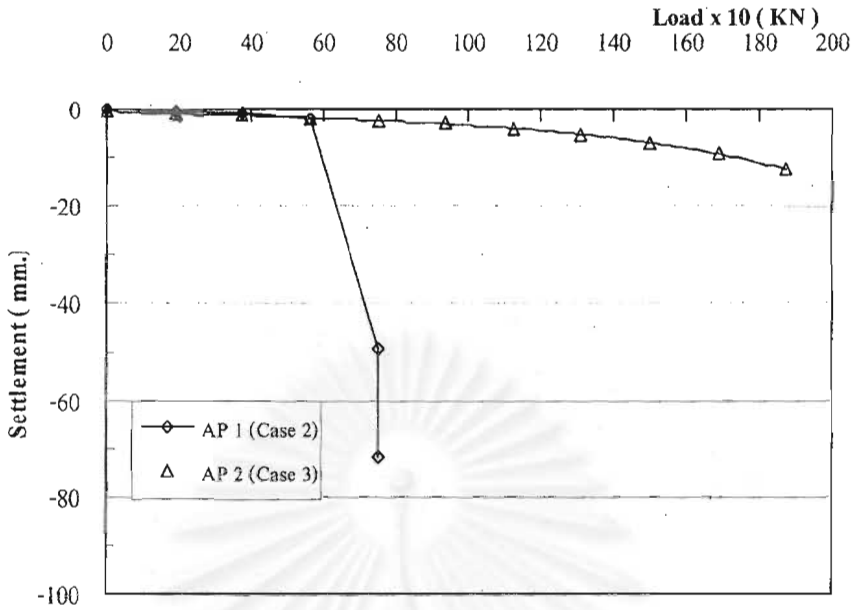
พฤติกรรมการรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม Spun Pile (Ultimate Pile Capacity) และการทรุดตัวที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับวิธีและเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มในแต่ละวิธี ซึ่งผู้ออกแบบจะต้องตระหนัก และเข้าใจถึงพฤติกรรมของลักษณะชั้นดิน และพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ซึ่งจะทำให้การออกแบบถูกต้อง สามารถรับกำลังสูงสุดได้ตามที่ออกแบบ

4.3.1 การรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม Auger Press Pile ที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก

พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม Auger press pile ที่มีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก ซึ่งเป็นเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างในโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปานครหลวง โดยสามารถที่จะแยกพิจารณาตามเทคนิคของการก่อสร้างเสาเข็มได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก. Auger press in clay with final drive ซึ่งเป็นวิธีการก่อสร้างของเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 2 โดยทำการ Auger ลงไปจนถึงความลึก 18.10 เมตร จากนั้นทำการตอกเสาเข็มลงไปอีกประมาณ 1.20 เมตร (Pile tip -19.30 ม.) blow ของการตอกเสาเข็มเท่ากับ 5 blow/ft ซึ่งสามารถทำนายได้ว่า ปลายของเสาเข็มในกรณีนี้อยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งจนถึงปลายแตะกับชั้นทรายเล็กน้อย จากการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Static Pile Load Test ซึ่งแสดงผลไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่าเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 2 นี้ สามารถรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มได้เพียงแค่ค่ากำลังออกแบบ (Allowable Load) เท่านั้น และไม่สามารถรับน้ำหนักได้อีก ทั้งนี้เนื่องจากผลของการเกิด Boiling และ Loosening ในชั้นทรายใต้ปลายเสาเข็ม ส่งผลกระทบไม่เฉพาะกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) เท่านั้นแต่จะส่งผลกระทบต่อผลการลดกำลังการรับน้ำหนักเสียดทานที่ผิว (Friction Capacity) อย่างมากมาย เช่นเดียวกับการเกิดปัญหา Soft Toe ในเสาเข็มเจาะเปียกขนาดใหญ่ (Wet Process Bore Pile) ที่รายงานโดย วันชัย (2540,2543) และ Teparaksa (2001)

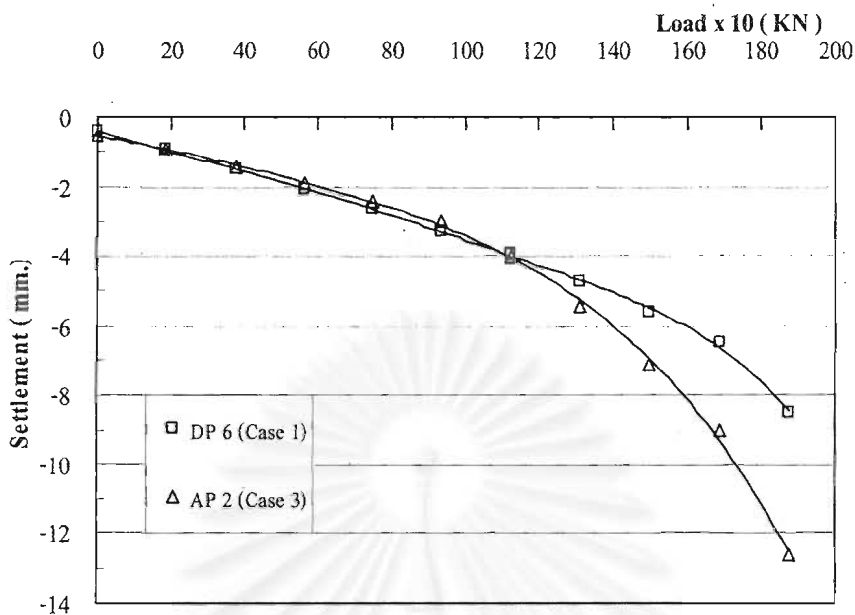
เมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม Auger press in clay with final drive ในกรณีที่ 2 และเสาเข็ม Auger press in clay with final drive into sand ในกรณีที่ 3 มาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าพฤติกรรมของเสาเข็มทั้งสองจะแตกต่างกันมาก ทั้งที่มีเทคนิคในการก่อสร้างที่ใกล้เคียงกัน และมีความยาวเสาเข็มเท่ากัน อันเกิดเนื่องจากผลกระทบที่กล่าวมาในข้างต้นสำหรับเสาเข็ม Auger press ในกรณีที่ 2



รูปที่ 4.8 Load Settlement Curve for tested Auger press pile Case 2 and Case 3

ข. Auger press in clay with final drive into sand เป็นการก่อสร้างเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 3 ซึ่งจะเหมือนกับการก่อสร้างเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 2 เพียงแต่ว่าในการตอกเสาเข็มหลังจาก Auger นั้นมีจำนวน blow สูงกว่ามาก และปลายของเสาเข็มก็จมอยู่ในชั้นทรายประมาณ 1.30 เมตร ซึ่งจากผลการทดสอบ Static pile Load Test พบว่ามีพฤติกรรมของเสาเข็มคล้ายกับเสาเข็มตอกที่ทำการก่อสร้างในกรณีที่ 1 เนื่องจากการทรุดตัวของเสาเข็มมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เพราะเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 3 นี้มีลักษณะการก่อสร้างเป็นเสาเข็มระบบตอกรวมอยู่ด้วย เพียงแต่เสาเข็มตอกในกรณีที่ 1 มีความยาวมากกว่าจึงส่งผลให้ค่าการทรุดตัวที่ Ultimate Load มีค่าน้อยกว่าเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 3

สถาบันวิทยบริการ
รณมหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 Load Settlement Curve for tested pile DP6 in Case 1 and AP2 in Case 3

ก. Full auger into sand layer with toe grout and redrive เป็นเทคนิคของการก่อสร้างเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 4 ซึ่งเริ่มก่อสร้างเสาเข็มด้วยการ Auger ลงไปถึงชั้นทรายชั้นแรกโดยมีปลายของเสาเข็มอยู่ฝังในชั้นทราย (Pile tip -20.0 ม., ชั้นทรายเริ่มจาก -18.0 ม.) เมื่อทำการก่อสร้างเสร็จในชั้นตอนนี้เสาเข็มจะมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่ใกล้เคียงกับเสาเข็ม Auger press pile ที่ทำการก่อสร้างในกรณีที่ 2 เนื่องจากมีลักษณะของวิธีการก่อสร้างที่คล้ายกัน และมีความยาวของเสาเข็มที่เท่ากัน จึงได้ทำการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็ม (Base Grout) และเมื่อทดสอบทำการทดสอบ Dynamic Pile Load Test เพื่อที่จะดูความสามารถของการรับน้ำหนักของเสาเข็มเมื่อทำการก่อสร้างเสร็จในชั้นตอนนี้ ซึ่งก็คือเสาเข็ม Fully auger press into sand with toe grout ดังแสดงผลไว้ใน ตารางที่ 4.2 พบว่าเสาเข็มเกือบทั้งหมดไม่สามารถรับน้ำหนักได้ตามที่ออกแบบไว้ เนื่องจากการเกิด Loosening ที่ปลายเสาเข็ม และการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มยังจะช่วยให้แรงเสียดทานผิว (Shaft Friction Capacity) ในชั้นทรายเพิ่มขึ้นด้วย อันเกิดจากน้ำปูนที่ทำการอัดฉีดที่ปลายเสาเข็มถูกผลักให้ไหลย้อนขึ้นมารอบ ๆ เสาเข็มและทำให้ Friction Factor (β) ในชั้นทรายเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลในชั้นดินเหนียวคือค่าของ Adhesion Factor (α) จะมีค่าเท่าเดิม ดังรายงานการวิจัยของ Teparaksa et al. (1999) และ วันชัย (2543,ข)

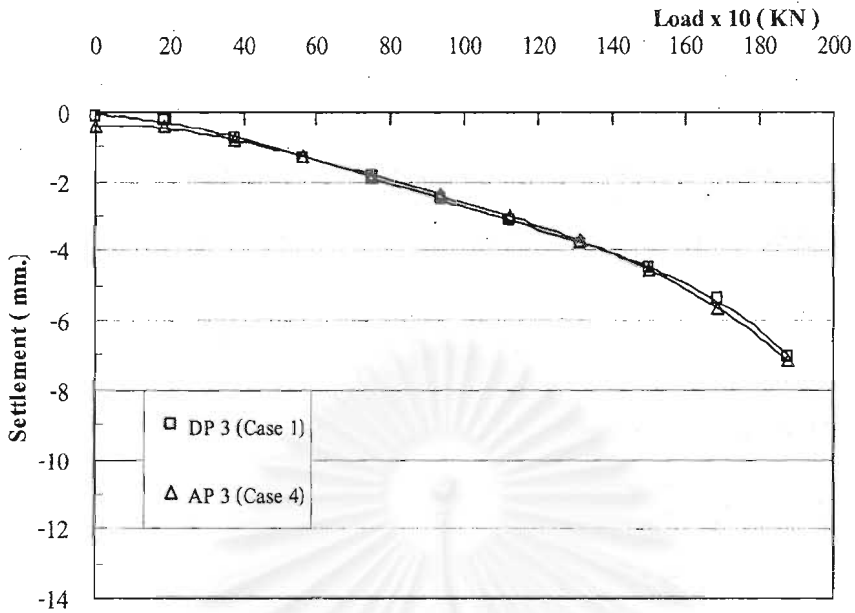
เสาเข็ม Fully auger press into sand layer with toe grout ถ้าทำการก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งไม่เกิด Boiling และ Loosening ที่ปลายเสาเข็มแล้ว เสาเข็มก็จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามที่ออกแบบไว้ ดังเช่นเสาเข็ม Pile No.9 ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และปริมาณน้ำปูนที่ใช้ในการทำ Base grout ยังลดลงมากกว่า 50% เมื่อเทียบกับการทำ Base grout ในกรณีที่เสาเข็มเกิด Loosening ที่ปลายของเสาเข็ม

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบ Dynamic Load Test ของเสาเข็ม Fully auger press into sand with toe grout ในโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปานครหลวง

Pile No.	Size x Depth m x m	Total CAPWAP Capacity Q_u (kN)	Shaft Friction Q_f (kN)	End Bearing Q_b (kN)	Stage Grout						Total Vol. of Grouting litre
					First stage		Second stage		Third stage		
					Vol. litre	Pressure (bar)	Vol. litre	Pressure (bar)	Vol. litre	Pressure (bar)	
4	0.5x20.0	984	662	322	510	10	400	16	400	17	1310
9	0.5x20.0	1784	1303	481	480	140	70	140	0	110	550
10	0.5x20.0	902	647	255	510	30	400	13	400	20	1310
11	0.5x20.0	1120	837	283	510	40	400	10	400	17	1310

Remarks : Base plug grout = 100 litre / Core plug grout = 120 litre

เนื่องจากเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างแบบ Fully auger press into sand layer with toe grout ส่วนใหญ่ไม่สามารถรับน้ำหนักได้จึงได้ทำการตอกเสาเข็มที่ฉีดอัดน้ำปูนลงไปอีกประมาณ 45 ซม. (Pile tip at -20.45 ม.) จากนั้นจึงทำการทดสอบแบบ Static Pile Load Test ซึ่งจะพบว่าค่าการทรุดตัว และพฤติกรรมของเสาเข็มจะดีขึ้น และคล้ายกับเสาเข็มตอกทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.10



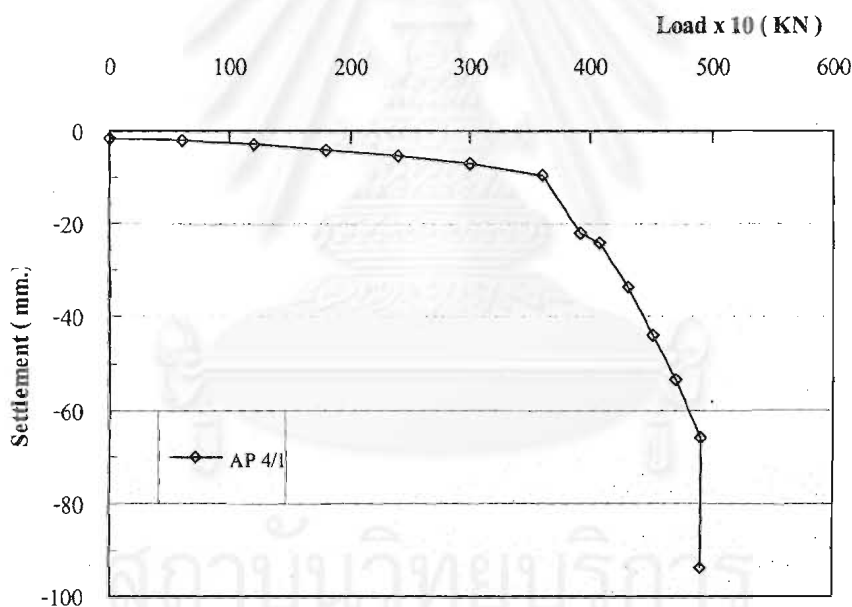
รูปที่ 4.10 Load Settlement Curve for tested pile DP3 in Case 1 and AP3 in Case 4

4.3.2 การรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม Auger Press Pile ที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม Auger press pile ที่มีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง ซึ่งเป็นเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างในโครงการก่อสร้างอาคารฝึกข่าวโผด สูง 21 ชั้น โดยสามารถที่จะแยกพิจารณาตามเทคนิคของการก่อสร้างเสาเข็มได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก. Full auger in clay with press into sand เป็นเทคนิคของการก่อสร้างเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีนี้ 5 ซึ่งทำการก่อสร้างโดยการ Auger ลงไปในดินจนถึงความลึกประมาณ 35.0 เมตร เพื่อให้ปลายเสาเข็มสูงกว่าชั้นทรายหรือตะกอนทรายพอดี โดยไม่ให้ทะลุลงไปชั้นทรายชั้นที่สอง เพื่อป้องกันผลกระทบของการเกิด Boiling และ Loosening ที่ปลายเสาเข็ม และเสาเข็มทดสอบในโครงการนี้หลังจาก Auger ลงไปที่ระดับความลึก ประมาณ 35.0 เมตร แล้วยังสามารถกดลงไปได้ถึงระดับ 35.89 เมตร หรือจมลงในชั้นทราย 0.39 เมตร เท่านั้น (ชั้นทรายเริ่มที่ความลึก -35.50 ม.) โดยขณะก่อสร้างไม่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแต่อย่างใด เนื่องจากมิได้มีการตอกเสาเข็ม เมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จได้ทำการวัดระดับน้ำภายในเสาเข็ม Spun pile โดยทันที พบว่าไม่มีน้ำใต้ดินไหลเข้าสู่เสาเข็ม (Inner Core) ทั้งนี้เนื่องจากภายใน Inner Core จะกลวงเพราะได้ Auger เอาดินออกหมดแล้ว จึงทำการกรอกน้ำภายในเสาเข็ม Spun pile ทันทีจนเต็ม จากนั้นทิ้งไว้และทำการตรวจวัดน้ำโดยตลอด ซึ่งจากการตรวจวัดพบว่าระดับน้ำอยู่ที่ผิวดิน ไม่ได้ลดลงไปจนถึงระดับ

Piezometric Level ที่ -23.0 เมตร ทั้งนี้หากระดับน้ำลดลงไปถึง Piezometric Level แสดงว่าที่ปลายของเสาเข็มเกิดการ Loosening และทรายทะเล็กเข้าสู่ภายในเสาเข็มและระดับน้ำใต้ดินจริงจะสามารถตรวจพบได้ แต่จากการทิ้งไว้ 2 สัปดาห์ ระดับน้ำภายในเสาเข็ม Spun ยังคงอยู่ที่ระดับผิวดินนั้นแสดงว่าเกิด Soil Plug ขึ้นที่ปลายเสาเข็ม และแรงดันที่ปลายเสาเข็มจะเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ากรณีการเกิด Loosening เสาเข็มต้นดังกล่าวหลังจากทิ้งไว้ 2 สัปดาห์ ได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักด้วยวิธี Static Pile Load Test ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 จากผลการทดสอบพบว่าเสาเข็มสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ถึง 491 ตัน (4,910 kN) หรือมีค่า safety Factor เท่ากับ 2 เท่าของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ 240 ตัน (2,400 kN) ซึ่งสามารถคาดคะเนได้ว่าการก่อสร้างเสาเข็ม Auger press แบบ Full auger with press into sand จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าเสาเข็ม Auger press ในกรณีที่ 2 ที่ทำการก่อสร้างในโครงการโรงกรองน้ำ เมื่อนำมาทำการก่อสร้างด้วยเสาเข็มและชั้นดินที่เหมือนกัน

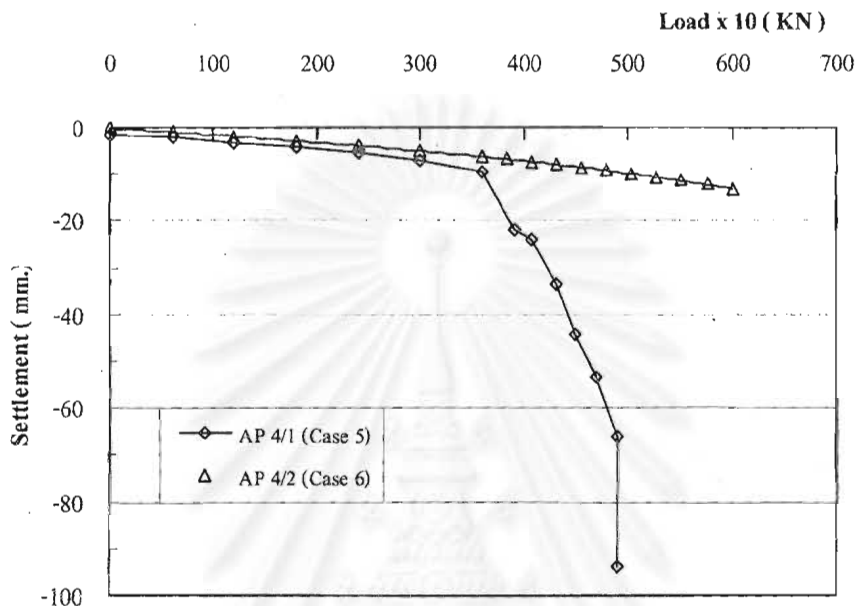


รูปที่ 4.11 Load Settlement Curve for tested pile AP 4/1 in Case 5

ข. Full auger in clay with press into sand with single stage of grout เป็นเทคนิค

การก่อสร้างเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 6 ซึ่งเสาเข็มต้นที่นำมาวิจัยนี้ เป็นการปรับปรุงคุณภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็ม Full auger with press into sand โดยการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม การอัดฉีดน้ำปูนจะทำเพียงขั้นตอนเดียว (Single Stage) โดยใช้ปริมาณน้ำปูน (Grouting Cement) เพียง 50 % ของกรณีก่อสร้างเสาเข็มแบบ Full auger in sand with two stage of grout ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ทั้งที่มีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเดียวกัน และมีขนาดของเสาเข็มที่เท่ากัน จาก

ผลการทดสอบ Static Pile Load Test พบว่าเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 5 เมื่อทำการปรับปรุงโดยการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มแล้วจะทำให้เสาเข็มมีพฤติกรรมที่ดีขึ้นและความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มก็เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12

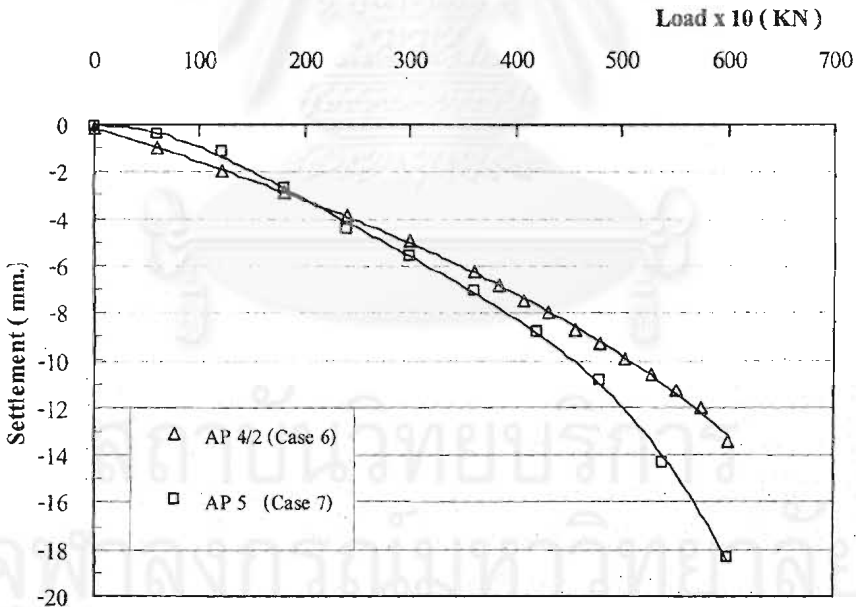


รูปที่ 4.12 Load Settlement Curve for tested pile AP 4/1 in Case 5 and AP 4/2 in Case 6

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าปริมาณน้ำปูนในการทำ Base grout ของเสาเข็ม AP 4/2 และ AP 5

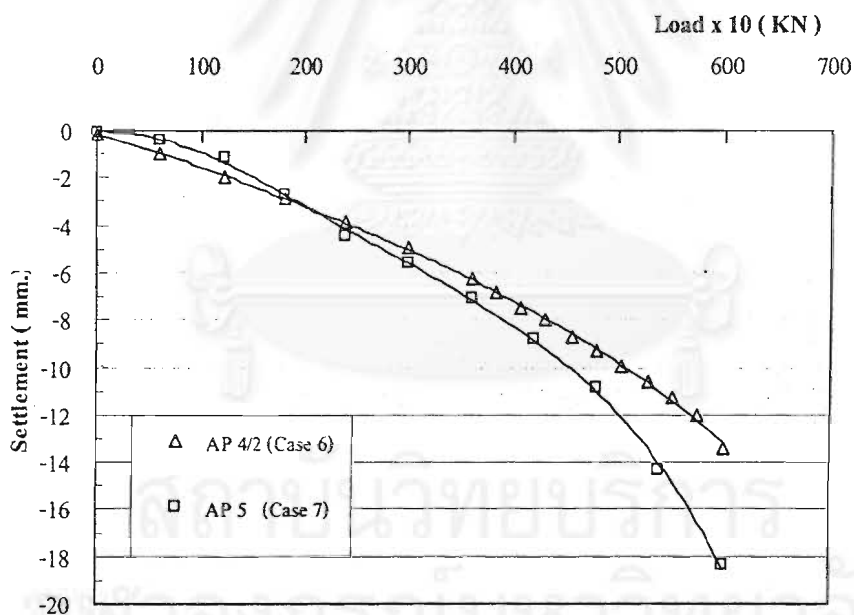
Pile No.	Size x Depth m x m	Plug Grout		Stage Grout						Total Vol. of Grouting, litre	Remarks
		Base plug grout	Core plug grout	First stage			Second stage				
				Vol.	w:c ratio	Pres sure (bar)	Vol.	w:c ratio	Pres sure (bar)		
				litre			litre				
AP4/2	0.8x35.89	140	180	760/ 420	0.8/ 0.6	25/ 30	-	-	-	1500	-Break pressure / First stage -Plug grout w:c 0.6
AP5	0.8x38.00	-	608.6	1207	0.7	12	1207	0.7	24	3022	-Plug grout w:c 0.7

ค. Full auger in sand with two stage of grout เป็นเทคนิคของการก่อสร้างเสาเข็ม Auger press ในกรณีที่ 7 โดยทำการ Full auger จนปลายเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง ที่ความลึก 37.04 เมตร จากการเจาะเอาดินขึ้นดังกล่าว พบว่าปลายเสาเข็มจมลงไปในชั้นทรายชั้นที่สองถึง 1.54 เมตร ซึ่งหากอ้างอิงจากเสาเข็มในโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำ ซึ่งพบว่า เสาเข็ม Auger press pile ที่ทำการก่อสร้างด้วยวิธี Full auger จนถึงชั้นทรายจะเกิดปัญหา Piping ของทราย และ Loosening ที่ปลายของเสาเข็ม ดังนั้นเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างด้วยวิธีนี้จึงทำการอัดฉีดน้ำปูนเป็น 2 ขั้นตอน (Two Stage Grouting) โดยอัดฉีดน้ำปูนเป็นจำนวนมากมาย และเมื่อทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธี Static Pile Load Test พบว่าเสาเข็มสามารถรับน้ำหนักที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 600 ตัน (6,000 kN) ได้ มีค่า Safety Factor เท่ากับ 2.5 เท่า ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ 240 ตัน (2,400 kN) และเมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 6 ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าเสาเข็มที่ก่อสร้างด้วยวิธีนี้จะมีค่ากำลังรับน้ำหนักลดลงบ้างเมื่อเทียบกับเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 6 เนื่องจากการเกิด Piping และ Loosening ที่ปลายเสาเข็มก่อนการทำ Stage grouting



รูปที่ 4.13 Load Settlement Curve for tested pile AP 4/2 in Case 6 and AP 5 in Case 7

ค. Full auger in sand with two stage of grout เป็นเทคนิคของการก่อสร้างเสาเข็ม Auger press ในกรณีที่ 7 โดยทำการ Full auger จนปลายเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง ที่ความลึก 37.04 เมตร จากการเจาะเอาดินขึ้นดังกล่าว พบว่าปลายเสาเข็มจมลงไปชั้นทรายชั้นที่สองถึง 1.54 เมตร ซึ่งหากอ้างอิงจากเสาเข็มในโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำ ซึ่งพบว่า เสาเข็ม Auger press pile ที่ทำการก่อสร้างด้วยวิธี Full auger จนถึงชั้นทรายจะเกิดปัญหา Piping ของทราย และ Loosening ที่ปลายของเสาเข็ม ดังนั้นเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างด้วยวิธีนี้จึงทำการอัดฉีดน้ำปูนเป็น 2 ขั้นตอน (Two Stage Grouting) โดยอัดฉีดน้ำปูนเป็นจำนวนมากมาย และเมื่อทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธี Static Pile Load Test พบว่าเสาเข็มสามารถรับน้ำหนักที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 600 ตัน (6,000 kN) ได้ มีค่า Safety Factor เท่ากับ 2.5 เท่า ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ 240 ตัน (2,400 kN) และเมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 6 ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าเสาเข็มที่ก่อสร้างด้วยวิธีนี้จะมีค่ากำลังรับน้ำหนักลดลงบ้างเมื่อเทียบกับเสาเข็ม Auger press pile ในกรณีที่ 6 เนื่องจากการเกิด Piping และ Loosening ที่ปลายเสาเข็มก่อนการทำ Stage grouting



รูปที่ 4.13 Load Settlement Curve for tested pile AP 4/2 in Case 6 and AP 5 in Case 7

4.4 การเปรียบเทียบและอภิปรายผลของการรับน้ำหนักของเสาเข็ม Spun piles ที่มีการก่อสร้างด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

เสาเข็ม Spun pile ที่ก่อสร้างด้วยเทคนิคการก่อสร้างที่แตกต่างกันมีผลต่อการทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำโดยสามารถแยกพิจารณาเสาเข็ม Spun pile ออกเป็น 2 กรณี ตามขนาดของเสาเข็มและตำแหน่งที่ตั้งของโครงการคือ เสาเข็มที่รวบรวมจากโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปานครหลวงและโครงการก่อสร้างอาคารฝึกข้าวโพดสูง 21 ชั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เสาเข็ม Spun pile ที่รวบรวมจากโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปานครหลวง เป็นเสาเข็มที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.50 ม. และมีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรกซึ่งเสาเข็ม Spun pile ในโครงการนี้ทำการก่อสร้างด้วยเทคนิคการก่อสร้างที่แตกต่างกัน 4 แบบ คือ Full drive with tip in sand , Auger press in clay with final drive (Blow in final drive is small) , Auger press in clay with final drive into sand และ Full auger into sand layer with toe grout and redrive ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 จะพบว่า ที่น้ำหนักออกแบบ 75 ตัน (750 kN) เสาเข็มที่ Spun pile ที่ก่อสร้างแบบ Auger press in clay with final drive (Blow in final drive is small) มีการทรุดตัวที่หัวเสาเข็มมากถึง 71.80 มม. และไม่สามารถทดสอบถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ส่วนเสาเข็ม Spun pile ที่ก่อสร้างแบบ Full drive with tip in sand , Auger press in clay with final drive into sand และ Full auger into sand layer with toe grout and redrive จะมีการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกันคือ 2.39 มม. 2.42 มม. และ 1.84 มม. ตามลำดับ และที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 187.5 ตัน (1875 kN) เสาเข็มที่ทำการก่อสร้างโดยวิธี Auger press in clay with final drive into sand จะมีค่าการทรุดตัวมากที่สุดคือ 12.62 มม. สำหรับเสาเข็มที่ก่อสร้างแบบ Full drive และ Full auger into sand layer with toe grout and redrive มีค่าการทรุดตัวที่เกือบจะเท่ากันคือ 7.52 มม. และ 7.14 มม. ตามลำดับ

เสาเข็ม Spun pile ในโครงการก่อสร้างอาคารฝึกข้าวโพดสูง 21 ชั้น เป็นเสาเข็มที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 ม. และมีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองที่ความลึกประมาณ 35.5 ม. โดยเสาเข็มในโครงการนี้ใช้เทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มด้วยกัน 3 แบบ คือ Full auger in clay with press into sand , Full auger in clay with press into sand with single stage of grout และ Full auger in sand with two stage of grout ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่าที่น้ำหนักออกแบบ 240 ตัน (2400 kN) เสาเข็มที่ทำการก่อสร้างด้วยวิธี Full auger in clay with press into sand มีการทรุดตัวมากที่สุดคือ 5.53 มม. ส่วนเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างแบบ Full auger in clay with press into sand with single stage of grout และ Full auger in sand with two stage of grout มีการทรุดเท่ากับ 3.87 มม. และ

4.41 มม. ตามลำดับ และที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 600 ตัน (6000 kN) เสาค้ำ Full auger in clay with press in sand สามารถรับน้ำหนักได้เพียง 491 ตัน (4910 kN) และมีการทรุดตัวมากถึง 93.88 มม. เสาค้ำที่ทำการก่อสร้างแบบ Full auger in sand with two stage of grout มีการทรุดตัวเท่ากับ 18.37 มม. ซึ่งมีค่ามากกว่าเสาค้ำที่ทำการก่อสร้างแบบ Full auger in clay with press into sand with single stage of grout ที่มีการทรุดตัวของเสาค้ำเท่ากับ 13.40 มม. ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด ความแตกต่างของการทรุดตัวของเสาค้ำจะมากขึ้นแสดงว่าความสามารถในการรับน้ำหนักที่ปลายเสาค้ำแตกต่างกัน เนื่องจากผลกระทบที่เกิดจากเทคนิคของการก่อสร้างเสาค้ำ Spun pile ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการทรุดตัวของเสาค้ำ Spun Pile ที่รวบรวมจากโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปานครหลวง

Case	Type of Pile Installation	Pile Size (m)	Pile Tip (m)	Settlement (mm.)		Remark
				At Design Load 750 kN	At Ultimate Load 1875 kN	
1	Full drive with tip in sand	0.50	22.30	2.39	7.52	DP-1, See all in table 4.1
2	Auger press in clay with final drive (Blow in final drive is small)	0.50	19.30	71.80	Can Load only 750 kN	AP-1
3	Auger press in clay with final drive into sand	0.50	19.30	2.42	12.62	AP-2
4	Full auger into sand layer with toe grout and redrive	0.50	20.45	1.84	7.14	AP-3

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม Spun Pile ที่รวบรวมจากโครงการก่อสร้างอาคารฝึก
ข้าวโพด สูง 21 ชั้น

Case	Type of Pile Installation	Pile Size (m)	Pile Tip (m)	Settlement (mm.)		Remark
				At Design Load 2400 kN	At Ultimate Load 6000 kN	
5	Full auger in clay with press into sand	0.80	35.89	5.53	Can Load up to only 4910 kN (93.88mm)	AP 4/1
6	Full auger in clay with press into sand with single stage of grout	0.80	35.89	3.87	13.40	AP 4/2
7	Full auger in sand with two stage of grout	0.80	37.04	4.41	18.37	AP 5

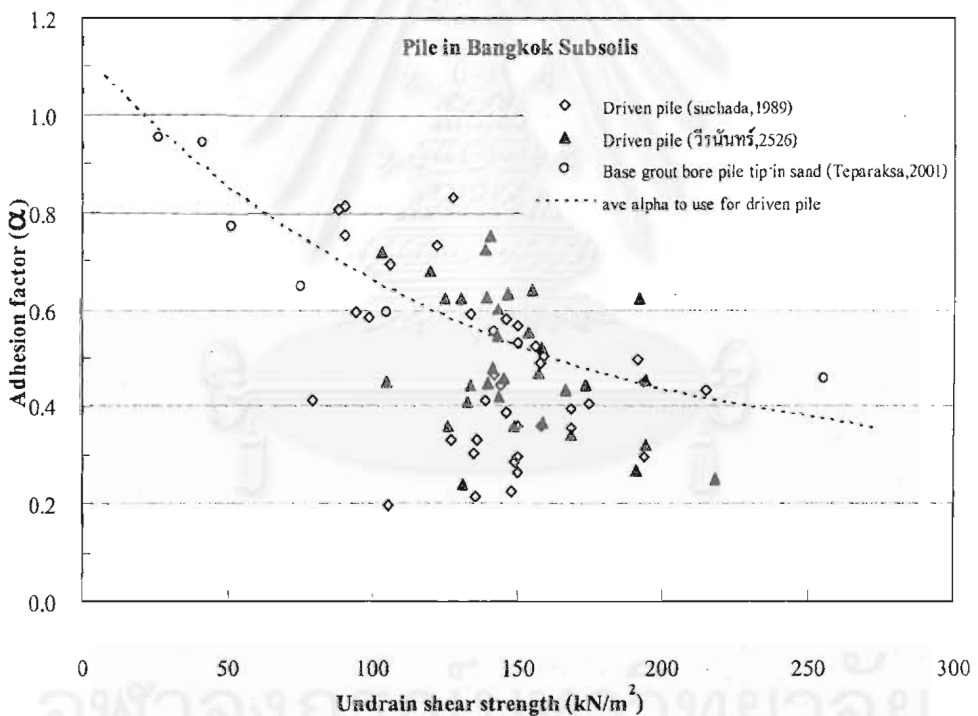
4.5 การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้าง

การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มจะแสดงในรูปของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในเรื่องการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว โดยวิธีสถิติศาสตร์ในบทที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่ค่า Adhesion factor (α) และค่า Friction factor β ($K_s \tan \delta$) สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวและชั้นทรายตามลำดับ

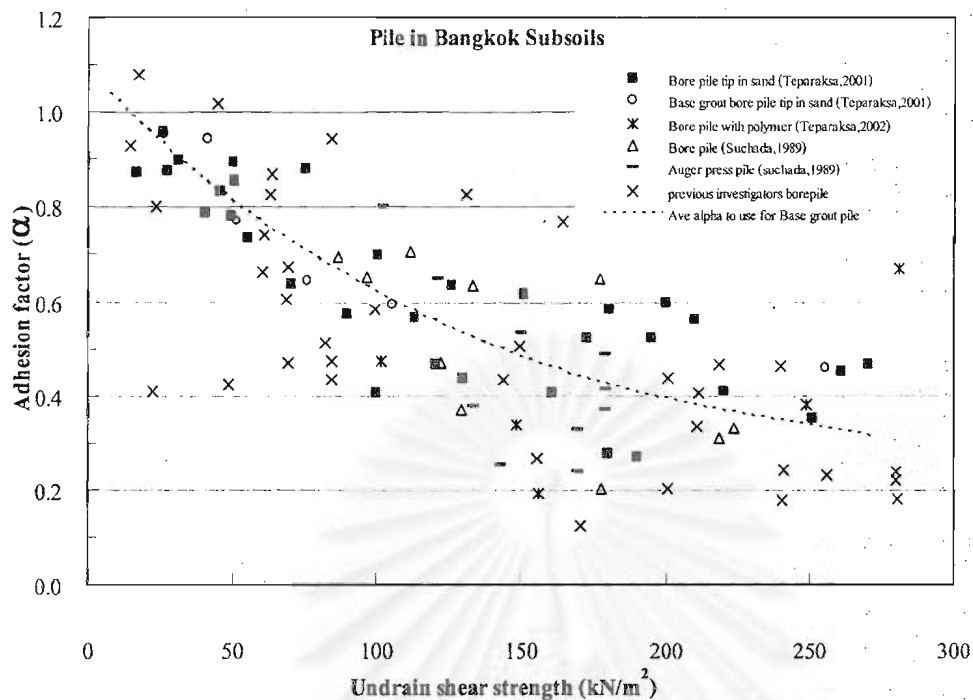
การหาค่า Friction factor β ($K_s \tan \delta$) ต้องทำการวิเคราะห์หาค่ากลับ (Back Analysis) จากค่าแรงเสียดทาน (f) ที่ค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม (Deformation at pile top) ที่ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) และค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มสามารถประมาณได้จาก Load Settlement Curve สำหรับค่า Adhesion factor (α) หากจากการทำการวิเคราะห์หาค่ากลับจากแรงเสียดทานในดินเหนียวโดยแทนค่า β ที่ทำได้ในการคำนวณแรงเสียดทานในชั้นทราย รายละเอียดของการวิเคราะห์หามีดังนี้

4.5.1 Friction factor β ($K_s \tan \delta$)

ค่าพารามิเตอร์ในการประมาณค่าแรงเสียดทานในชั้นทรายคือค่า β (Burland, 1973) ที่มีค่าเท่ากับ $K_s \tan \delta$ ซึ่งสามารถหาได้โดยวิธีการวิเคราะห์หาค่ากลับจากค่าแรงเสียดทาน (f_s) ในชั้นทรายที่ค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม (Deformation at pile top) ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) และค่าแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวคิดจากค่า Adhesion factor จากข้อมูลที่มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยผลของการวิเคราะห์แสดงไว้ในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง $K_s \tan \delta$ กับค่ามุม ϕ' โดยค่า Effective Overburden Pressure (σ_{vi}') ณ จุดกึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณา และพิจารณาผลของการสูบน้ำบาดาลโดยใช้ Drawdown Stress ในการคำนวณ โดยที่รายละเอียดของการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ง และผลการวิเคราะห์แยกตามประเภทของเสาเข็มในงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.14 ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion factor (α) กับ S_u สำหรับเสาเข็มตอก

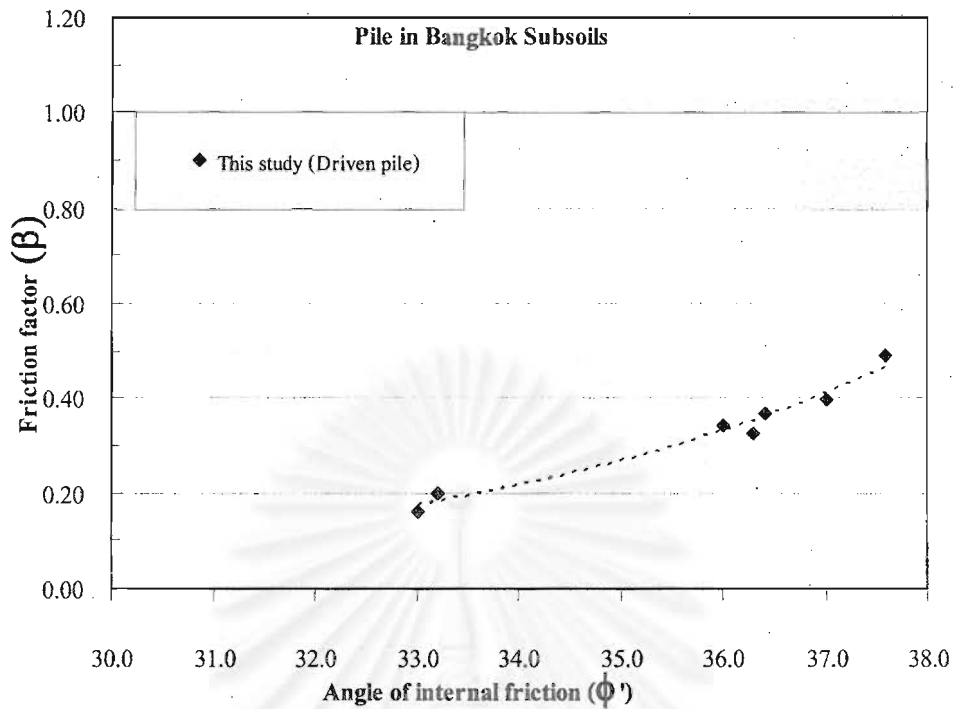


รูปที่ 4.14 ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion factor (α) กับ S_u สำหรับเสาเข็มที่ทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลาย

4.5.1.1 เสาเข็มตอก

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง β กับค่ามุม ϕ' สำหรับเสาเข็มตอกจำนวน 6 ต้น ที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นแรกโดยแบ่งชั้นทรายออกเป็น Medium Sand กับ Dense Sand สามารถหาค่าของ β กับค่ามุม ϕ' ดังแสดงในรูปที่ 4.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



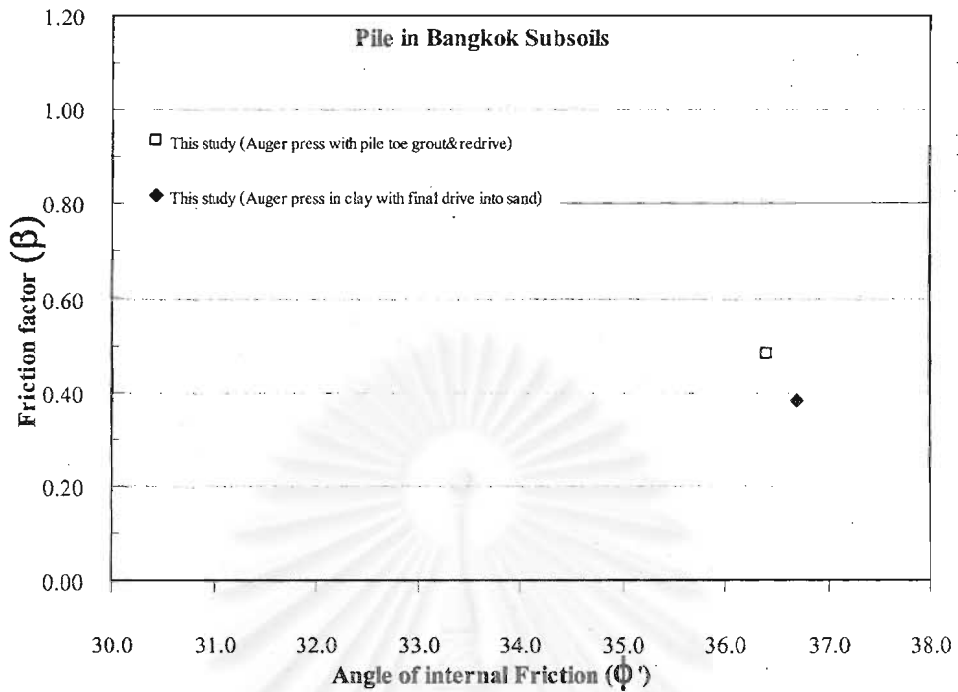
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับค่ามุม ϕ' ของเสาเข็มตอก (คิด Drawdown Stress)

4.5.1.2 เสาเข็ม Auger press pile

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง β กับค่ามุม ϕ' สำหรับเสาเข็ม Auger press pile จำนวนทั้งหมด 5 ต้น โดยสามารถแยกพิจารณาตามลักษณะของวิธีการก่อสร้างได้ ดังนี้

ก. เสาเข็ม Auger press pile ที่มีการตอกเสาเข็มในระบบของการก่อสร้าง

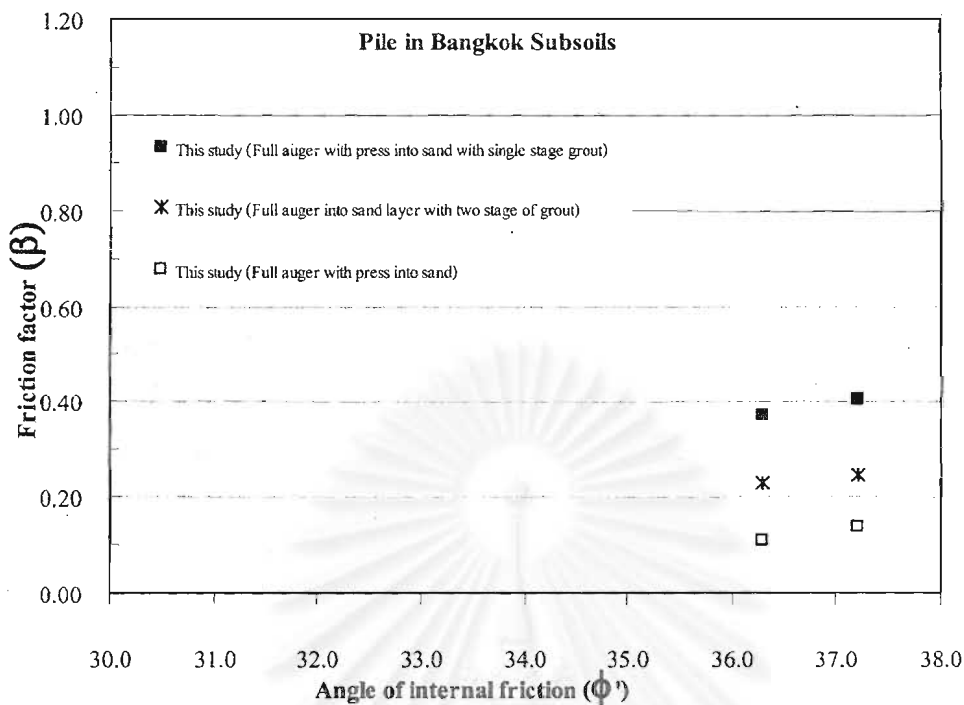
เสาเข็ม Auger press pile ที่มีการตอกเสาเข็มในระบบของการก่อสร้างนี้มีจำนวน 2 ต้น คือ เสาเข็มแบบ Auger press in clay with final drive in sand กับเสาเข็มแบบ Full Auger into sand layer with toe grout and redrive ซึ่งเสาเข็มทั้ง 2 ต้นนี้มีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก และมีการตอกเสาเข็มที่ความลึกสุดท้ายของการก่อสร้างเสาเข็ม ดังนั้นจึงใช้ค่า Adhesion factor (α) ในรูปที่ 4.14 ก เพื่อใช้ในการหาค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มในดินเหนียวเพื่อทำการวิเคราะห์กลับจากค่าแรงเสียดทาน (f_s) ในชั้นทราย ได้ค่าของ β เทียบกับค่ามุม ϕ' ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงค่า β เทียบกับค่ามุม ϕ' ของเสาเข็ม Auger press ที่มีระบบตอกในการก่อสร้าง (คิด Drawdown Stress)

ข. เสาเข็ม Auger press ที่ทำการก่อสร้างโดยไม่ใช้ระบบตอก

เสาเข็ม Auger press ที่ทำการก่อสร้างโดยไม่ใช้ระบบตอก มีจำนวน 3 ต้น คือ เสาเข็มแบบ Full auger with press into sand , Full auger with press into sand with single stage of grout และเสาเข็มแบบ Full auger in sand with two stage of grout โดยเสาเข็มทั้งหมดจะมีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองที่ระดับความลึกประมาณ -37.0 เมตร. และเสาเข็มทั้งสามแบบใช้ค่า Adhesion factor (α) ในรูปที่ 4.14ข ในการคำนวณหาค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มในดินเหนียว เนื่องจาก ผลจากการ Grouting ไม่ทำให้ค่า Adhesion factor (α) ในดินเหนียวเพิ่มขึ้น สำหรับค่า β ในชั้นทรายเมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าแรงเสียดทาน (f) ในชั้นทราย ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงค่า β เทียบกับค่ามุม ϕ' ของเสาเข็ม Auger press ที่ไม่มีการตอกเสาเข็มในการก่อสร้าง (คิด Drawdown Stress)

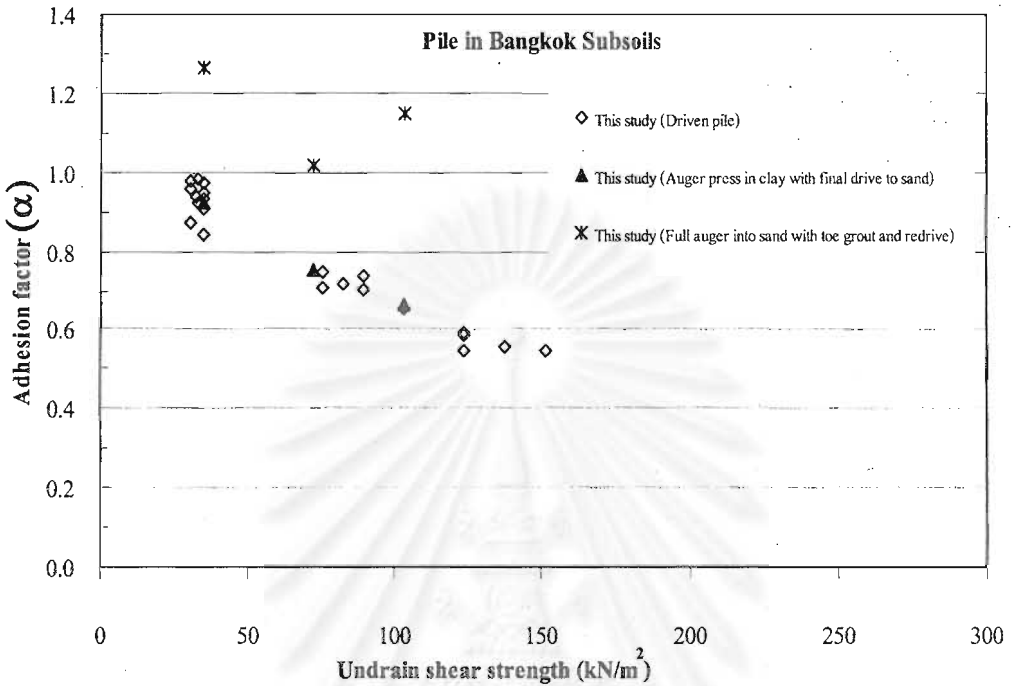
4.5.2 Adhesion factor (α)

ค่า α สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวที่ได้ในงานวิจัยมาจากการแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Static Pile Load Test มีจำนวนทั้งหมด 10 ต้น โดยแยกตามผลกระทบจากวิธีการก่อสร้างได้ดังนี้

4.5.2.1 เสาเข็มที่ทำการก่อสร้างโดยระบบตอก

เสาเข็มที่ทำการก่อสร้างโดยระบบตอกที่นำมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่า Adhesion (α) มีทั้งหมดจำนวน 8 ต้น คือ เสาเข็ม DP1 , DP2 , DP3 , DP4 , DP5 , DP6 ซึ่งเป็นเสาเข็มตอก และเสาเข็ม AP2 กับ AP3 ซึ่งเป็นเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างแบบ Auger press in clay with final drive และ Full auger into sand with toe grout and redrive ตามลำดับ โดยเสาเข็มทั้งหมดมีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก ในการหาค่า Adhesion factor (α) ในกรณีนี้ หาได้โดยวิธีการวิเคราะห์กลับจากค่าแรงเสียดทานด้านข้าง (f_s) ของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว และในกรณีที่เสาเข็มอยู่ในชั้นทราย จะใช้ค่า $K_s \tan \delta$ ที่แสดงในรูปที่ 4.15 เพื่อใช้ในการหาค่าแรงเสียดทานด้านข้างของ

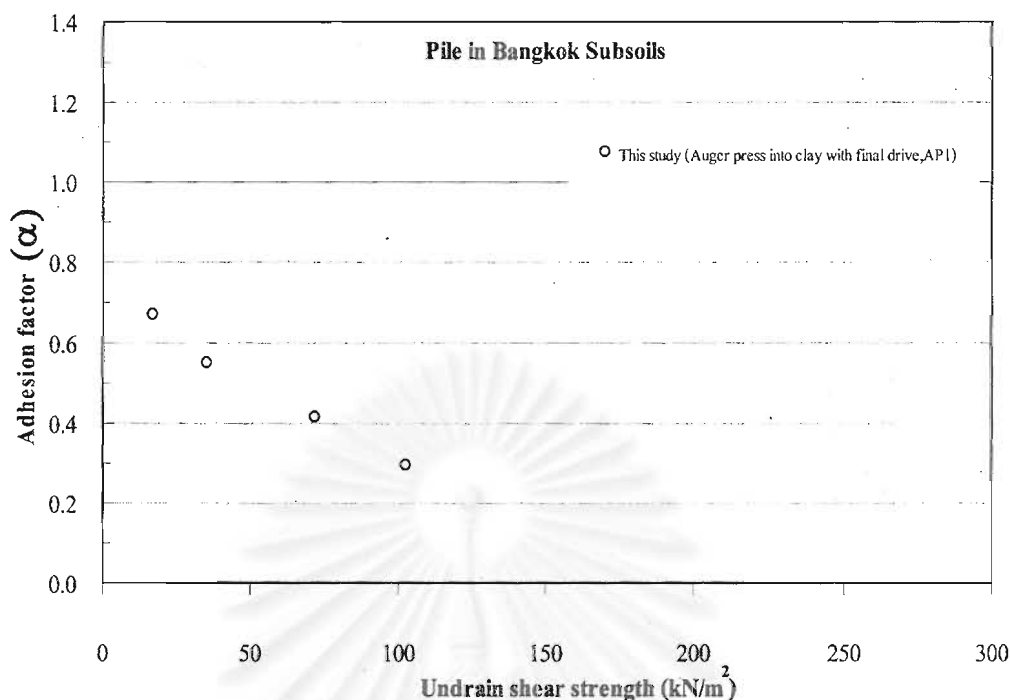
เสาเข็มในชั้นทราย โดยผลการวิเคราะห์ในแต่ละชั้นดินแสดงไว้ในภาคผนวก ง และความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion factor (α) กับค่า Undrain Shear Strength แสดงไว้ในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion factor (α) กับ S_u สำหรับเสาเข็มที่มีการตอกอยู่ในเทคนิคของการก่อสร้าง

4.5.2.2 เสาเข็มที่ทำการก่อสร้างโดยระบบ Auger with press

เสาเข็มในกรณีนี้ที่นำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่า Adhesion factor (α) คือเสาเข็ม API ซึ่งทำการก่อสร้างแบบ Auger press in clay with final drive เนื่องจากในการตอกเสาเข็มที่ระยะสุดท้ายมีจำนวนครั้งการตอกน้อยมาก ประมาณ 5 ครั้ง / ฟุต เสาเข็มต้นนี้จึงมีพฤติกรรมเสมือนเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างแบบ Auger with press ในการหาค่า Adhesion factor (α) ของเสาเข็มในกรณีนี้ทำโดยการ trial & error ค่าของ Adhesion factor (α) โดยรายการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ง และค่าความสัมพันธ์ของ Adhesion factor (α) กับ Undrain Shear Strength (S_u) แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion factor (α) กับ S_u สำหรับเสาเข็มที่มีการ Auger with press in clay

4.6 การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

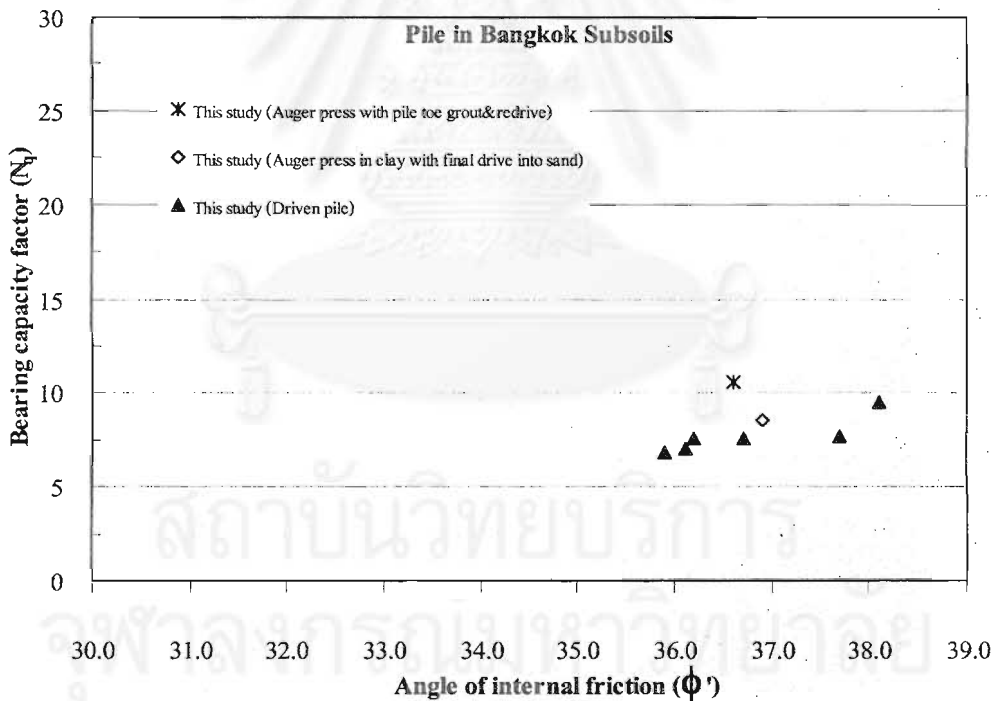
การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มสำหรับผลวิเคราะห์ที่ได้จากการรวบรวมข้อมูล การทดสอบเสาเข็ม Spun pile ที่ทำการก่อสร้างด้วยเทคนิคต่าง ๆ ในชั้นดินกรุงเทพฯ ซึ่งปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นที่แตกต่างกัน 2 สภาวะ คือ เสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก และเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง ผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปค่าของพารามิเตอร์ Bearing Capacity Factor (N_q) โดยค่า Effective Overburden Pressure (σ'_{vo}) ที่ใช้ในการวิเคราะห์จะพิจารณาผลของการสูบน้ำบาดาลโดยใช้ Drawdown Stress ในการคำนวณ

ค่า N_q จะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับ ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') โดยทั่วไปพบว่าค่า N_q จะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุม ϕ' และจากการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงในตัวในตัวของเสาเข็มพบว่า แรงเสียดทานที่หัวเสาเข็มจะถูกพิจารณาจนถึงค่าสูงสุดก่อนการพัฒนาจนถึงจุดสูงสุดของแรงต้านที่ปลายเข็ม ในขั้นตอนการทดสอบเสาเข็มที่ทำการถ่ายน้ำหนักบรรทุกให้แก่เข็มจนถึงค่า 2.5 เท่า ของน้ำหนักบรรทุกใช้งานแล้วหยุดการทดสอบ พบว่าค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มยังไม่พัฒนาถึงจุดวิบัติเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์หาค่า N_q ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดสำหรับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่หาโดยทฤษฎีของ Mazurkiewicz (1970) ที่ได้จาก

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวที่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกนี้ (Load – Settlement relationship) รายละเอียดในการคำนวณหา N_u แสดงไว้ในภาคผนวก ง และผลของการวิเคราะห์หาค่า Bearing Capacity (N_u) แยกตามลักษณะของการก่อสร้างได้ดังต่อไปนี้

4.6.1 เสาเข็ม Spun pile ที่มีการตอกเสาเข็มในการก่อสร้าง

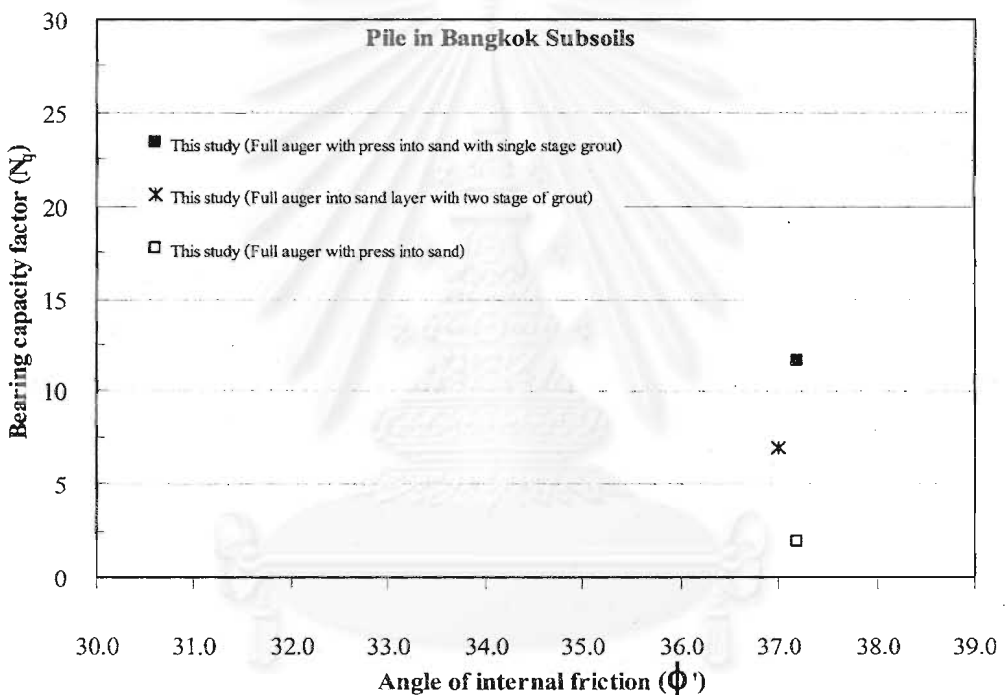
เสาเข็ม Spun pile ที่มีการตอกเสาเข็มในการก่อสร้าง มีจำนวนทั้งหมด 8 ต้น โดยแบ่งตามเทคนิคของการก่อสร้าง คือ ก่อสร้างโดยการตอกจำนวน 6 ต้น ก่อสร้างแบบ Auger press in clay with final drive into sand (AP2) จำนวน 1 ต้น และการก่อสร้างแบบ Full Auger into sand with toe grout and redrive (AP3) จำนวน 1 ต้น โดยเสาเข็มทั้งหมดมีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก สำหรับรายละเอียดผลการวิเคราะห์หาค่า Bearing Capacity Factor (N_u) ของเสาเข็มทั้ง 8 ต้น แสดงไว้ในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_u กับ ค่ามุม ϕ' ของเสา Spun pile ที่มีการตอกเสาเข็มในการก่อสร้างด้วย (คิด Drawdown Stress)

4.6.2 เสาเข็ม Spun pile ที่ทำการก่อสร้างโดยการ Auger press และไม่มีการตอกเสาเข็มเพิ่ม

เสาเข็ม Spun pile ที่ก่อสร้างด้วยเทคนิคนี้ มีจำนวนทั้งหมด 3 ต้น และมีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง โดยแบ่งตามเทคนิคการก่อสร้าง คือ Full auger with press into sand , Full auger with press into sand with single stage of grout และเทคนิคการก่อสร้างแบบ Full auger into sand layer with two stage of grout ผลการวิเคราะห์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bearing Capacity Factor (N_q) ของเสาเข็มทั้ง 3 ต้น แสดงไว้ในรูปที่ 4.21



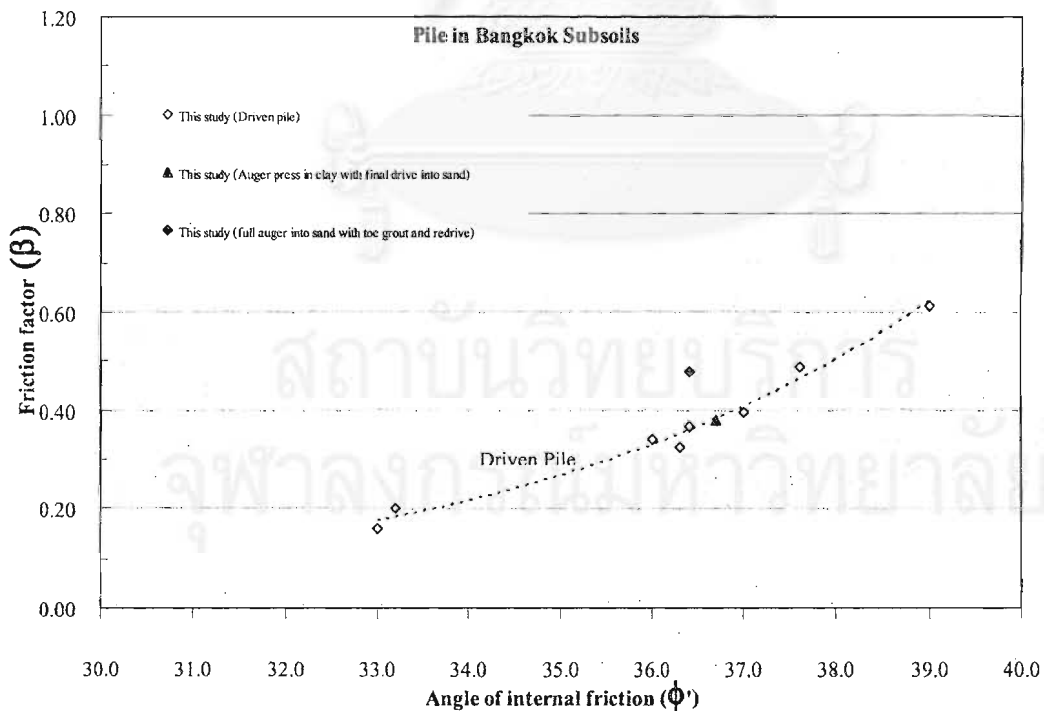
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับ ค่ามุม ϕ' ของเสา Spun pile ที่มีทำการก่อสร้างโดยการ Auger press แบบต่าง ๆ และไม่มีการตอกเสาเข็มเพิ่ม (คิด Drawdown Stress)

4.7 การเปรียบเทียบ และอภิปรายค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มในแต่ละประเภท

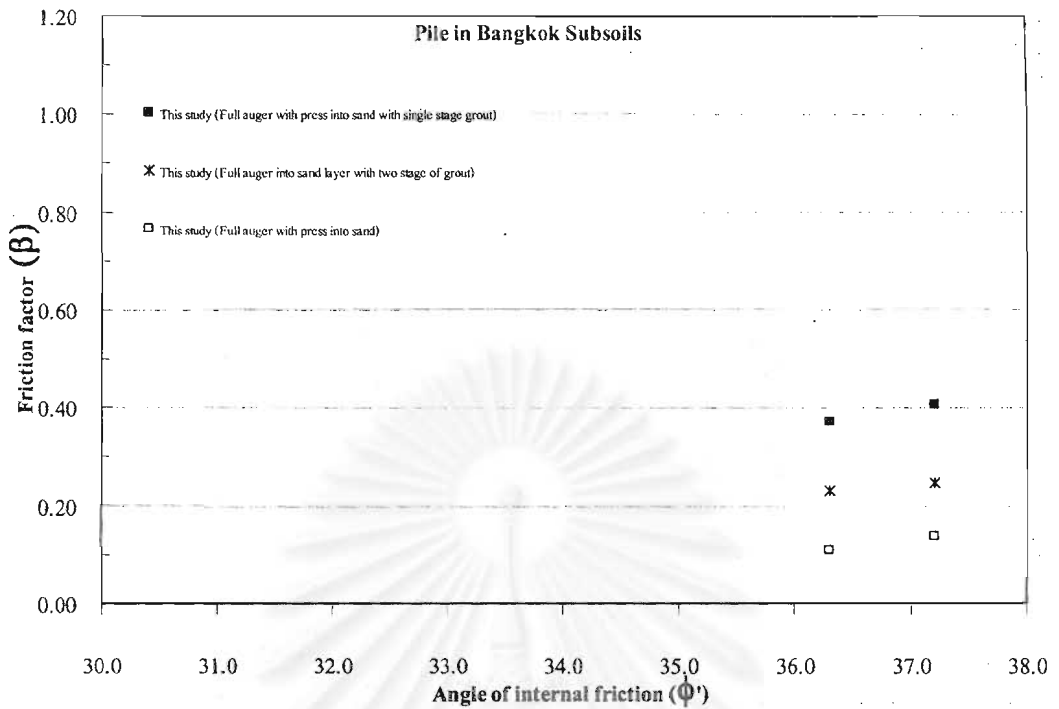
ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ค่า Adhesion factor (α) สำหรับชั้นดินเหนียว และค่า Friction factor β ($K_s \tan \delta$) กับค่า Bearing Capacity Factor (N_q) สำหรับชั้นดินทราย โดยเปรียบเทียบตามประเภทของเสาเข็มที่รวบรวมได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.7.1 ค่า Friction factor β ($K_s \tan \delta$)

ค่า Friction factor β ($K_s \tan \delta$) สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นทรายที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้เมื่อพิจารณาในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับค่า ϕ' จากรูป 4.15 , 4.16 และ 4.17 พบว่า β ของเสาเข็มมีค่าที่แตกต่างกันตามเทคนิคของการก่อสร้างเสาเข็มในแต่ละแบบ ดังแสดงในรูป 4.22 และ รูปที่ 4.23 โดยที่เสาเข็มที่ทำการก่อสร้างแบบ Auger press in clay with final drive into sand และ Full auger in sand with toe grout and redrive จะมีค่า β ที่ใกล้เคียงกับค่า β ของเสาเข็มตอก ซึ่งเสาเข็มทั้งสองชนิดที่กล่าวมาจะมีการตอกเสาเข็มในการก่อสร้างด้วย โดยทั้งหมดเป็นเสาเข็มจากโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปา สำหรับเสาเข็มจากโครงการก่อสร้างอาคารฝึกข้าวโพด สูง 21 ชั้น พบว่า เสาเข็มแบบ Full auger with press into sand with single stage of grout มีค่า β ที่สูงกว่าการก่อสร้างแบบ Full auger into sand layer with two stage of grout ซึ่งมีผลมาจากการเกิด Loosening ที่ปลายเสาเข็มของเทคนิคการก่อสร้างแบบ Full auger into sand layer with two stage of grout ก่อนทำ stage grout และเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างแบบ Auger with press into sand จะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างด้วยวิธีอื่น



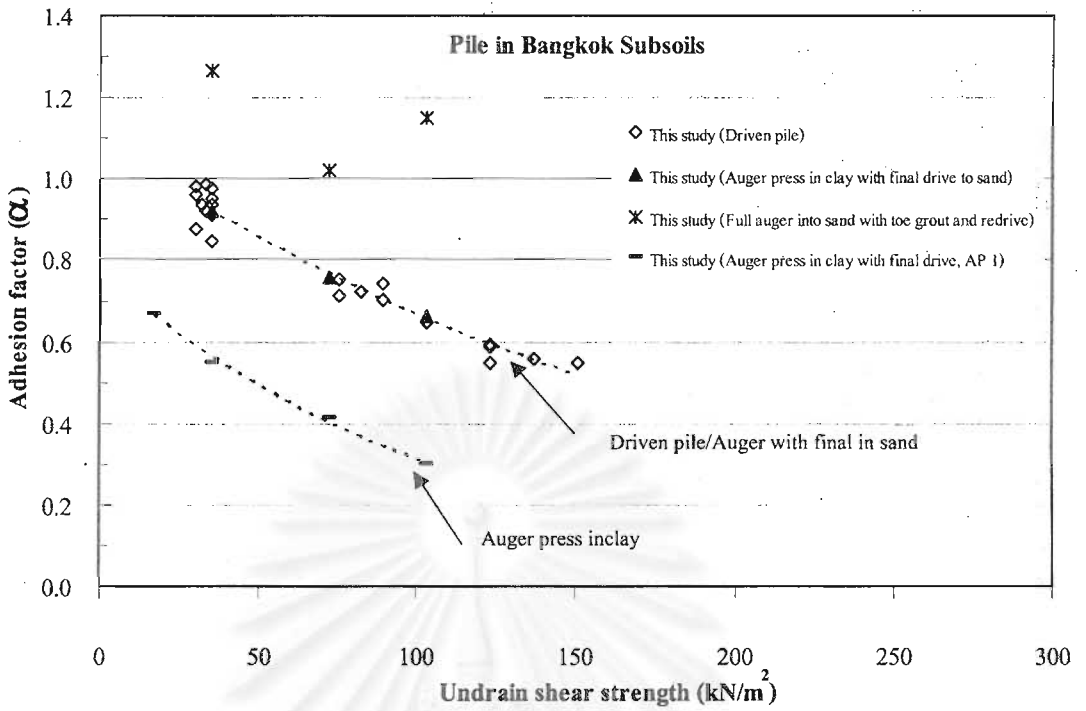
รูป 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับค่ามุม ϕ' ของเสาเข็ม Spun pile ที่มีการตอกเสาเข็มอยู่ในเทคนิคการก่อสร้าง (คิด Drawdown Stress)



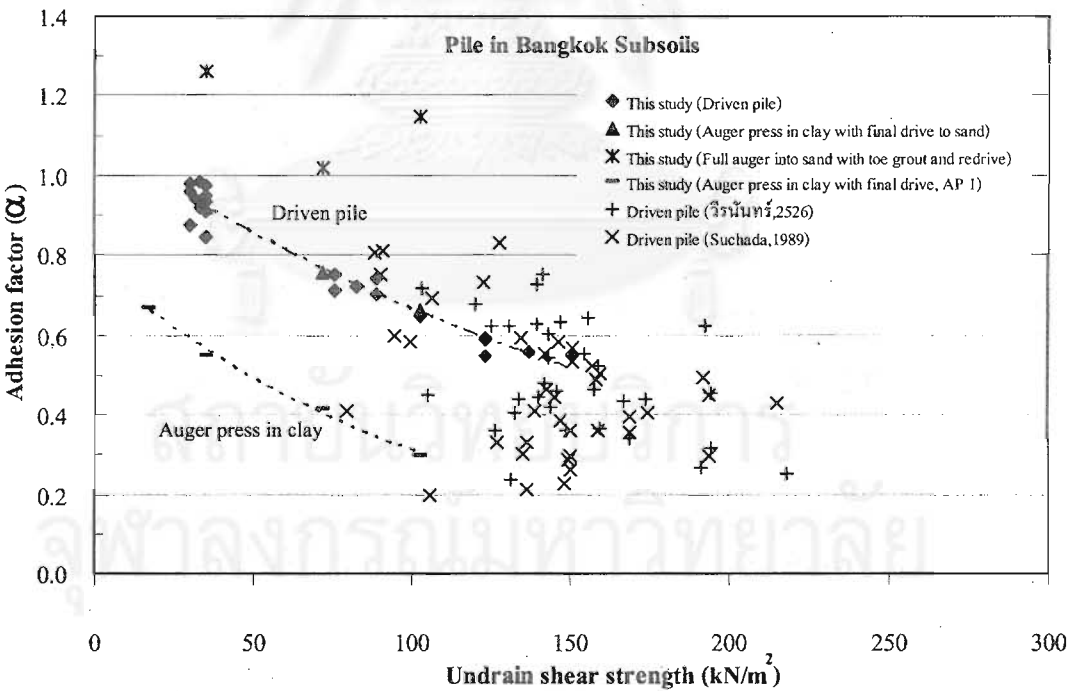
รูป 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับค่ามุม ϕ' ของเสาเข็ม Spun pile Spun pile ที่มีการก่อสร้างโดยการ Auger press และไม่มีการตอกเสาเข็มเพิ่ม (คิด Drawdown Stress)

4.7.2 ค่า Adhesion Factor (α)

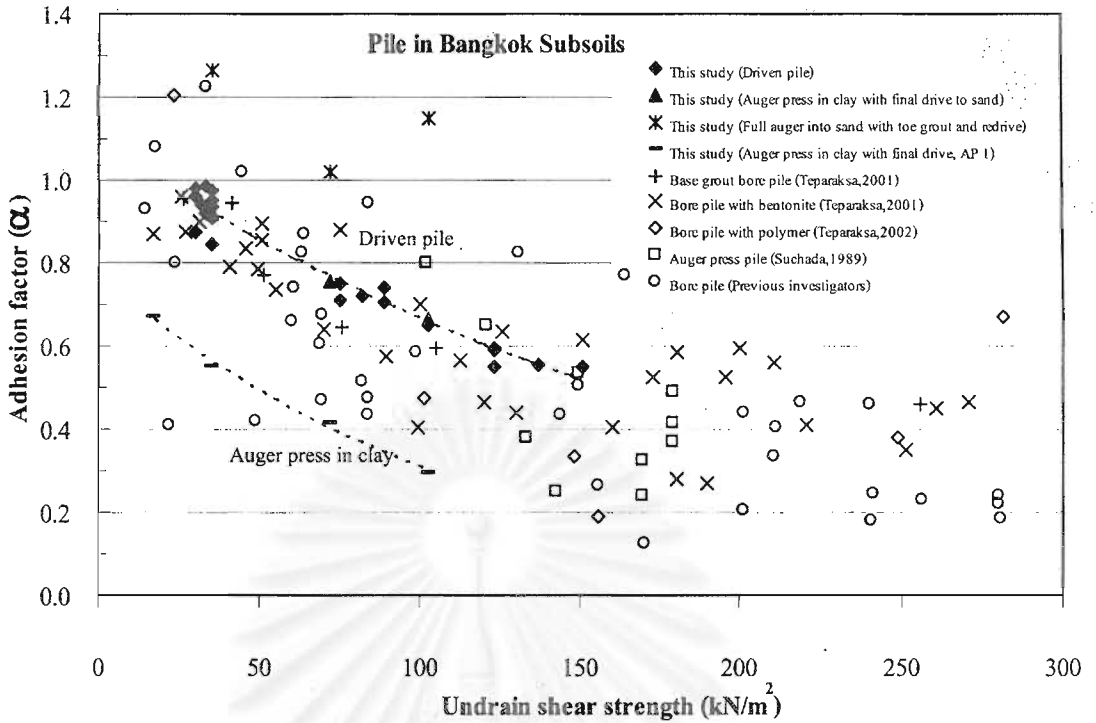
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u ในรูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่าเสาเข็ม Spun pile ที่ทำการก่อสร้างโดยการตอกหรือมีการตอกเสาเข็มรวมอยู่ด้วย จะมีค่า α ที่ใกล้เคียงกัน และเสาเข็มในกรณีนี้จะมีค่า α ที่สูงกว่าเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างแบบ Auger press in clay with final driver ที่มีจำนวนครั้งในการตอกเสาเข็มไม่มากพอซึ่งจะมีพฤติกรรมเป็นเสาเข็มแบบ Auger with press แสดงว่าการตอกเสาเข็มเพิ่มความลึกสุดท้ายของเสาเข็ม Auger with press ทำให้ค่า α เพิ่มขึ้น ดังแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง α กับค่า S_u ไว้ในรูปที่ 4.24 ซึ่งเมื่อนำผลของเสาเข็มจากงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับผลจากกรณีของเสาเข็มตอกในงานวิจัยของผู้ที่ได้ทำการศึกษามาก่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่า ความสัมพันธ์ของ α กับค่า S_u ของเสาเข็ม Spun pile ที่ทำการก่อสร้างด้วยระบบตอกจะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของผู้ที่ทำการวิจัยมาก่อนหน้านี้ และเมื่อนำค่า α จากเสาเข็มที่ทำการวิจัยนี้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเสาเข็มเจาะของผู้ศึกษาท่านอื่นดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าค่า α ของเสาเข็ม API ซึ่งเป็นเสาเข็มที่มีพฤติกรรมเสาเข็มแบบ Auger with press ในงานวิจัยนี้ มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากเสาเข็มเจาะ และสาเหตุที่ทำให้ผลของการศึกษาเป็นเช่นนี้อีกประการหนึ่งคือ การเกิด Boiling ที่ปลายเสาเข็ม API ในขณะที่ทำการก่อสร้าง ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักลดลง



รูป 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในงานวิจัย



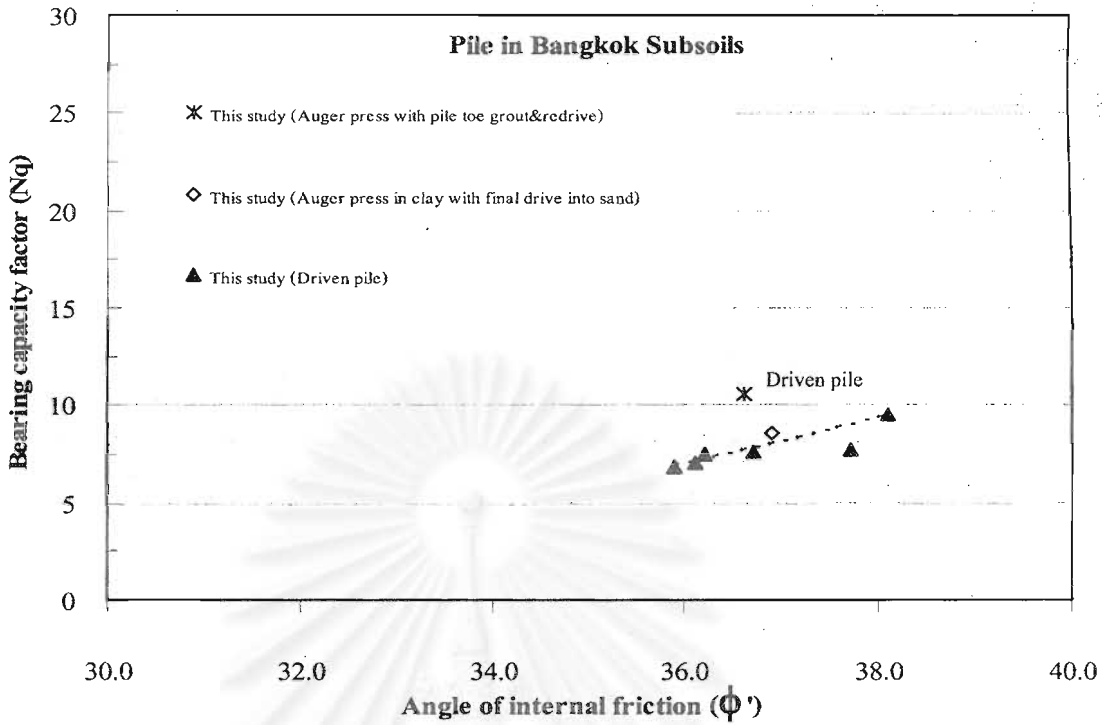
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในงานวิจัยเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้าสำหรับเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ



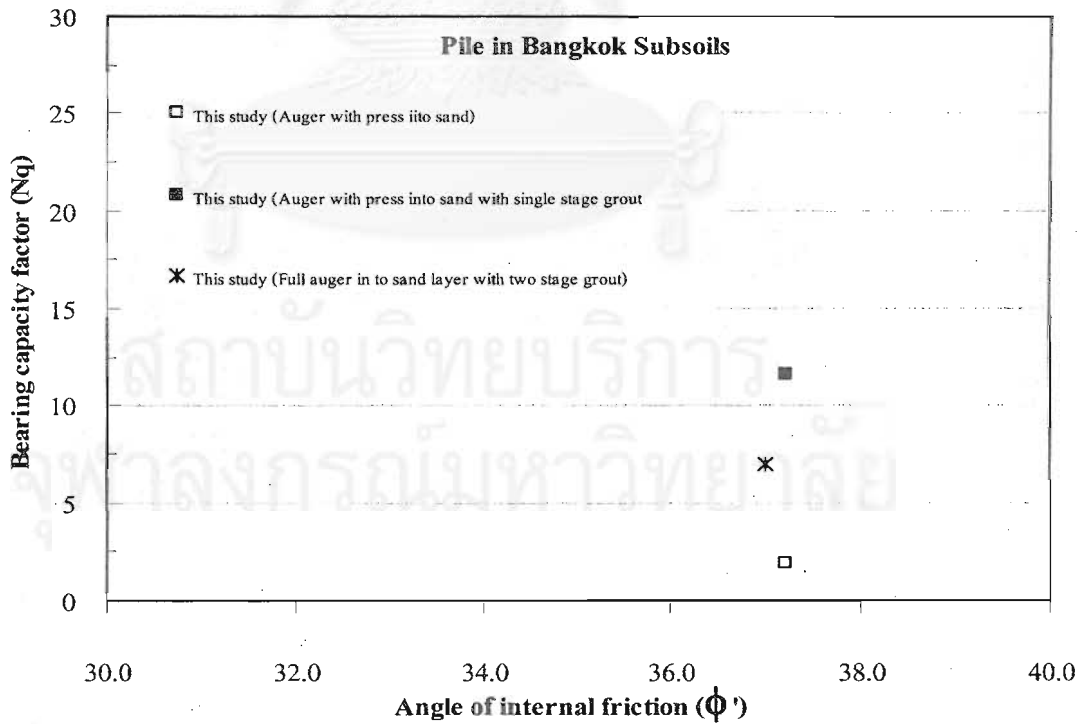
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในงานวิจัยเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้าสำหรับเสาเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ

4.7.3 ค่า Bearing Capacity Factor (N_q)

จากความสัมพันธ์ระหว่าง N_q กับ ϕ' ในรูปที่ 4.20 และ 4.21 พบว่าค่า N_q จากเสาเข็มที่รวบรวมจากโครงการก่อสร้างโรงกรองน้ำของการประปานครหลวงซึ่งเป็นเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างด้วยเทคนิคที่แตกต่างกันแต่มีการตอกเสาเข็มอยู่ในเทคนิคของการก่อสร้างด้วย จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับเสาเข็มตอกที่ทำการก่อสร้างในโครงการเดียวกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.27 ส่วนเสาเข็มจากโครงการก่อสร้างอาคารฝึกข้าวโพด สูง 21 ชั้น จะมีค่า N_q ที่แตกต่างกันตามเทคนิคของการก่อสร้าง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.28 คือเสาเข็ม Full auger press in clay with single stage of grout จะมีค่า N_q สูงกว่าเสาเข็มแบบ Full auger into sand with two stage of grout เนื่องจากเทคนิคการก่อสร้างแบบหลังมีการเกิด Boiling และ loosening ที่ปลายเสาเข็มก่อนทำ Stage grout ทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มลดลง ส่วนเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างแบบ Full auger in clay with press into sand จะมีค่า N_q น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคการก่อสร้างทั้ง 2 แบบที่กล่าวมาแล้วในขั้นต้น เนื่องจากไม่ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยการ grout ที่ปลายเสาเข็ม



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับค่ามุม ϕ' ของเสาเข็ม Spun pile ที่มีการตอกเสาเข็มอยู่ในเทคนิคของการก่อสร้าง (คิด Drawdown Stress)



รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับ ค่ามุม ϕ' ของเสา Spun pile ที่มีการก่อสร้างโดยการ Auger press และไม่มีการตอกเสาเข็มเพิ่ม (คิด Drawdown Stress)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของเสาเข็ม Spun ที่เกิดจากเทคนิคการก่อสร้างและการควบคุมในขั้นตอนการก่อสร้างที่แตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลเสาเข็มมาจากโครงการก่อสร้าง 2 โครงการ ซึ่งเป็นโครงการที่ใช้เสาเข็ม Spun pile ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.50 เมตร มีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก และกรณีเสาเข็ม Spun pile ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เมตร และมีปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองที่มีความลึกประมาณ -37 ม. โดยมีวิธีการก่อสร้างหรือการ Auger press ที่แตกต่างกัน

วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม Spun pile เพื่อทำการก่อสร้างด้วยวิธีที่ต่างกันและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างในเทคนิคต่าง ๆ โดยสามารถสรุปผลการวิจัยโดยแยกประเด็นต่าง ๆ ได้ดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

ผลของการวิจัยที่นำข้อมูลมาจากโครงการก่อสร้างเพียงสองแห่งและมีสภาพดินดังที่ปรากฏ จะพบว่าเทคนิคของการก่อสร้างเสาเข็มจะมีผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยพบว่า การ Auger เสาเข็มลงไปชั้นทรายจะทำให้เกิด Boiling ที่ปลายเสาเข็ม ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มลดลง และเมื่อทำการตอกเสาเข็มเพิ่มเติมในเสาเข็มที่ Auger ลงในชั้นดินเหนียวเพื่อส่งเสาเข็มลงไปชั้นทรายจะทำให้พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มดีขึ้นทันที หรือการก่อสร้างเสาเข็ม Auger press ที่ทำการเจาะหรือ Auger ลงในชั้นดินเหนียวเพียงแค่ระดับชั้นทราย จากนั้นกดเสาเข็มลงไปชั้นทรายเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้เสาเข็มมีพฤติกรรมดีกว่าเสาเข็มที่ทำการเจาะหรือ Auger ลึกลงไปในชั้นทราย แล้วเมื่อทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มก็จะประหยัดปริมาณน้ำปูนถึง 50% และจะได้พฤติกรรมการรับน้ำหนักเสาเข็มดีกว่ากรณีอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่ทำการ Full auger ลงไปในชั้นทราย ดังนั้นการเจาะลงในชั้นดินเหนียวและกดลงในชั้นทรายเล็กน้อย แล้วทำการอัดฉีดน้ำปูน จะดีกว่าการเจาะลึกลงไปในชั้นทรายแล้วอัดฉีดน้ำปูนช่วยในการอัดแน่นทราย

5.1.2 พารามิเตอร์สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม

ผลการวิจัยสรุปได้ว่า การเกิด Piping และ Loosening ที่ปลายเสาเข็มในเสาเข็ม Auger press จะมีผลทำให้ค่า Adhesion factor (α) ในชั้นดินเหนียวและค่า Friction factor (β) ในชั้นดินทรายมีค่าลดลงและการตอกเสาเข็มจะทำให้ค่า α และ β มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มในกรณีที่ไม่เกิด Loosening ที่ปลายเสาเข็มจะให้ค่า β เพิ่มขึ้นมากกว่าการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มในกรณีที่เกิด Loosening ที่ปลายเสาเข็ม มากกว่า 2 เท่า

5.1.3 พารามิเตอร์สำหรับการประมาณค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

ผลจากการวิจัยพบว่า เสาเข็ม Auger with press มีค่า Bearing Capacity factor (N_q) ที่ต่ำ แต่เมื่อทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลาย (Grouting) หรือตอกเพิ่มเติมจะทำให้ค่า N_q เพิ่มขึ้นตามลำดับ และถ้าทำการปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักที่ปลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การตอกเสาเข็มที่มีจำนวนครั้งมากพอหรือการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายถ้าทรายไม่เกิดการหลวมตัวขึ้น ในกรณีของเสาเข็มที่ไม่มีการเกิด Boiling และ Loosening ที่ปลายเสาเข็มก็จะทำให้ค่า N_q ของเสาเข็ม Auger press มีค่าที่สูงขึ้นจนใกล้เคียงหรือเท่ากับในกรณีของเสาเข็มตอกได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็ม Spun pile ที่มีเทคนิคการก่อสร้างที่แตกต่างกัน ที่ทำการก่อสร้างในเขตกรุงเทพฯ ฯ ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผล โดยการรวบรวมผลการทดสอบเสาเข็ม Spun pile เพื่อเป็นฐานข้อมูล (Database) ในการวิเคราะห์ผล ซึ่งผลวิจัยที่ได้เป็นเพียงผลพื้นฐานที่อาจจะมีการพัฒนาต่อไปเพื่อให้ได้ผลวิจัยที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นในอนาคต ซึ่งข้อเสนอแนะมีดังนี้

- ควรเก็บข้อมูลของเสาเข็ม Spun pile ที่ทำการ Auger press ในเทคนิคต่าง ๆ เพิ่มเติมเนื่องจากข้อมูลของเสาเข็ม Auger press ที่รวบรวมได้ในงานวิจัยนี้มีเพียงกรณีละ 1 ดัน ดังนั้นการเพิ่มข้อมูลในการวิเคราะห์จะทำให้ได้ผลที่ถูกต้องมากขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- แมนสรวง จินจิ๋ว , มนต์พล วรสิทธิ์ไสรยษฐ์ และณัฐพล สุขอนันต์. (2540). การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินตามแนวเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดิน. โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วสท. (2520). ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
- วันชัย เทพารักษ์. (2543). เสาเข็มเจาะพร้อมอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มในดินกรุงเทพมหานคร. การบรรยายทางวิชาการฐานราก 2000 จัดโดย วสท. วสท. , โรงแรมเอเชีย , หน้า 39 – 53.
- วันชัย เทพารักษ์. (2546). เทคนิคใหม่ในการเจาะเสาเข็มแรงเหวี่ยงที่มีปลายเสาเข็มในชั้นทราย กรุงเทพมหานคร. การสัมมนาทางวิชาการ เรื่องฐานราก 46.
- วีรพันธ์ ปิตุปกรณ. (2526). การประเมินค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากการทดสอบ SPT(N). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุวรรณ เชี่ยวชาญศิลป์. (2531). การส่งถ่ายน้ำหนักสถิตและการคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Aurora , R.V. and Reesa , L.C. (1976). Behavior of Axially Loaded Drilled Shaft in Clay – Shales. Research report no.176-4 Center for highway research , The university of Texas at Austin , Austin , Texas.
- Berezantzev , V.G. , Khristoforov , V., &Golubko , V. (1961). Load Bearing Capacity and Deformation of Piled Foundations, Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. , Vol. 2 , pp. 11 -15.
- Burland , J.B. (1973). Shaft Friction of Pile in Clay, A Simple Fundamental Approach Grand Eng , Vol . 6 , No. 3 , pp. 30 – 42.
- Brand , E.W. (1970). Discussion on Load - Displacement Characteristic in Different soils , Proc. Conf. on Ben of Pile , I.C.E. , London , pp. 42 -44.
- Broms , BB. (1966). Method of Calculation the Ultimate Bearing Capacity of Pile, A Summary , Sols - Soils , No. 18 - 19 , pp. 21 – 32.

- Chun , H.H. (1992). Performance of Driven and Bored Piles in Expressway Projects, M.Eng. thesis , AIT , Bangkok.
- Coduto , D.P. (1994). Foundation Design Principle and Practice.New Jersey: Prentice - Hall, pp. 796.
- Fellenius , B.H. (1980). The Analysis of Result from Routine Pile Load Tests, Ground Eng. , Vol. 13 , No. 6 , pp. 19 – 31.
- Flaate , K. (1968). Baereevne av Friksjonspeler i Leire, om Beregning Ar Baereevne Pa Grunnlag Av Geotekniske Undersøkelser, Oslo, Veglaboriet, pp.38, Memeographed.
- Holmberg , S. (1970) . Load Testing in Bangkok Region of Piles Embedded in Clay, Jnl. S.E. Asian Soc. Soil Eng., Vol. 1 , No. 2 , pp. 61 -78.
- Meyerhof , G.G. (1951) . The Ultimate Bearing Capacity of Pile Foundation, Geot. , Vol. 2 , pp. 301 – 332.
- Meyerhof , G.G. (1976) , Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations, Jnl. Geot. Eng. Div. , ASCE , Vol. 102 , No. GT3 , pp. 195 – 228.
- Muktabhant , C. and Suwanakul , V. (1971). Cast In - Situ Pile in Bangkok Clay , Proc. 4th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Found. Eng. , Bangkok , Vol. 1 , pp. 287 – 293.
- NAVFAC. DM- 7.1(1982) . Soil Machanics, Department of Navy, Naval Facilities Engineering Command, U.S.A.
- O' Neill , M.W. and Reese , L.C. (1970). Behavior of Axially Loaded Drilled Shafts in Beaumont Clay, RR 89 - 9 , Center for Highway Research , The University of Texas at Austin , Texas.
- Peck , R.B. , Hansan , W.E. and Thornburn , T.H. (1974). Foundation Engineering . 2nd Edition . NewYork: John Wiley and Sons .
- Pimpasugdi , S. (1989). Performance of Bored , Driven and Auger Press Pile in Bangkok Subsoils, Master' s Thesis , GT - 88 - 12 , AIT , Bangkok.
- Poulos , H.G. and E.H. Davis. (1980). Pile Foundation Analysis and Design. Singapore: John Wiley & Sons , Inc. , pp. 397.
- Sambhandharaksa , S. (1991) . Essentials of Construction Considerations for Pile Foundation Design in Bangkok Subsoils, Proc, EIT.
- Seedd , G.B. and Reese , L.C. (1951). The Action of Soft Clay Along Friction Pile, Trans. ASEC, Vol. 122.

- Skempton , A.W. (1951) . The Bearing Capacity of Clay, Build. Res. Congress , London Inst.Civ.Eng., Vol. 1 , pp. 180 – 189.
- Sower , G.F. , Martin , G.B. , wilson , L.L. and Fausold , M. (1961). The Bearing Capacity of Friction Pile Groups in Homogeneous Clay from Model Studies, Proc. 5th Int.Conf. soil Mech.Found.Eng. , Vol. 2 , pp. 155 – 160.
- Tavenas , F. (1971). Load Test Result on Friction Pile in Sand, Canadian. Geotech , Journal , Vol. 8 , No. 1 , pp. 7 -22.
- Thanudkeung , Chairat. (1987). Correlation Beetween Undisturbed Strength Deformation Characteristics and Those Developed from SPT Data for Bangkok First Sand, Master ' s Thesis. No. GT - 87 - 9 , AIT , Bangkok.
- Tomlinson , M.J. (1970) . Some Effects on Pile Driving on skin Friction, Conf. on. Beh. of Piles , Inst. Civ. Eng. , London , pp. 59 – 66.
- Tomlinson , M.J. (1994) . Pile Design and Construction Practice, 4th ed. , E&FN Spon , London, pp. 411.
- Tonyagate , Warapong. (1978) . Geotechnical properties of Bangkok Subsoil for Subsidence Analysis , M. Eng. Thesis., No. 1298 , AIT , Bangkok.
- Vesic , A.S. (1967) , A Study of Bearing Capacity of Deep Foundation, Final Rep. , Proj. B - 189 , School of Civil Eng. , Georgia Inst. Tech. , Atlanta.
- Whitaker ,T. and Cook , R.W. (1966). An Investigation of Shaft and Base Resistance of Large Bored Pile in London Clay. Proc.Symp. On Large Bore Pile , Inst. Civ. Engr.
- Whitaker , T. (1970). The Design of Pild Foundations , Program Press.
- Wintakorn , H.F. and H. Fang. (1975). Pile foundation , In Foundation Engineering Handbook, Edition by Arpad Kezde. NewYork: Van Nostrand Reinhold , pp. 751.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

รายละเอียดข้อมูลหลุมเจาะสำรวจดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก1 หลุมเจาะดิน BH-1T (ใช้คำนวณเสาเข็ม DP 1)

TEAM CONSULTING ENGINEERS CO.,LTD				SUMMARY OF TEST RESULT						
Project : Metropolian Waterworks Authority				Location : Prachacheun , Bangkok , Thailand						
Borehole No : BH-1T				Test by :			Date : 17/12/2542		Checked by :	
Sample No.	Depth m.		w _n %	Atterberg Limit (%)			Unit Weight x 10 kN/m ³	S _u (UC) x 10 kN/m ²	SPT N Value	Soil Classification
	From	To		LL	PL	PI				
ST-1	1.50	2.00	34.80	70.10	27.7	42.4	1.86	8.13		CH
ST-2	3.00	3.50	51.50				1.74	0.80		
ST-3	4.50	5.00	84.00	76.80	28.60	48.20	1.54	0.80		CH
ST-4	6.00	6.50	88.60				1.49	1.09		
ST-5	7.50	8.00	73.90				1.60	0.84		
ST-6	9.00	9.50	83.10				1.54	2.09		
ST-7	10.50	11.00	70.60				1.61	1.07		
ST-8	12.00	12.50	66.70				1.54	1.82		
ST-9	13.50	14.00	63.40	85.80	34.4	51.4	1.63	3.45		CH
ST-10	15.00	15.50	26.50				2.03	1.22		
SS-1	16.50	16.95							15	
SS-2	18.00	18.45	26.40	49.40	20.10	29.30			13	CL/CH
SS-3	19.50	19.95	28.10						11	
SS-4	21.00	21.45							39	
SS-5	22.50	22.95							35	
SS-6	24.00	24.50							28	
SS-7	25.50	25.95	15.80						22	SM
SS-8	27.00	27.45							26	
SS-9	28.50	28.95							45	
SS-10	30.00	30.45	27.90						27	
SS-11	31.50	31.95	26.80	36.40	20.00	16.40			19	CL
SS-12	33.00	33.45	28.30						15	
SS-13	35.00	35.35							50/2"	
END OF BORING										

ตารางที่ ก2 หลุมเจาะดิน BH-2T (ใช้คำนวณเสาเข็ม DP 2 , DP 5)

TEAM CONSULTING ENGINEERS CO.,LTD				SUMMARY OF TEST RESULT						
Project : Metropolian Waterworks Authority				Location : Prachacheun , Bangkok , Thailand						
Borehole No : BH-2T Test by :				Date : 22/12/2542			Checked by :			
Sample No.	Depth m.		w _n %	Atterberg Limit (%)			Unit Weight x 10 kN/m ³	S _u (UC) x 10 kN/m ²	SPT N Value	Soil Classification
	From	To		LL	PL	PI				
ST-1	1.50	2.00	41.20				1.88	0.93		
ST-2	3.00	3.50	34.20	50.70	20.2	30.5	1.98	0.44		CH
ST-3	4.50	5.00	54.60				1.63	1.90		
ST-4	6.00	6.50	69.10				1.59	1.37		
ST-5	7.50	8.00	71.80	80.40	31.70	48.70	1.59	1.71		CH
ST-6	9.00	9.50	67.80				1.57	2.54		
ST-7	10.50	11.00								
ST-8	12.00	12.50	83.80				1.54	1.96		
ST-9	13.50	14.00	63.00				1.61	3.59		
ST-10	15.00	15.50	52.20	75.90	31.20	44.70	1.67	4.43		CH
SS-1	16.50	16.95	25.30						9	
SS-2	18.00	18.45	28.20	60.60	22.10	38.50	1.84		19	CH
SS-3	19.50	19.95	21.50						29	SM
SS-4	21.00	21.45							46	
SS-5	22.50	22.95	13.10						42	SW-SM
SS-6	24.00	24.45							34	
SS-7	25.50	25.95	12.70						23	SW-SM
SS-8	27.00	27.40							50/10"	
SS-9	28.50	28.95	21.50						50	SM
SS-10	30.00	30.30	25.70	37.40	20.60	16.80			50/6"	CL
SS-11	31.50	31.95	18.40						42	SM
SS-12	33.00	33.45	19.60	NP	NP	NP			59	
SS-13	35.00	35.40	21.80						50/10"	SM
END OF BORING										

ตารางที่ ก3 หลุมเจาะดิน BH-4A (ใช้จำนวนเสาเข็ม AP 1 , AP 2 , AP 3)

ASTM TESTING CO.,LTD				SUMMARY OF TEST RESULT						
Project : Metropolian Waterworks Authority				Location : Prachacheun , Bangkok , Thailand						
Borehole No : BH-4A		Test by : WP.		Date : 20/01/2545		Checked by : WP				
Sample No.	Depth m.		w _n %	Atterberg Limit (%)			Unit Weight x 10 kN/m ³	S _u (UC) x 10 kN/m ²	SPT N Value	Soil Classification
	From	To		LL	PL	PI				
ST-1	1.50	2.00		NO RECOVERY						
ST-2	3.00	3.50	31.72				1.91	1.70		
ST-3	4.50	5.00	72.24	85.80	39.03	46.77	1.51	1.27		CH
ST-4	6.00	6.50	75.82				1.48	1.16		CH
ST-5	7.50	8.00		NO RECOVERY						CH
ST-6	9.00	9.50	75.74	89.00	37.44	51.56	1.49	1.68		
ST-7	10.50	11.00								CH
ST-8	12.00	12.50								
ST-9	13.50	14.00	69.34	79.80	36.38	43.42	1.59	3.07		
ST-10	15.00	15.50	61.10				1.64	4.11		CH
SS-1	16.50	16.95	24.34	49.30	28.05	21.25			11	CH
SS-2	18.00	18.45	18.20	NP					20	CL
SS-3	19.50	19.95	23.54	44.50	26.65	17.85			35	SM
SS-4	21.00	21.45	26.06						19	CL
SS-5	22.50	22.95	24.75	46.30	28.64	17.66			43	CL
SS-6	24.00	24.45	17.92	NP					39	CL
SS-7	25.50	25.95		NO RECOVERY					40	SP
SS-8	27.00	27.45	21.37	NP					38	
SS-9	28.50	28.95	21.13	NP					35	SP
SS-10	30.00	30.45	20.66	NP					32	SM
SS-11	31.50	31.95		NO RECOVERY					42	SM
SS-12	33.00	33.45	22.30	NP					50/6"	
SS-13	34.50	34.95	19.21	NP					55/9"	SM
SS-14	36.00	36.45		NO RECOVERY					59	SM
SS-15	37.50	37.95		NO RECOVERY					55/10"	

END OF BORING

ตารางที่ ก4 หลุมเจาะดิน BH-5A (ใช้กำหนดเสาเข็ม DP 3)

ASTM TESTING CO.,LTD				SUMMARY OF TEST RESULT						
Project : Metropolian Waterworks Authority				Location : Prachacheun , Bangkok , Thailand						
Borehole No : BH-5A				Test by : WP.			Date : 28/01/2545		Checked by : BT	
Sample No.	Depth m.		w _n %	Atterberg Limit (%)			Unit Weight x 10 kN/m ³	S _u (UC) x 10 kN/m ²	SPT N Value	Soil Classification
	From	To		LL	PL	PI				
ST-1	1.50	2.00		NO RECOVERY						
ST-2	3.00	3.50	59.15				1.45	1.67		CH
ST-3	4.50	5.00	66.25	78.13	34.98	43.16	1.41	1.81		CH
ST-4	6.00	6.50	69.25				1.68	1.94		CH
ST-5	7.50	8.00		NO RECOVERY						
ST-6	9.00	9.50	74.19	85.00	34.22	50.78	1.58	2.87		CH
ST-7	10.50	11.00		NO RECOVERY						
ST-8	12.00	12.50		NO RECOVERY						
ST-9	13.50	14.00		NO RECOVERY						
ST-10	15.00	15.50	54.19	59.97	26.79	33.17	1.59	4.20		CH
SS-1	16.50	16.95	30.80	51.43	27.28	24.15			9	CH
SS-2	18.00	18.45	26.30						12	CH
SS-3	19.50	19.95	24.22	26.93	17.23	9.70			14	SC
SS-4	21.00	21.45	25.66	31.04	19.25	11.80			18	CL
SS-5	22.50	22.95	17.81	NP					45	SM
SS-6	24.00	24.45	19.76	NP					53/9"	SM
SS-7	25.50	25.95		NO RECOVERY					54	
SS-8	27.00	27.45	17.89	NP					52	SM
SS-9	28.50	28.95	16.55	NP					54	SM
SS-10	30.00	30.45	26.53	28.32	23.42	14.90			53/9"	CL
SS-11	31.50	31.95	20.94	NP					35	SM
SS-12	33.00	33.45		NO RECOVERY					45	
SS-13	34.50	34.95	17.91	NP					45	SM
SS-14	36.00	36.45		NO RECOVERY					56/9"	
SS-15	37.50	37.95		NO RECOVERY					56/9"	
END OF BORING										

ตารางที่ ก5 หลุมเจาะที่ BH-6A (ใช้คำนวณเสาเข็ม DP 4)

ASTM TESTING CO.,LTD				SUMMARY OF TEST RESULT						
Project : Metropolian Waterworks Authority				Location : Prachacheun , Bangkok , Thailand						
Borehole No : BH-6A		Test by : WP		Date : 16/12/2545		Checked by : BT				
Sample No.	Depth m.		w _n %	Atterberg Limit (%)			Unit Weight x 10 kN/m ³	S _u (UC) x 10 kN/m ²	SPT N Value	Soil Classification
	From	To		LL	PL	PI				
ST-1	1.50	2.00		NO RECOVERY						
ST-2	3.00	3.50	48.02	66.93	34.77	32.16	1.76	2.70		CH
ST-3	4.50	5.00		NO RECOVERY						
ST-4	6.00	6.50	74.98	87.80	38.74	49.06	1.55	1.54		CH
ST-5	7.50	8.00	80.92				1.58	1.36		CH
ST-6	9.00	9.50		NO RECOVERY						
ST-7	10.50	11.00	74.04				1.54	1.79		CH
ST-8	12.00	12.50	78.48	90.26	39.92	50.35	1.63	1.89		CH
ST-9	13.50	14.00		NO RECOVERY						
ST-10	15.00	15.50	60.01	69.16	31.18	37.98	1.66	3.48		CH
SS-1	16.50	16.95	35.04	55.88	30.57	25.32			9	CH
SS-2	18.00	18.45	33.08						10	CL
SS-3	19.50	19.95	25.65	35.44	22.45	13.00			17	CL
SS-4	21.00	21.45	24.86	NP					48	SM
SS-5	22.50	22.95	21.58	NP					55/9"	SP
SS-6	24.00	24.45	20.54	NP					53/9"	SP
SS-7	25.50	25.95		NO RECOVERY					55/10"	
SS-8	27.00	27.45	16.49	NP					52/10"	SP
SS-9	28.50	28.95		NO RECOVERY					35	
SS-10	30.00	30.45	19.15	NP					40	SM
SS-11	31.50	31.95	20.29	NP					41	SM
SS-13	34.50	34.95		NO RECOVERY					56	
SS-14	36.00	36.45	18.84	NP					55/9"	SM
SS-15	37.50	37.95	19.57	NP					50/8"	SM
END OF BORING										

ตารางที่ ก6 หลุมเจาะดิน BH-8A (ใช้กำหนดเสาเข็ม DP 6)

ASTM TESTING CO.,LTD				SUMMARY OF TEST RESULT						
Project : Metropolian Waterworks Authority				Location : Prachacheun , Bangkok , Thailand						
Borehole No : BH-8A		Test by : WP.		Date : 24/01/2545		Checked by : WP.				
Sample No.	Depth m.		w _n %	Atterberg Limit (%)			Unit Weight x 10 kN/m ³	S _u (UC) x 10 kN/m ²	SPT N Value	Soil Classification
	From	To		LL	PL	PI				
ST-1	1.50	2.00		NO RECOVERY						
ST-2	3.00	3.50	45.01	61.32	28.37	32.95	1.72	2.17		CH
ST-3	4.50	5.00	66.35				1.55	1.56		CH
ST-4	6.00	6.50	79.49				1.53	1.23		CH
ST-5	7.50	8.00		NO RECOVERY						
ST-6	9.00	9.50		NO RECOVERY						
ST-7	10.50	11.00		NO RECOVERY						
ST-8	12.00	12.50	68.89	80.57	34.88	45.69	1.60	2.12		CH
ST-9	13.50	14.00	71.97				1.58	2.44		CH
ST-10	15.00	15.50	55.00	61.06	25.06	36.00	1.74	4.30		CH
SS-1	16.50	16.95	30.40	40.70	23.76	16.94			8	CL
SS-2	18.00	18.45	26.06						10	CL
SS-3	19.50	19.95	25.38	33.64	19.55	14.09			17	CL
SS-4	21.00	21.45	23.06	34.35	21.48	12.87			26	CL
SS-5	22.50	22.95	15.80	NP					52	SG
SS-6	24.00	24.45	16.35	NP					54/9"	SG
SS-7	25.50	25.95		NO RECOVERY					56/10"	
SS-8	27.00	27.45		NO RECOVERY					49	
SS-9	28.50	28.95	16.82						51	SM
SS-10	30.00	30.45	21.25						52/9"	SP
SS-11	31.50	31.95	20.06	NP					52/9"	SP
SS-12	33.00	33.45		NO RECOVERY					48	
SS-13	34.50	34.95	20.37	NP					54	SP
SS-14	36.00	36.45	21.19	NP					59/10"	SP
SS-15	37.50	37.95		NO RECOVERY					57/9"	
END OF BORING										

ตารางที่ ก7 หลุมเจาะดิน BH-2S(ใช้คำนวณเสาเข็ม AP 4/1 , AP 4/2 , AP 5)

STS INSTRUMENTS CO.,LTD				SUMMARY OF TEST RESULT						
Project : โครงการอาคารฝึกข่าวโพด สูง 21 ชั้น				Location : ถนน รามคำแหง 40 กรุงเทพมหานคร						
Borehole No : BH-2S Test by :				Date : 24/01/2545			Checked by :			
Sample No.	Depth m.		w _n %	Atterberg Limit (%)			Unit Weight x 10 kN/m ³	S _u (UC) x 10 kN/m ²	SPT N Value	Soil Classification
	From	To		LL	PL	PI				
ST-01	1.50	2.00	43.30				1.79	3.00		CH
ST-02	3.00	3.50	93.40				1.47	0.80		CH
ST-03	4.50	5.00	91.80				1.46			CH
ST-04	6.00	6.50	84.50				1.50	1.90		CH
ST-05	7.50	8.00	80.30				1.50	1.60		CH
ST-06	9.00	9.50	81.30				1.51	1.70		CH
ST-07	10.50	11.00	72.00				1.52	1.80		CH
ST-08	12.00	12.50	55.20				1.68	2.30		CH
ST-09	13.50	14.00	48.30				1.73	2.40		CH
SS-10	15.00	15.45	26.10	76.40	24.50	51.90			7	CH
SS-11	16.50	16.95	33.30				1.83	8.60	12	CH
SS-12	18.00	18.45	22.10						17	CH
SS-13	19.50	19.95	23.70						18	SC
SS-14	21.00	21.45	20.10				1.96		20	CH
SS-15	22.50	22.95	9.10				2.18	16.80	41	CH
SS-16	24.00	24.45	18.00						42	SM
SS-17	25.50	25.95	19.50						32	SM-SP
SS-18	27.00	27.45	16.10						42	SM-SP
SS-19	28.50	28.95	20.70				1.96	16.80	26	CH
SS-20	30.00	30.45	15.20						39	CH/SM
SS-21	31.50	31.95	15.30				2.09	27.60	35	CH
SS-22	33.00	33.45	17.80				1.96	14.70	23	CH
SS-23	34.50	34.95	23.50						23	CH/SC
SS-24	36.00	36.45	13.10						42	SM
SS-25	37.50	37.95	15.10						69	SM-SP
SS-26	39.00	39.45	17.80						55	SM-SP
SS-27	40.50	40.95	17.70				2.01		28	CH

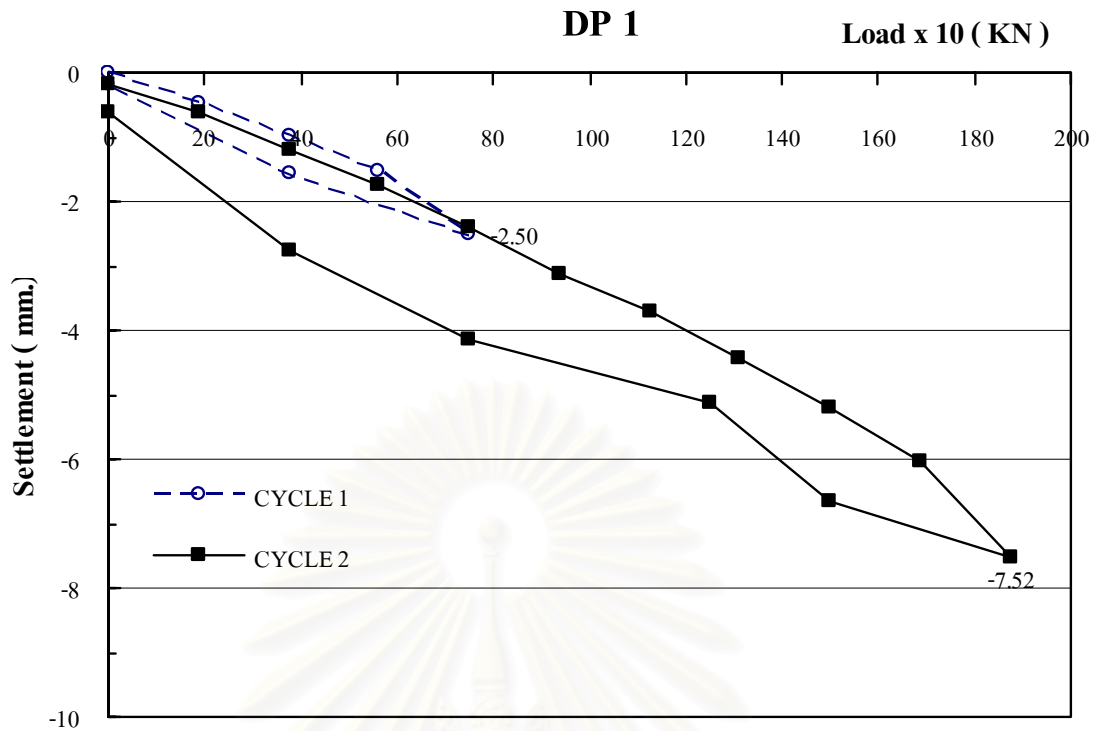
END OF BORING



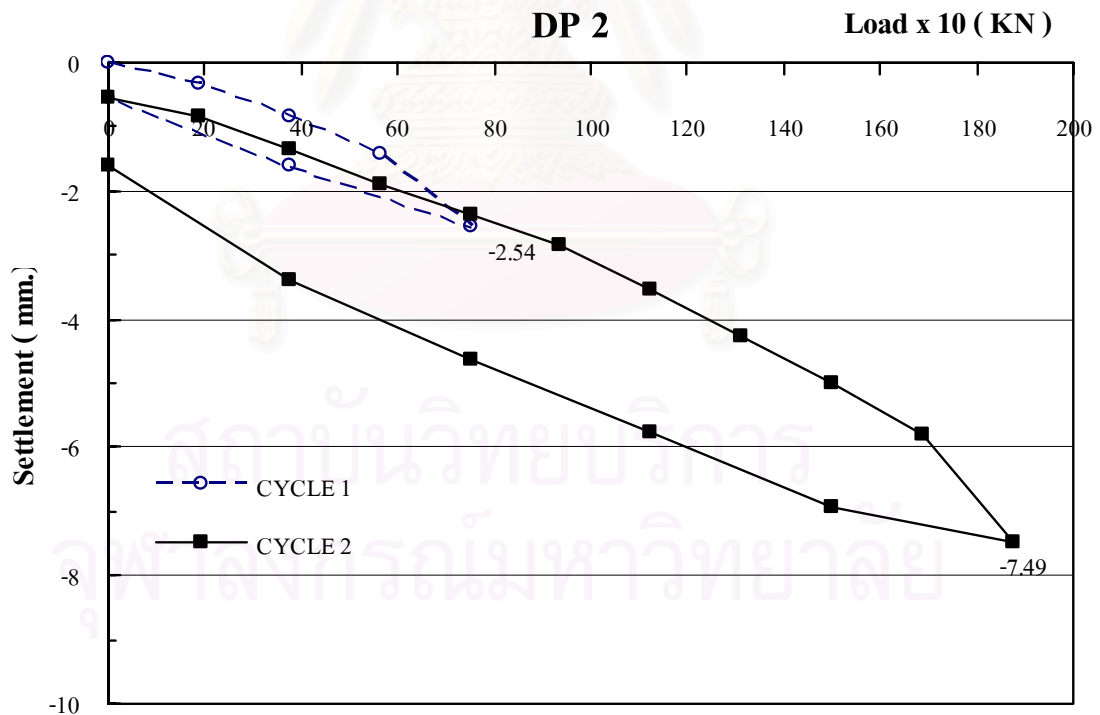
ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัย

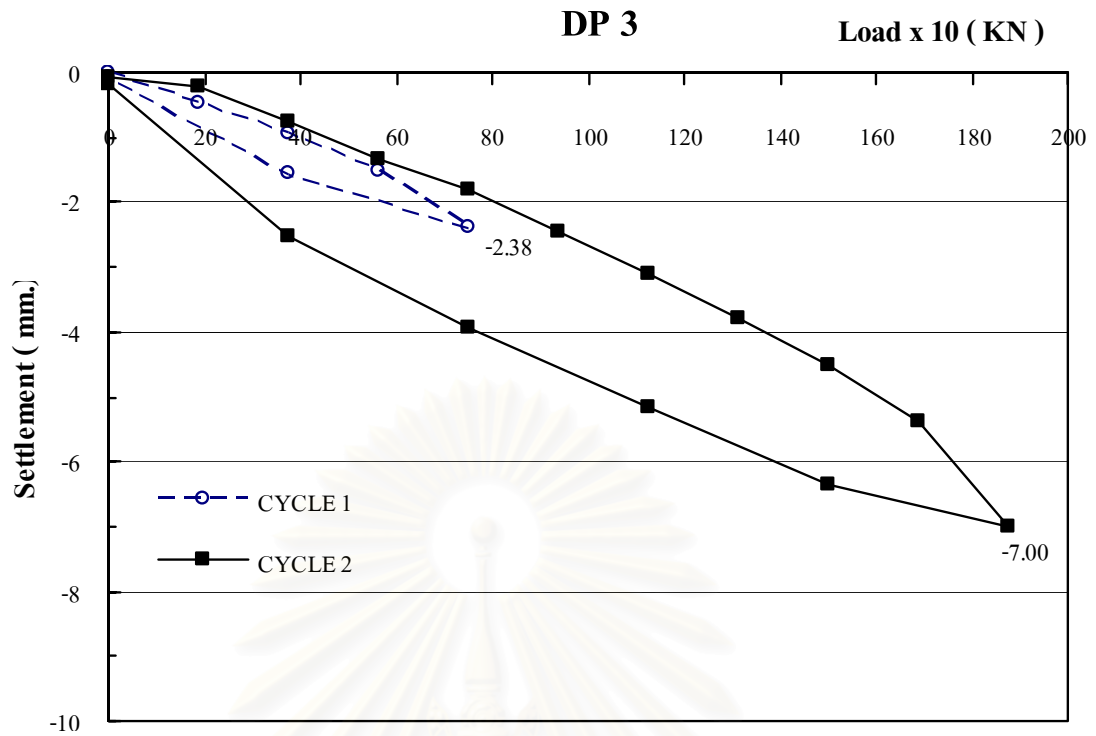
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



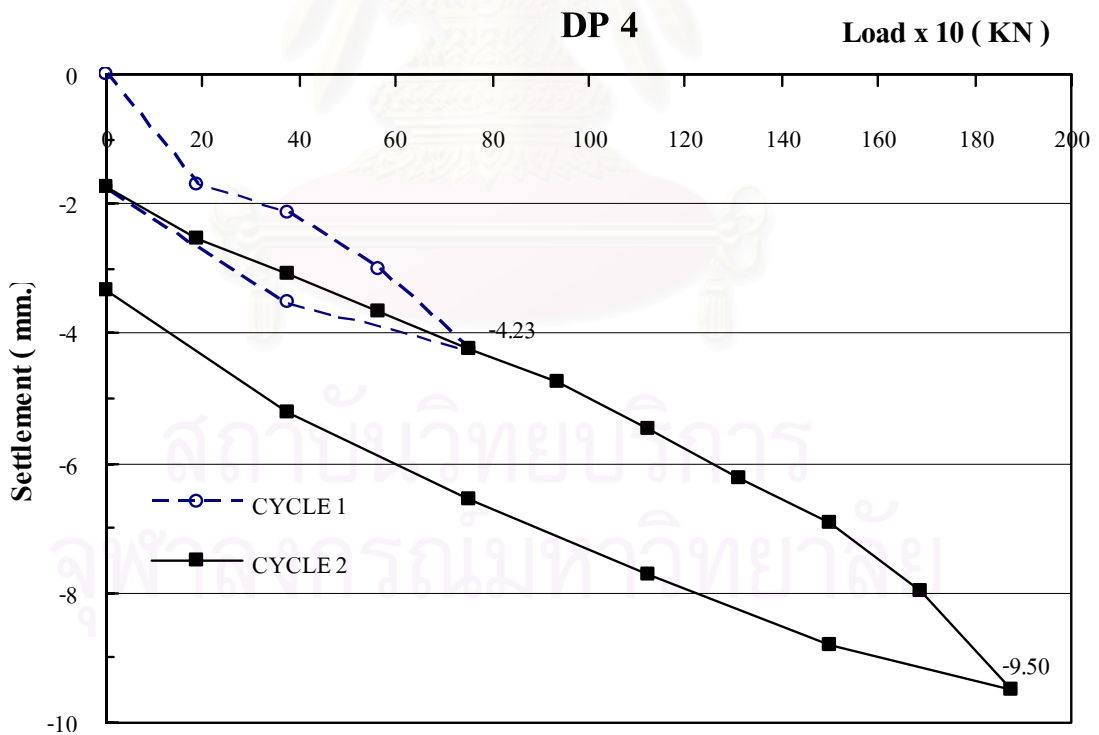
รูปที่ ข1 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 1



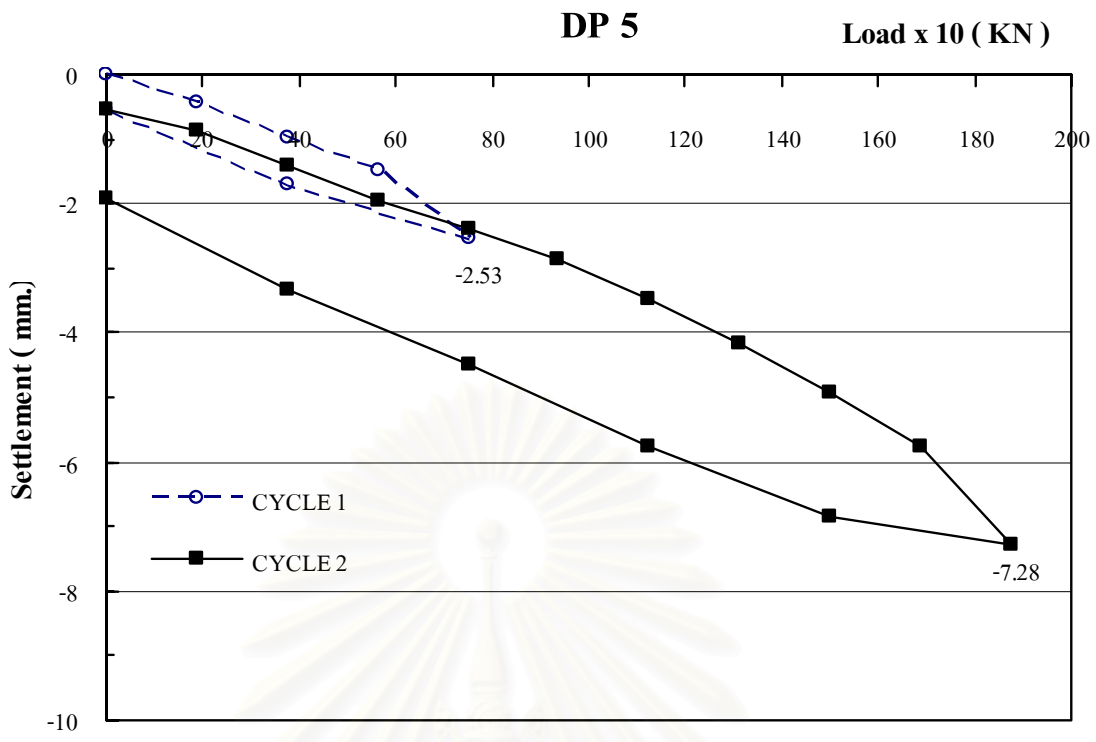
รูปที่ ข2 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 2



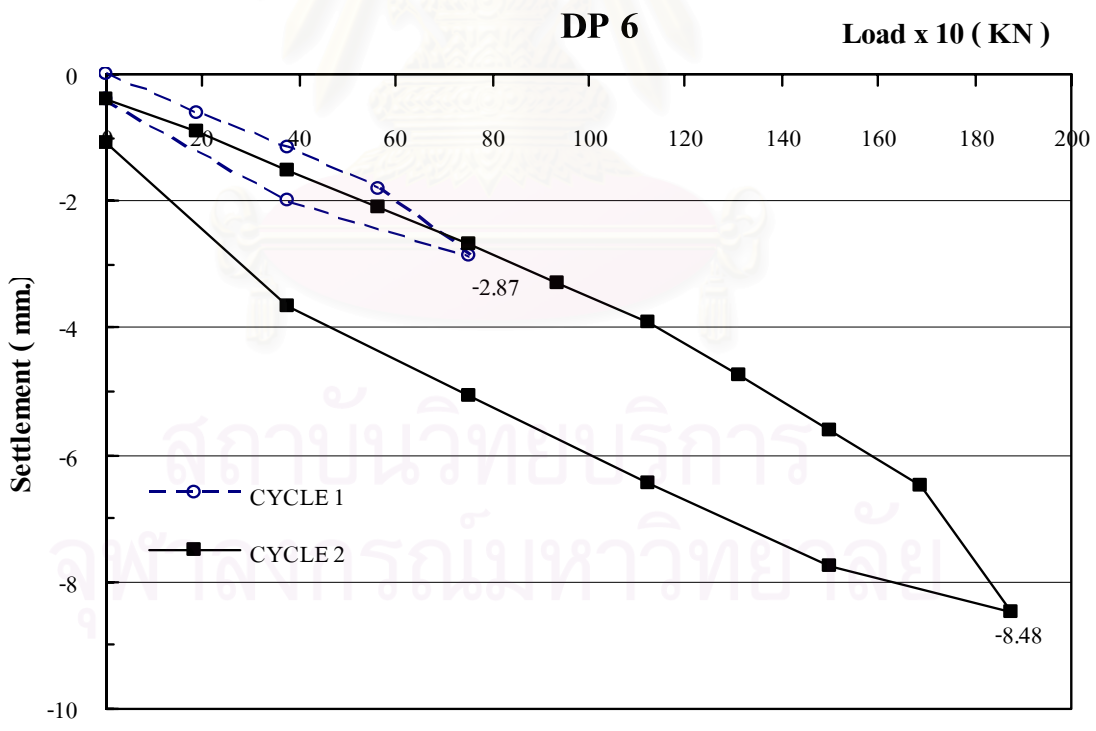
รูปที่ ข3 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 3



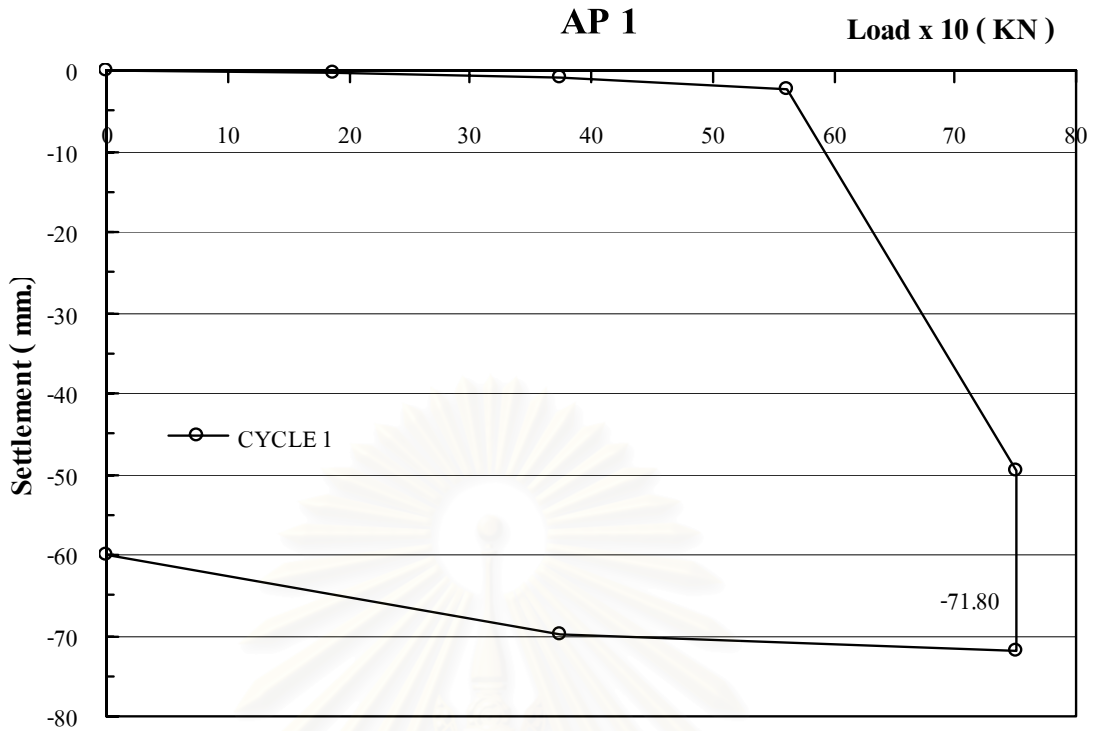
รูปที่ ข4 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 4



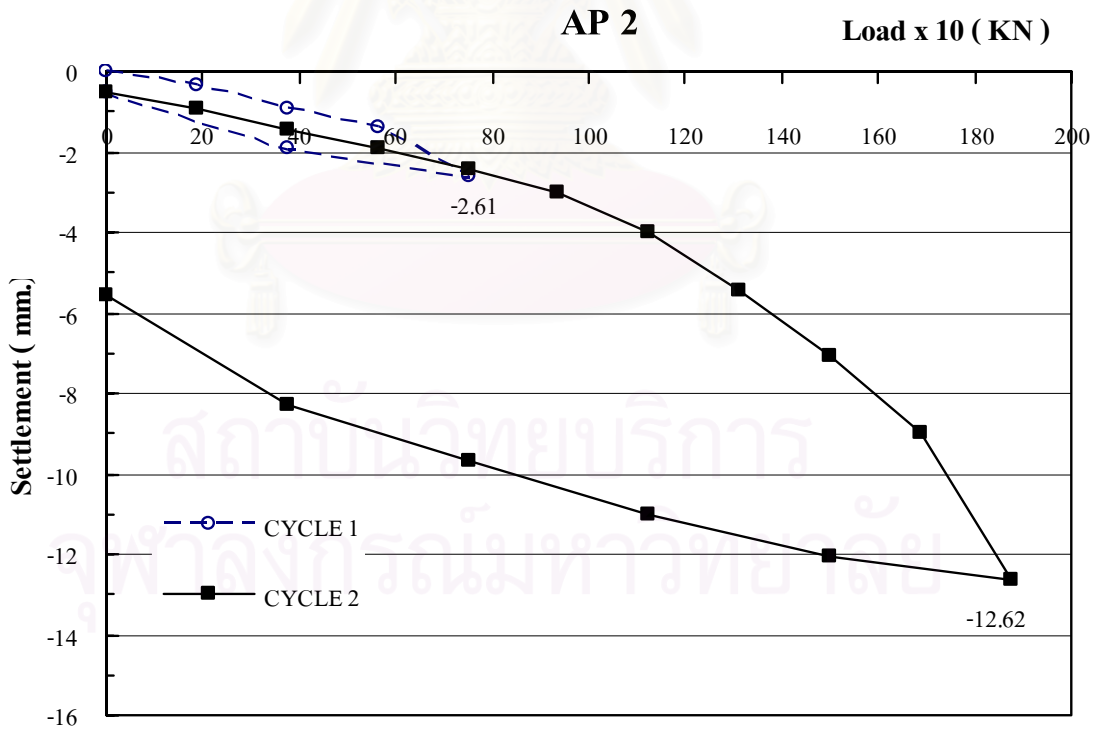
รูปที่ ข5 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 5



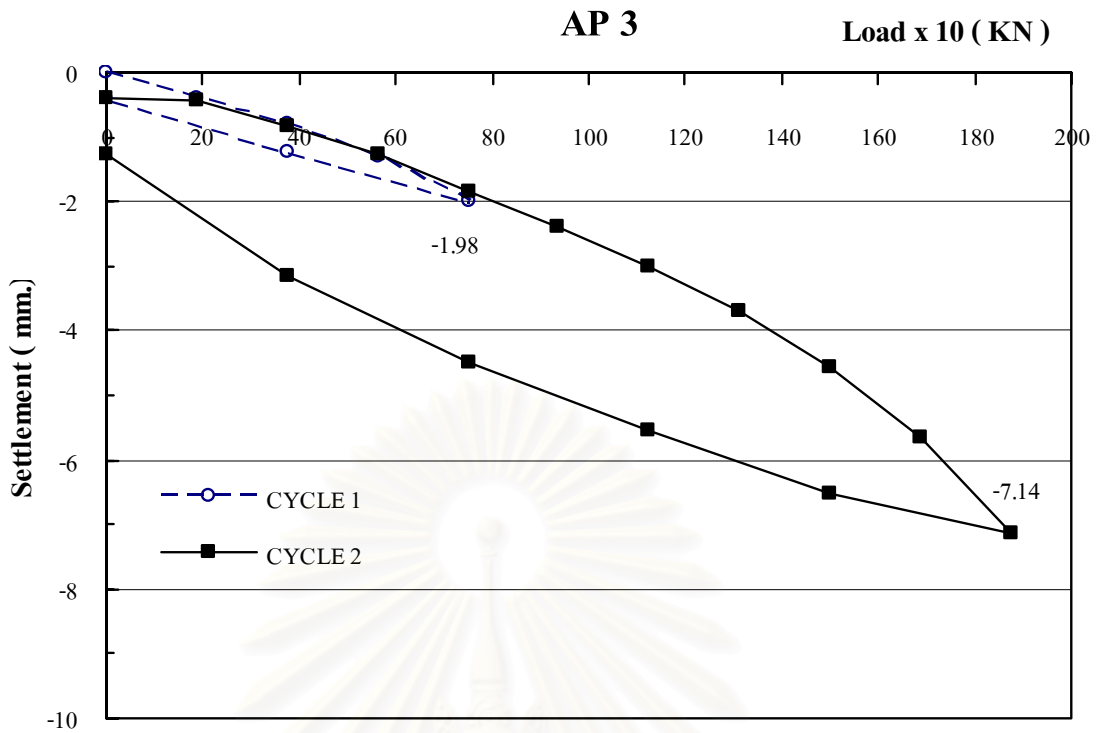
รูปที่ ข6 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม DP 6



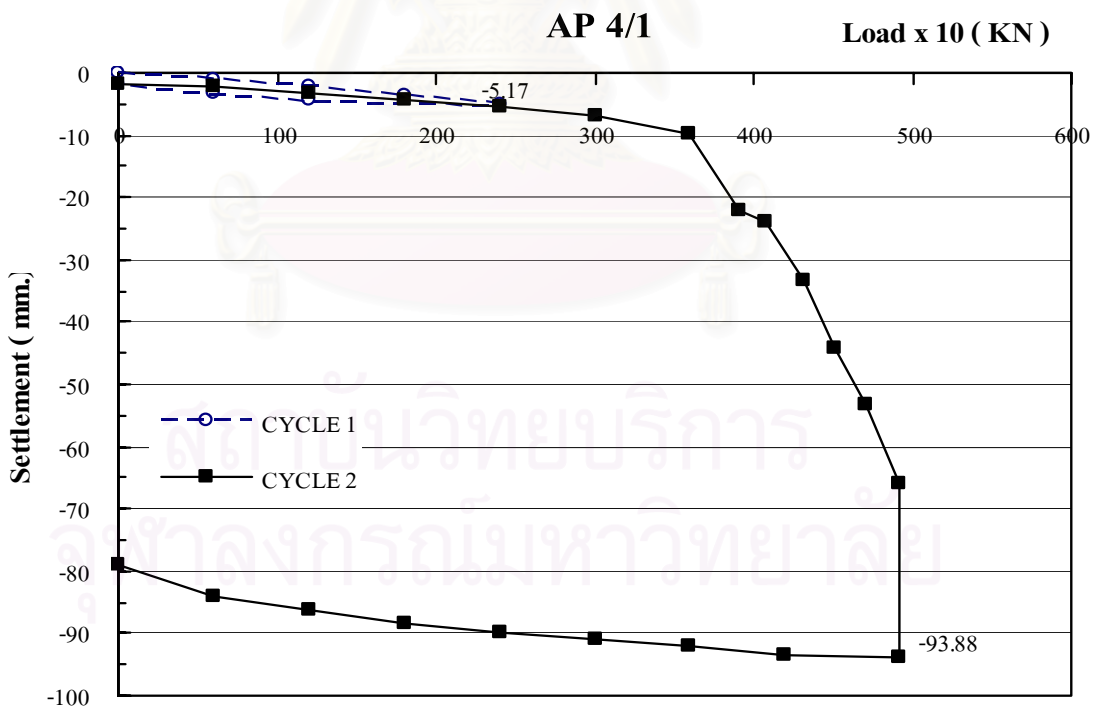
รูปที่ ข7 Load - Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 1



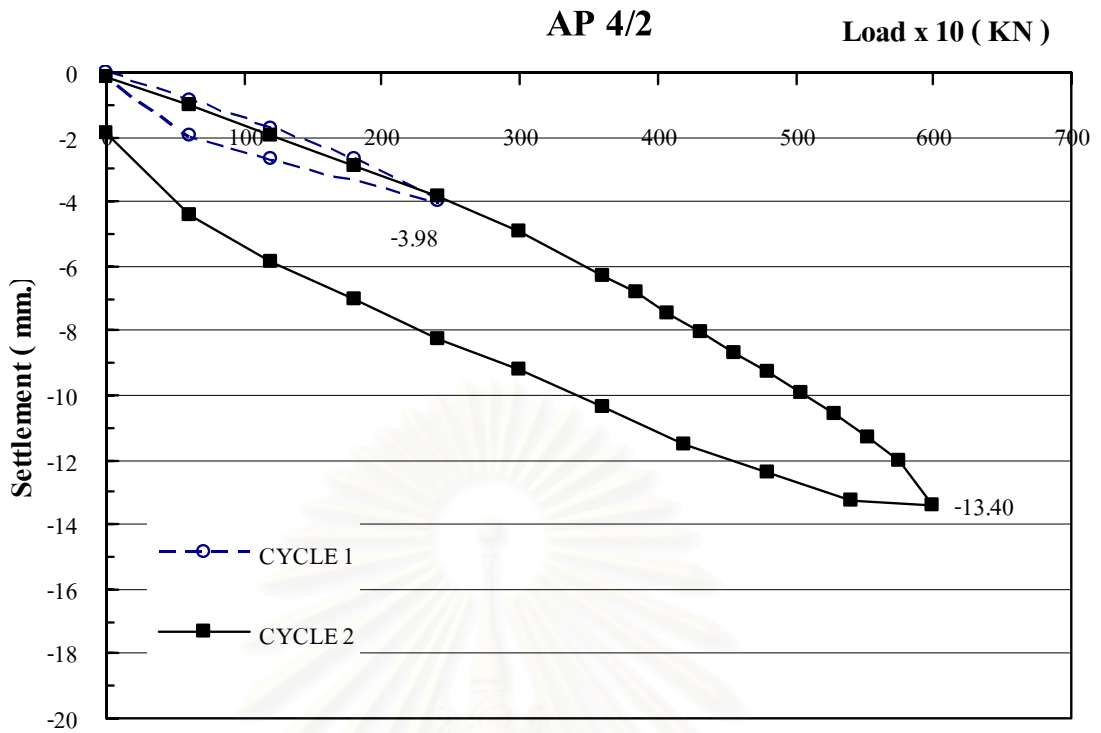
รูปที่ ข8 Load - Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 2



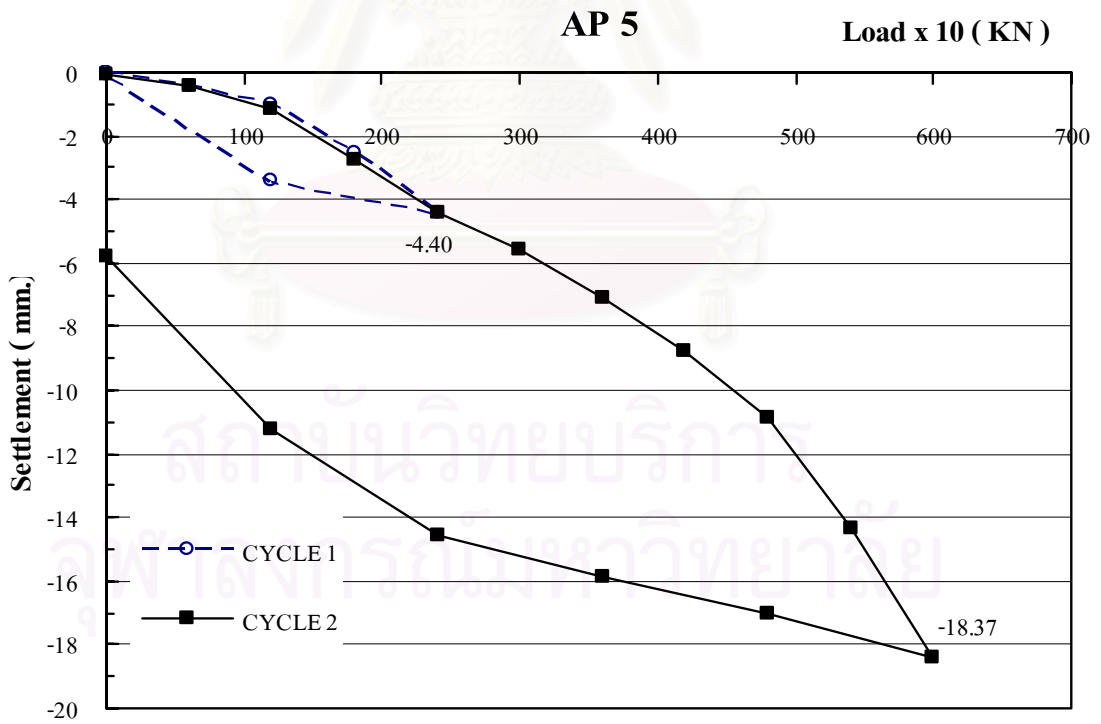
รูปที่ ข9 Load - Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 3



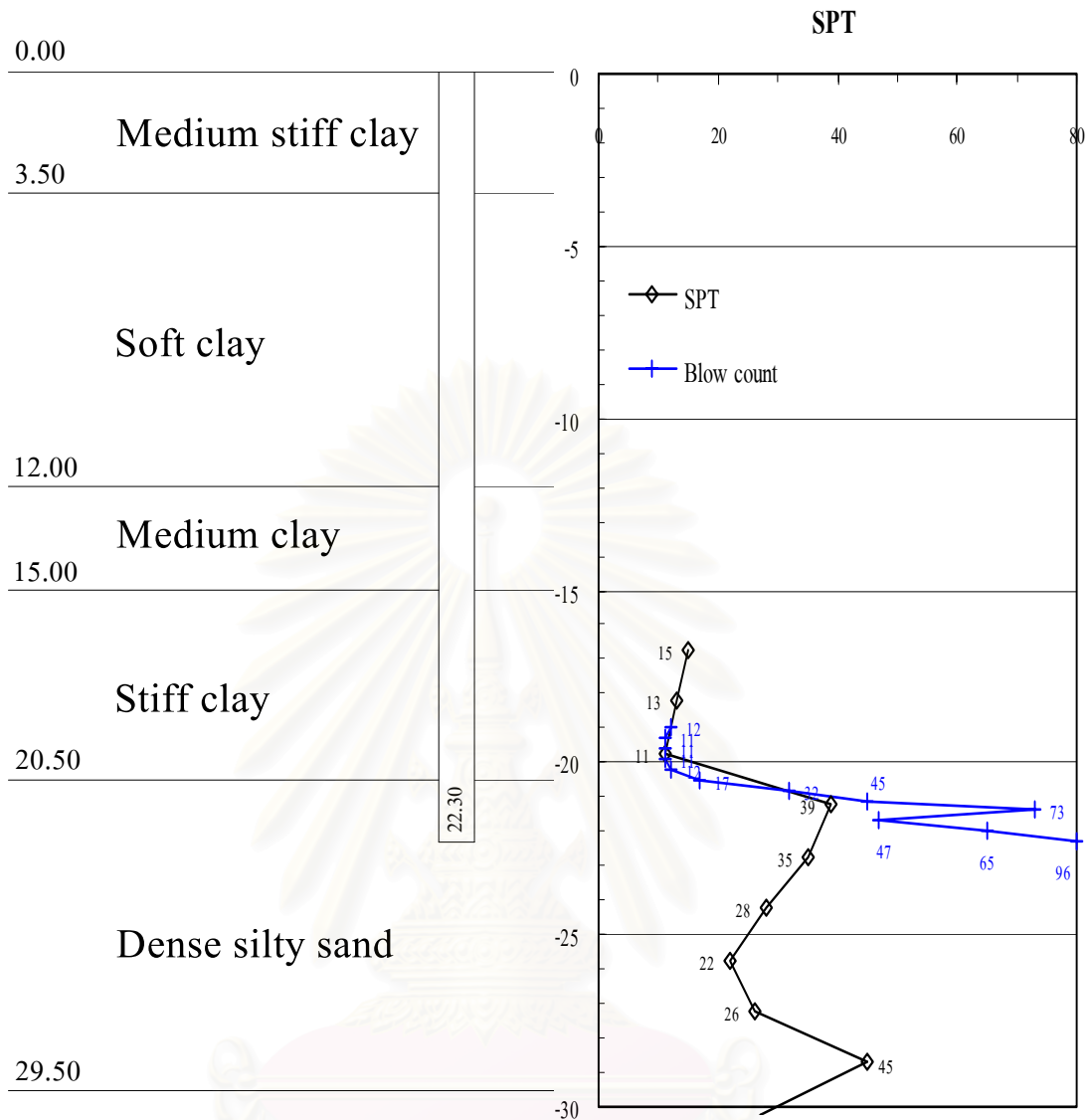
รูปที่ ข10 Load - Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 4/1



รูปที่ ข11 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 4/2



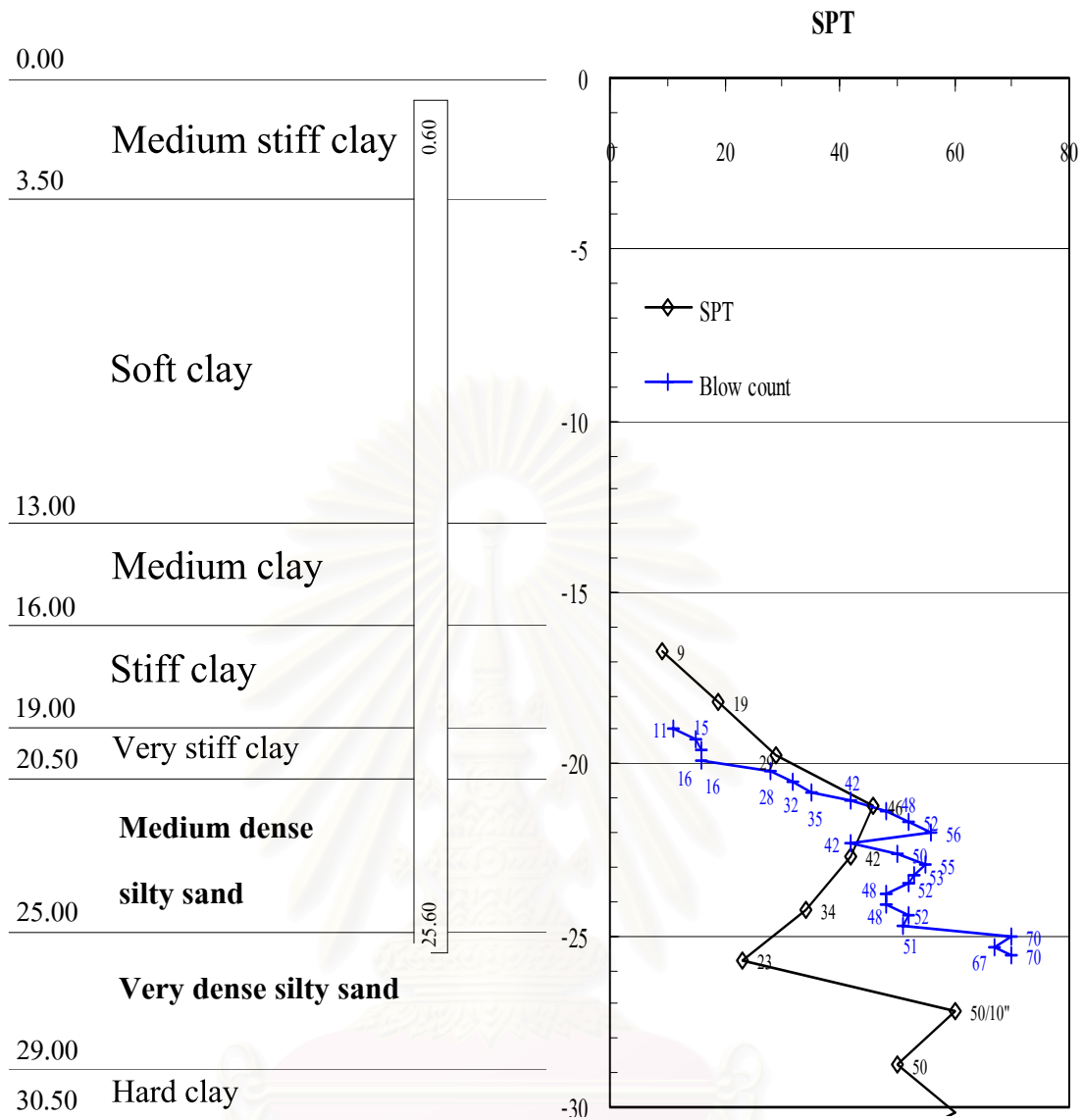
รูปที่ ข12 Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็ม AP 5



รูป ข13 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 1

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติดินของหลุมเจาะ BH-1T สำหรับใช้คำนวณ DP 1

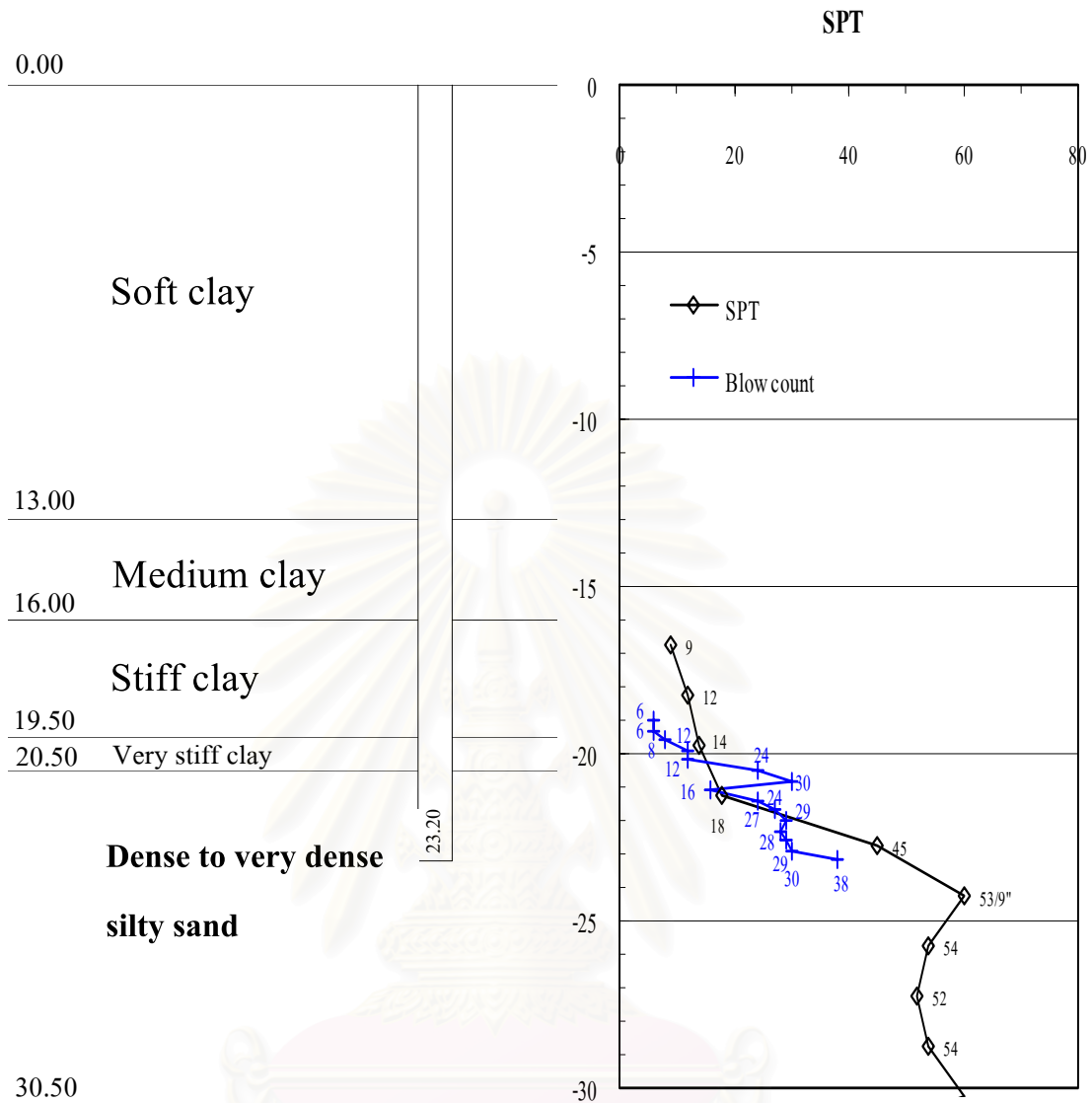
Soil Property	Medium stiff clay	Soft clay	Medium clay	Stiff clay	Dense silty sand	
Depth (m.)	0.00-3.50	3.50-12.00	12.00-15.00	15.00-20.50	20.50-22.30	
γ_t (kN/m ³)	18.60	16.00	16.50	19.70	21.00	
SPT (N Value)				13	45	
S_u (kN/m ²)	35.00	17.00	30.00	89.10		
W_n (%)	42.00	75.00	65.00	27.00		



รูป ข14 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 2

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติดินของหลุมเจาะ BH-2T สำหรับใช้คำนวณ DP 2

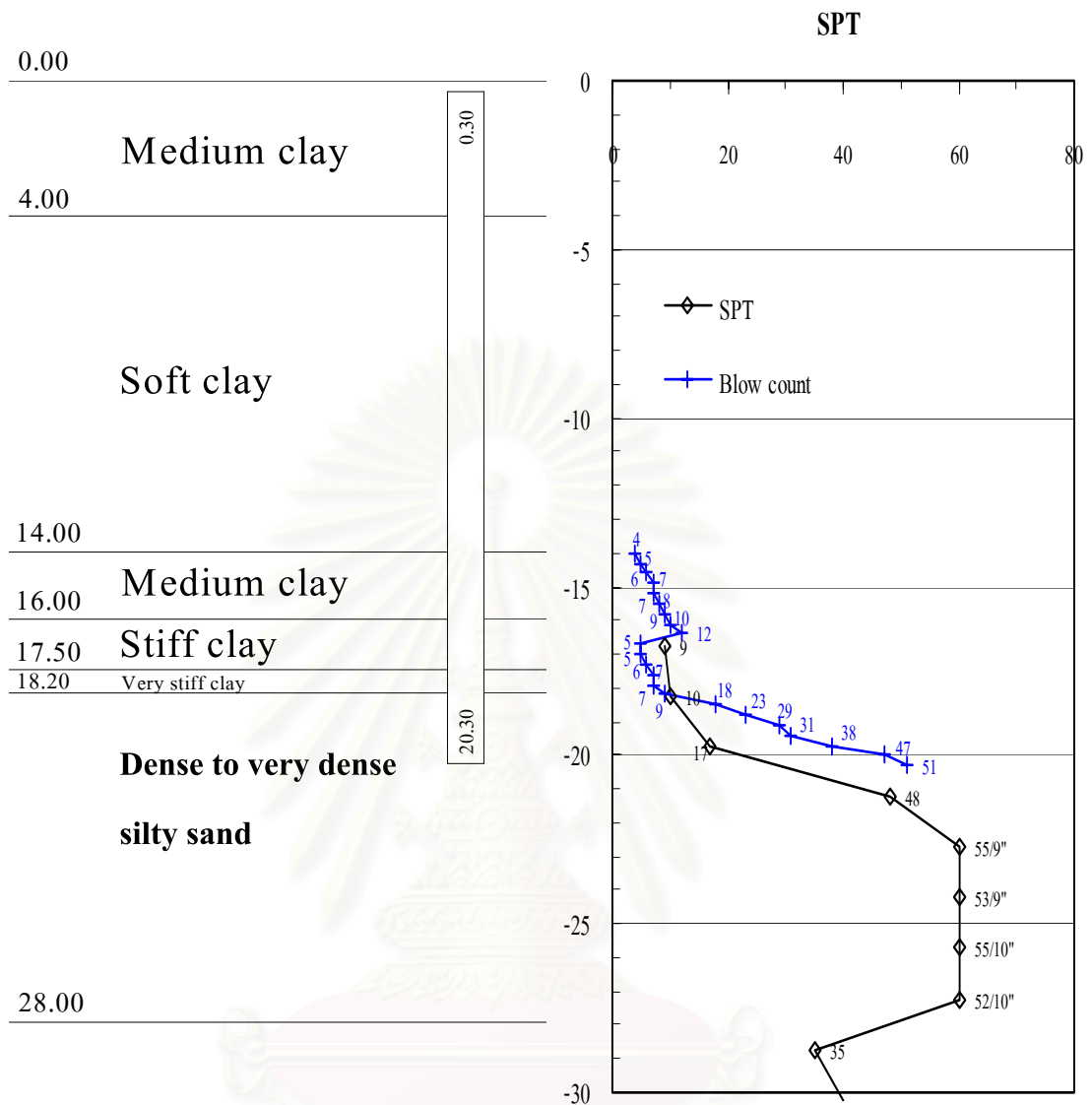
Soil Property	Medium stiff clay	Soft clay	Medium clay	Stiff Clay	Very stiff clay	Medium dense sand	Very dense fine sand
Depth (m.)	0.00-3.50	3.50-13.00	13.00-16.00	16.00-19.00	19.00-20.50	20.50-25.00	25.00-25.60
γ_t (kN/m ³)	18.50	15.80	16.80	19.50	19.80	20.50	21.00
SPT (N Value)				11	18	25	40
S_u (kN/m ²)	35.00	17.30	30.00	75.40	123.30		
W_n (%)	38.00	70.00	58.00	28.20	25.30		



รูปที่ ข15 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 3

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติดินของหลุมเจาะ BH-5A สำหรับใช้คำนวณ DP 3

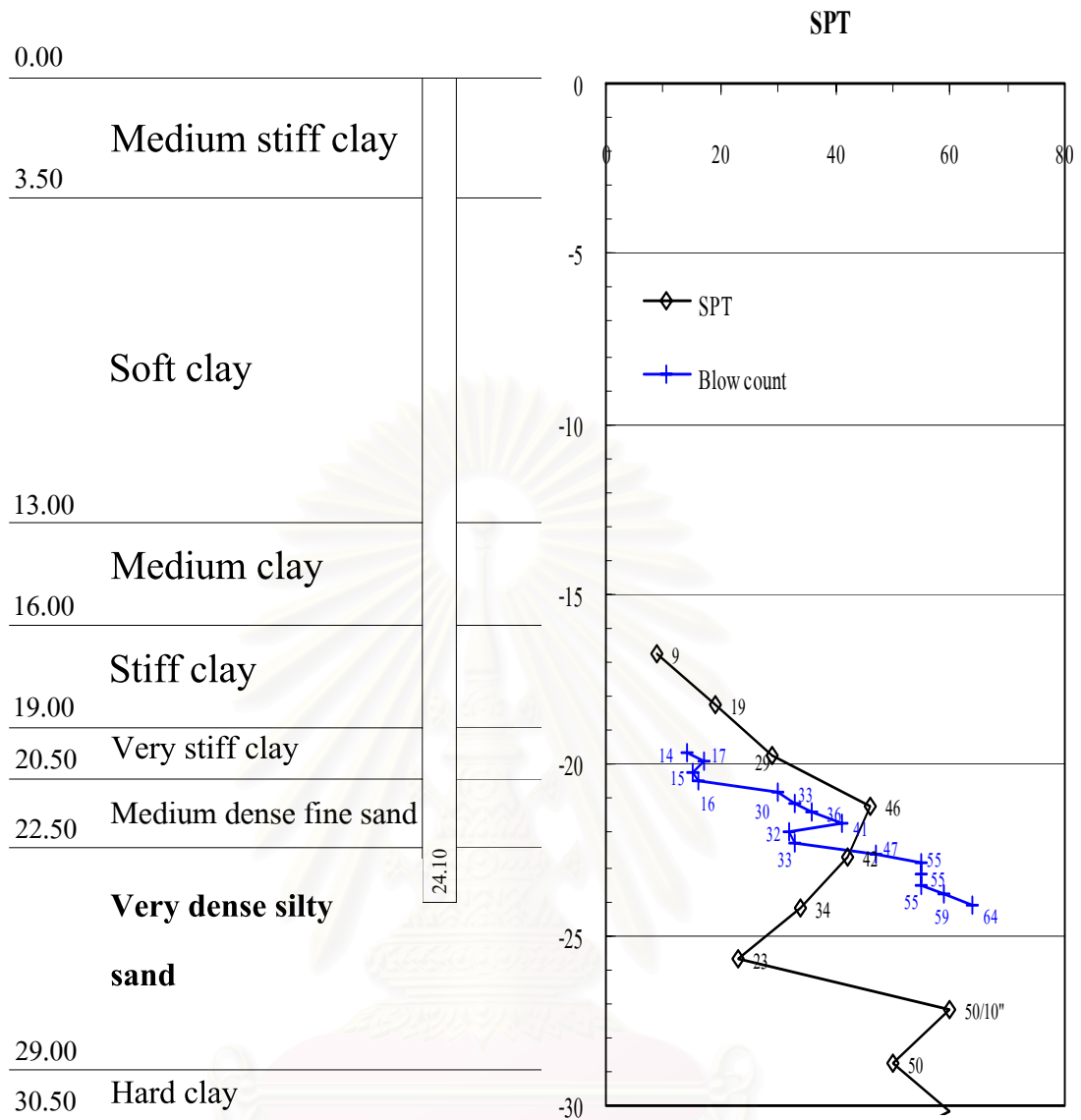
Soil Property	Soft clay	Medium clay	Stiff clay	Very stiff clay	Dense to very dense sand	
Depth (m.)	0.00-13.00	13.00-16.00	16.00-19.50	19.50-20.50	20.50-23.20	
γ_t (kN/m ³)	15.30	16.00	19.50	19.90	21.00	
SPT (N Value)			12	18	40	
S_u (kN/m ²)	20.00	32.00	82.20	123.30		
W_n (%)	67.20	54.20	28.60	25.00		



รูป ข16 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 4

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติดินของหลุมเจาะ BH-6A สำหรับใช้คำนวณ DP 4

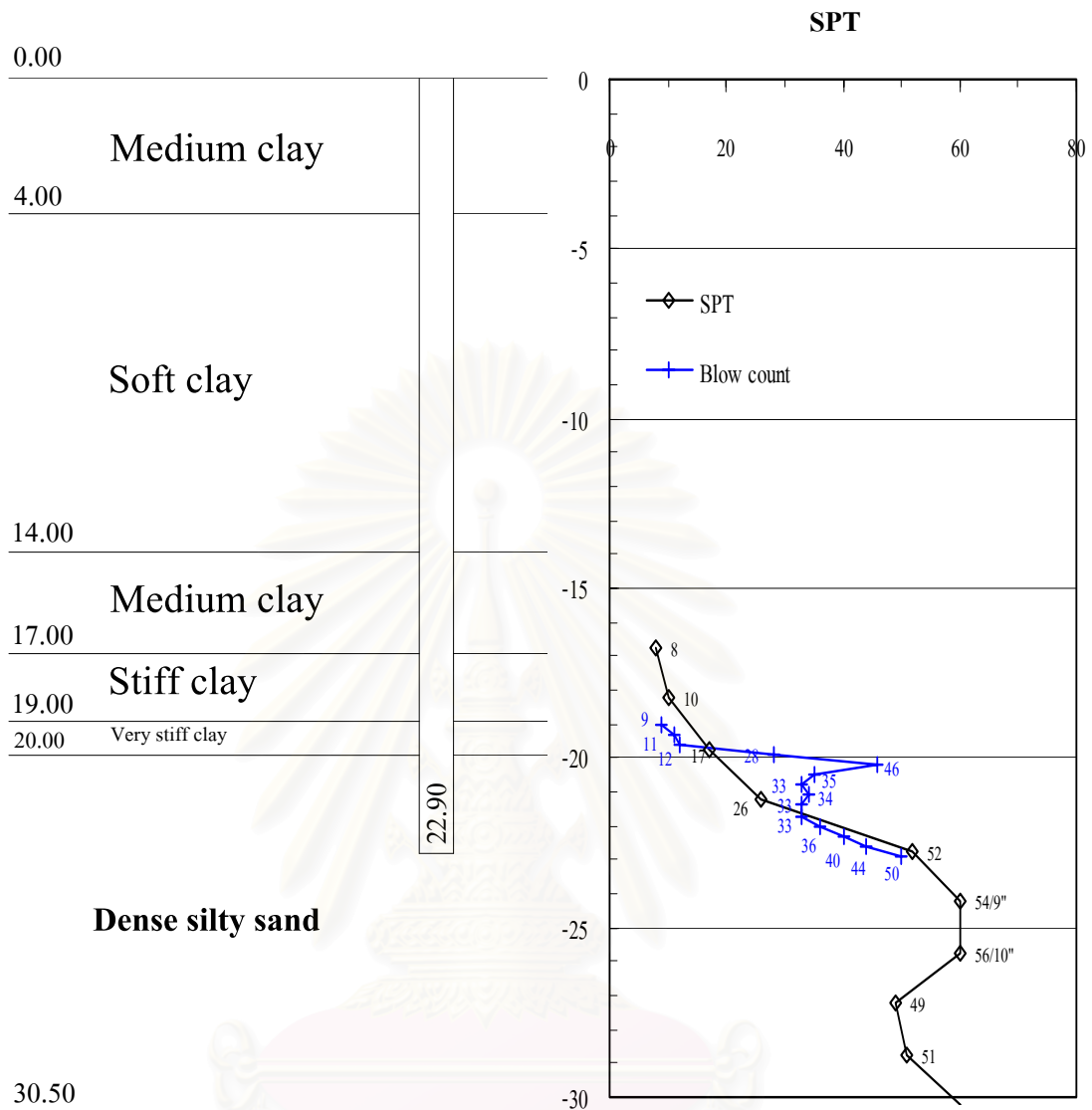
Soil Property	Medium clay	Soft clay	Medium clay	Stiff clay	Very stiff clay	Dense to very dense sand
Depth (m.)	0.00-4.00	4.00-14.00	14.00-16.00	16.00-17.50	17.50-18.20	18.20-20.30
γ_i (kN/m ³)	17.60	15.80	16.60	19.50	19.80	20.50
SPT (N Value)				15	20	48
S_u (kN/m ²)	35.00	17.30	33.00	102.80	137.00	
W_n (%)	48.00	77.10	60.00	34.00	25.70	



รูป ข17 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 5

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติดินของหลุมเจาะ BH-2T สำหรับใช้คำนวณ DP 5

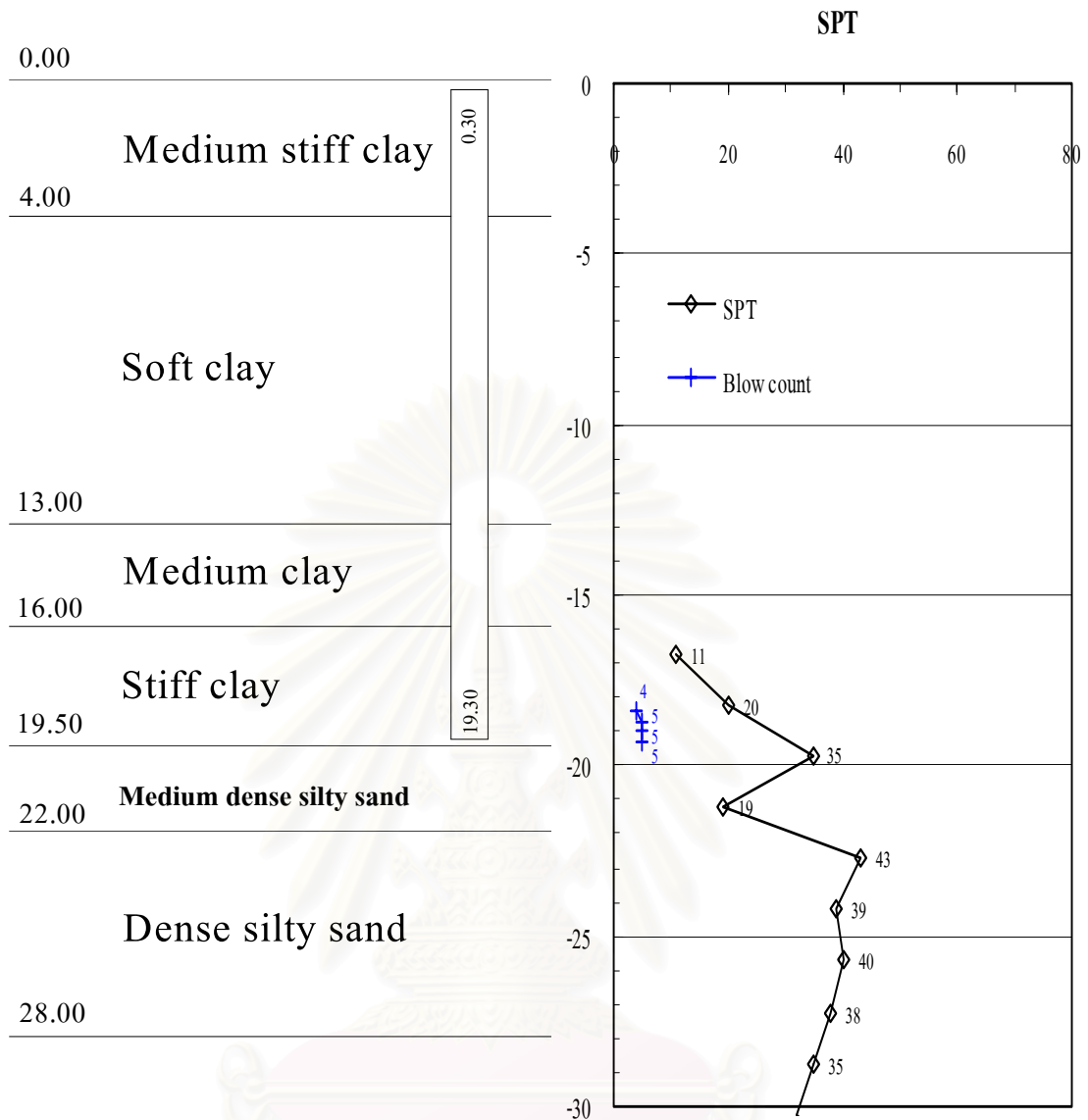
Soil Property	Medium stiff clay	Soft clay	Medium clay	Stiff clay	Very stiff clay	Medium dense sand	Very dense fine sand
Depth (m.)	0.00-3.50	3.50-13.00	13.00-16.00	16.00-19.00	19.00-20.50	20.50-22.50	22.50-24.10
γ_t (kN/m ³)	18.80	15.80	16.80	19.50	19.80	20.50	21.00
SPT (N Value)				11	18	25	40
S_u (kN/m ²)	35.00	17.50	30.00	75.40	123.30		
W_n (%)	38.00	70.00	58.00	28.20	25.30		



รูป ข18 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม DP 6

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติดินของหลุมเจาะ BH-8A สำหรับใช้คำนวณ DP 6

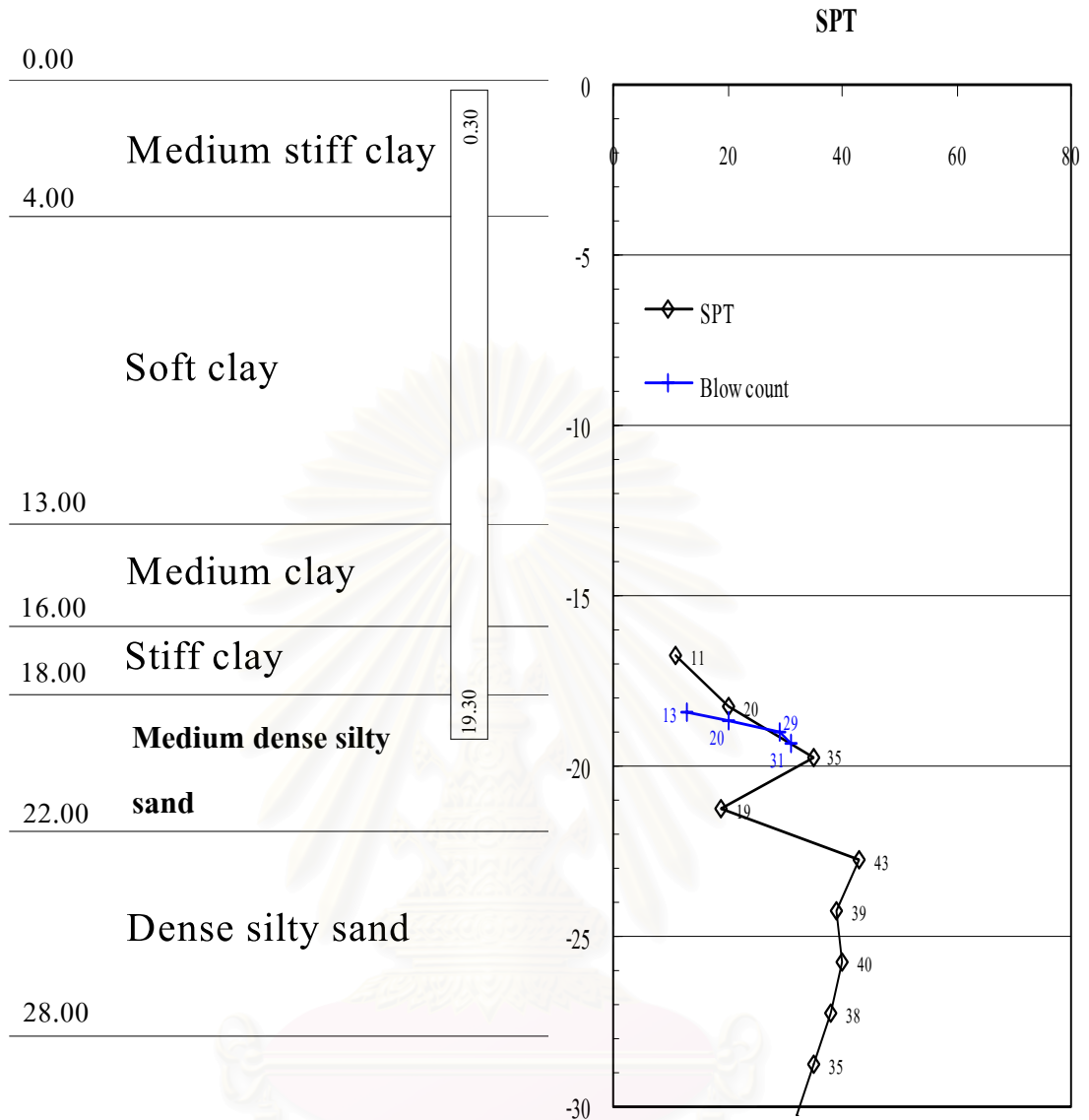
Soil Property	Medium clay	Soft clay	Medium clay	Stiff clay	Very stiff clay	Dense fine sand
Depth (m.)	0.00-4.00	4.00-14.00	14.00-17.00	17.00-19.00	19.00-20.00	20.00-22.90
γ_t (kN/m ³)	17.20	15.70	17.50	19.50	19.80	20.50
SPT (N Value)				13	22	38
S_u (kN/m ²)	35.00	17.30	33.00	89.10	150.70	
W_n (%)	45.00	71.70	50.00	24.40	23.00	



รูป ข19 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม AP 1

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติดินของหลุมเจาะ BH-4A สำหรับใช้คำนวณ AP 1

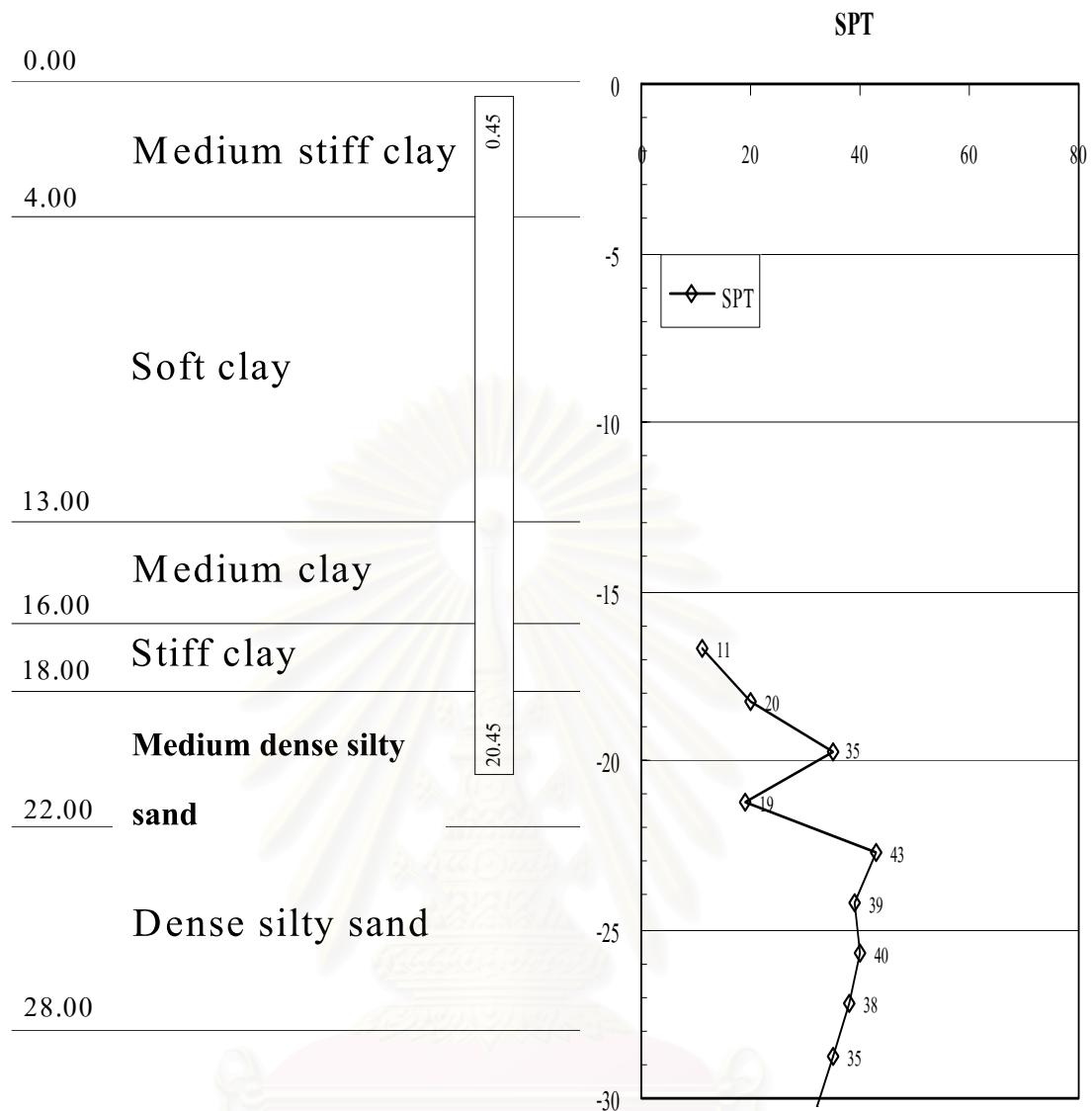
Soil Property	Medium stiff clay	Soft clay	Medium clay	Stiff clay	Medium dense fine sand
Depth (m.)	0.00-4.00	4.00-13.00	13.00-16.00	16.00-19.30	
γ_t (kN/m ³)	18.20	15.00	16.20	19.50	
SPT (N Value)				15	
S_u (kN/m ²)	72.00	17.00	35.00	102.80	
W_n (%)	31.70	74.50	65.00	21.00	



รูป ข20 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม AP 2

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติดินของหลุมเจาะ BH-4A สำหรับใช้คำนวณ AP 2

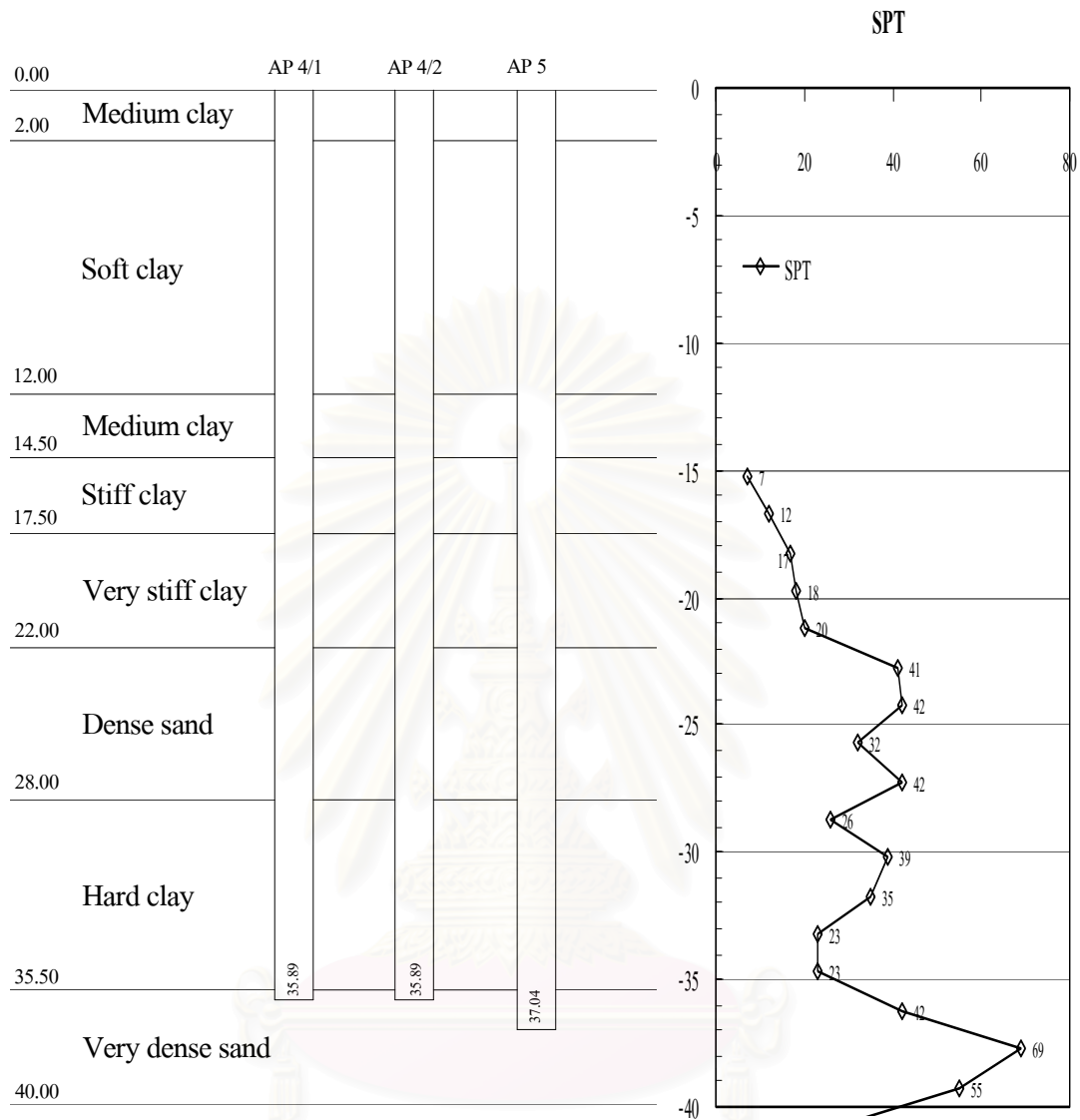
Soil Property	Medium stiff clay	Soft clay	Medium clay	Stiff clay	Medium dense fine sand	
Depth (m.)	0.00-4.00	4.00-13.00	13.00-16.00	16.00-18.00	18.00-19.30	
γ_t (kN/m ³)	18.20	15.00	16.20	19.50	21.00	
SPT (N Value)				15	36	
S_u (kN/m ²)	72.00	17.00	35.00	102.80		
W_n (%)	31.70	74.50	65.00	21.00		



รูป ข21 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม AP 3

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติดินของหลุมเจาะ BH-4A สำหรับใช้คำนวณ AP 2

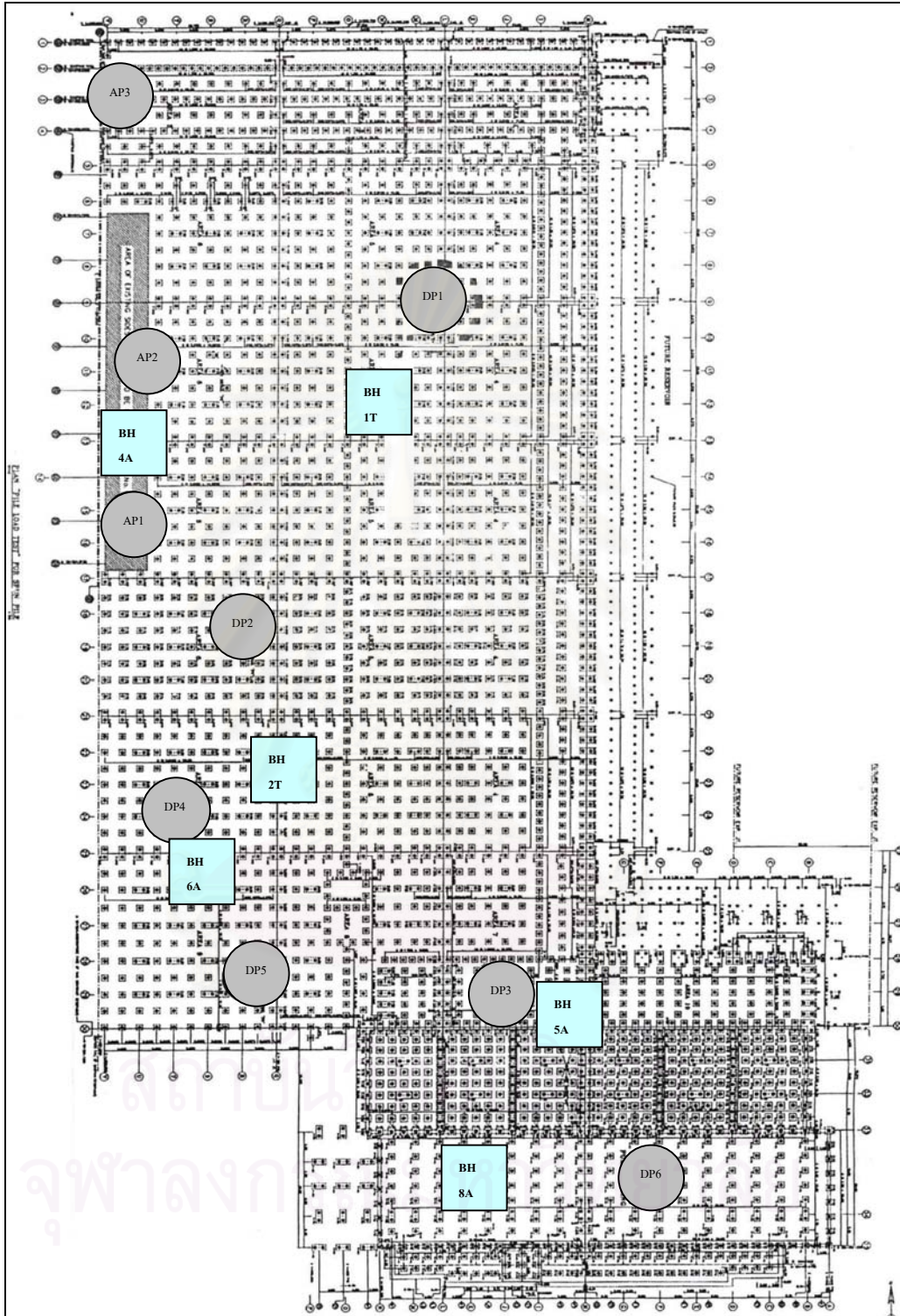
Soil Property	Medium stiff clay	Soft clay	Medium clay	Stiff clay	Medium dense fine sand
Depth (m.)	0.00-4.00	4.00-13.00	13.00-16.00	16.00-18.00	18.00-20.45
γ_t (kN/m ³)	18.20	15.00	16.20	19.50	21.00
SPT (N Value)				15	36
S_u (kN/m ²)	72.00	17.00	35.00	102.80	
W_n (%)	31.70	74.50	65.00	21.00	



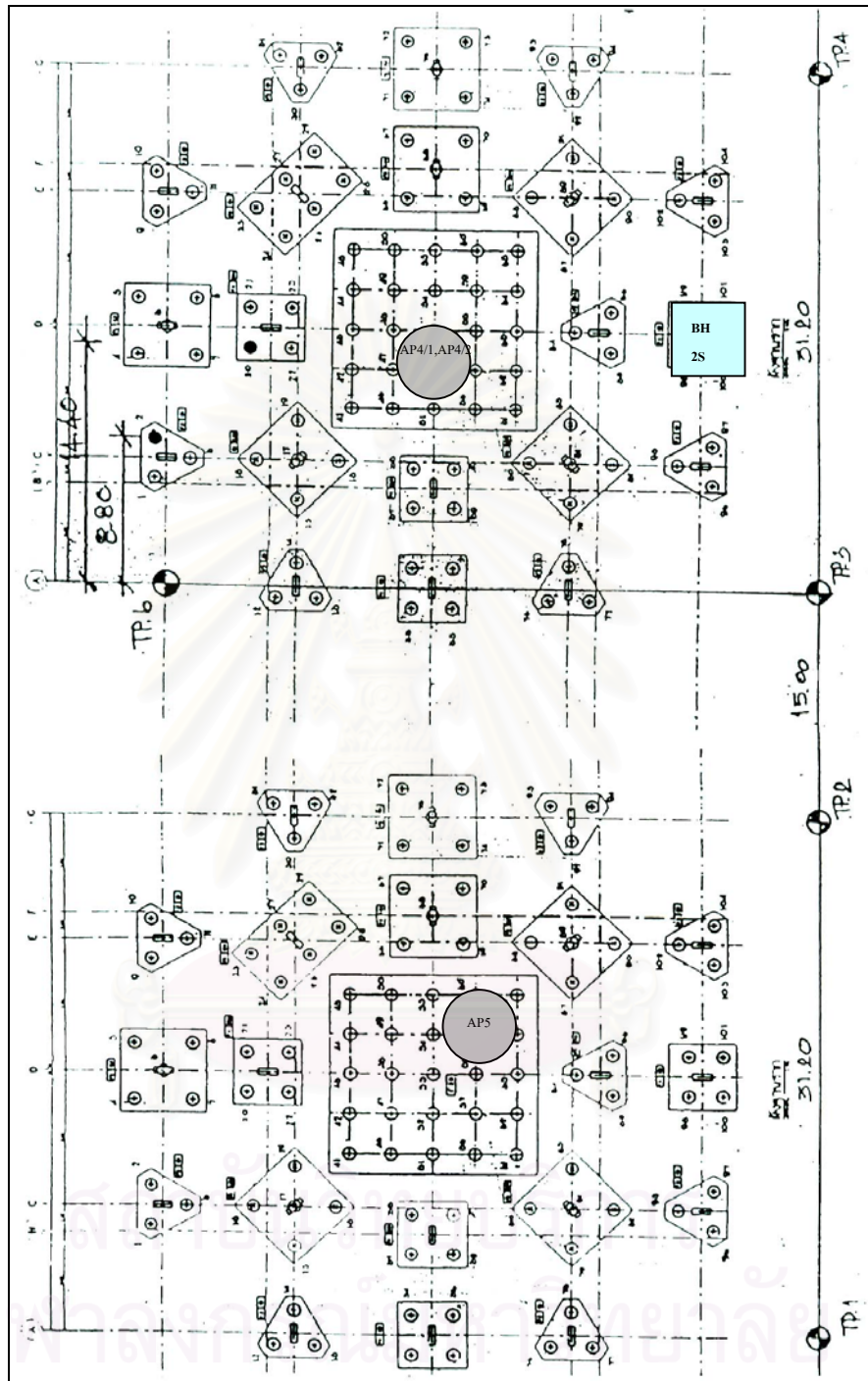
รูป ข22 แสดงรูปตัดชั้นดินของเสาเข็ม AP 4/1, AP 4/2 และ AP 5

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติดินของหลุมเจาะ BH-2S สำหรับใช้คำนวณ AP 4/1, AP 4/2 และ AP 5

Soil Property	Medium clay	Soft clay	Medium clay	Stiff clay	Very stiff clay	Dense sand	Hard clay	Very dense sand
Depth (m.)	0.00-2.00	2.00-12.00	12.00-14.50	14.50-17.50	17.50-22.00	22.00-28.00	28.00-35.50	35.50-38.00
γ_1 (kN/m ³)	18.00	15.00	17.00	19.00	20.00	21.00	20.00	21.50
SPT (N Value)				10	18	40	35	55
S_u (kN/m ²)	36.00	17.00	33.00	68.50	123.30		239.80	
W_n (%)	43.30	84.00	51.70	27.00	22.00		18.40	



รูปที่ ข23 แสดงแผนผังตำแหน่งเสาเข็มและตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจดินในโครงการก่อสร้างโรง
กรองน้ำของการประปา



รูปที่ ข24 แสดงแผนผังตำแหน่งเสาเข็มและตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจดินในโครงการก่อสร้าง อาคาร ฟักข้าวโพด

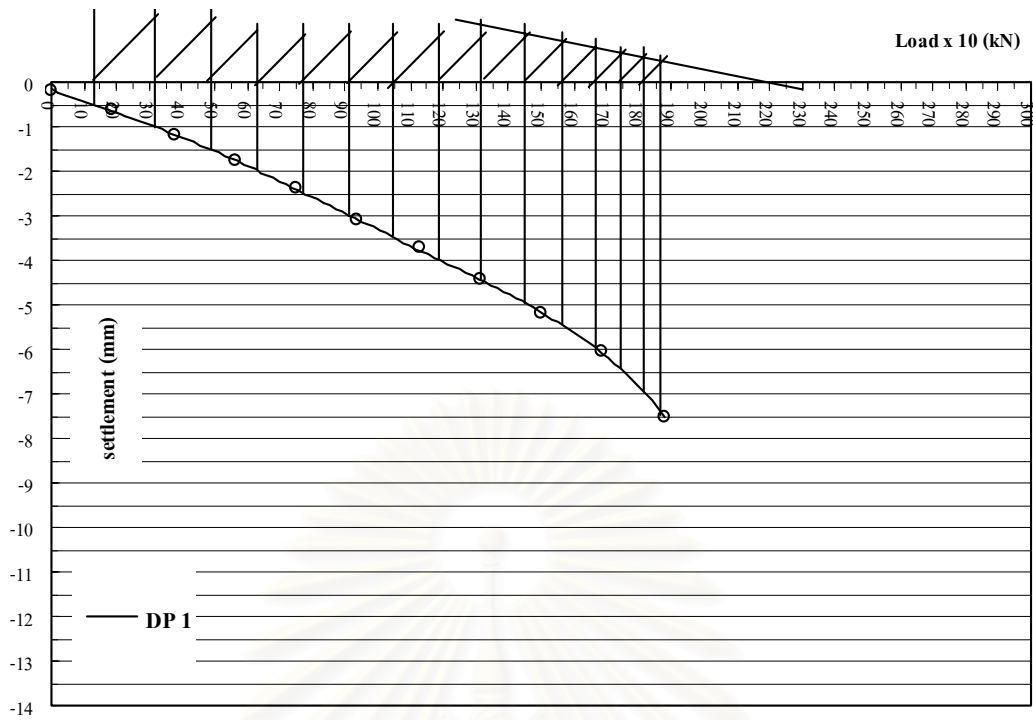


ภาคผนวก ค

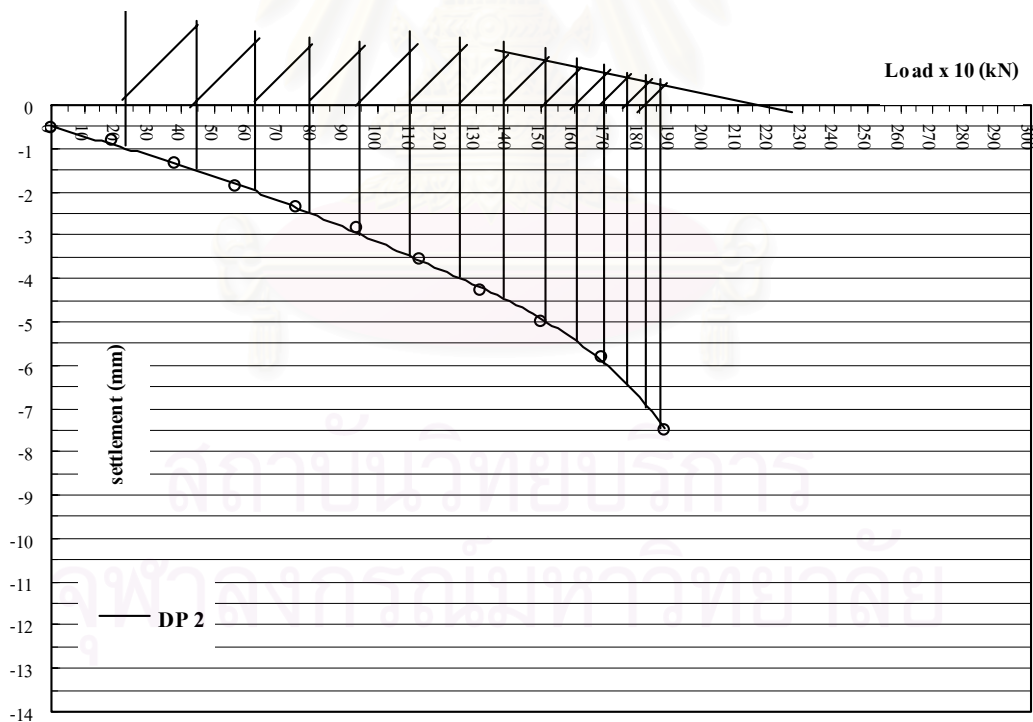
การคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจาก Load settlement curve โดยวิธี

Mazurkiewicz

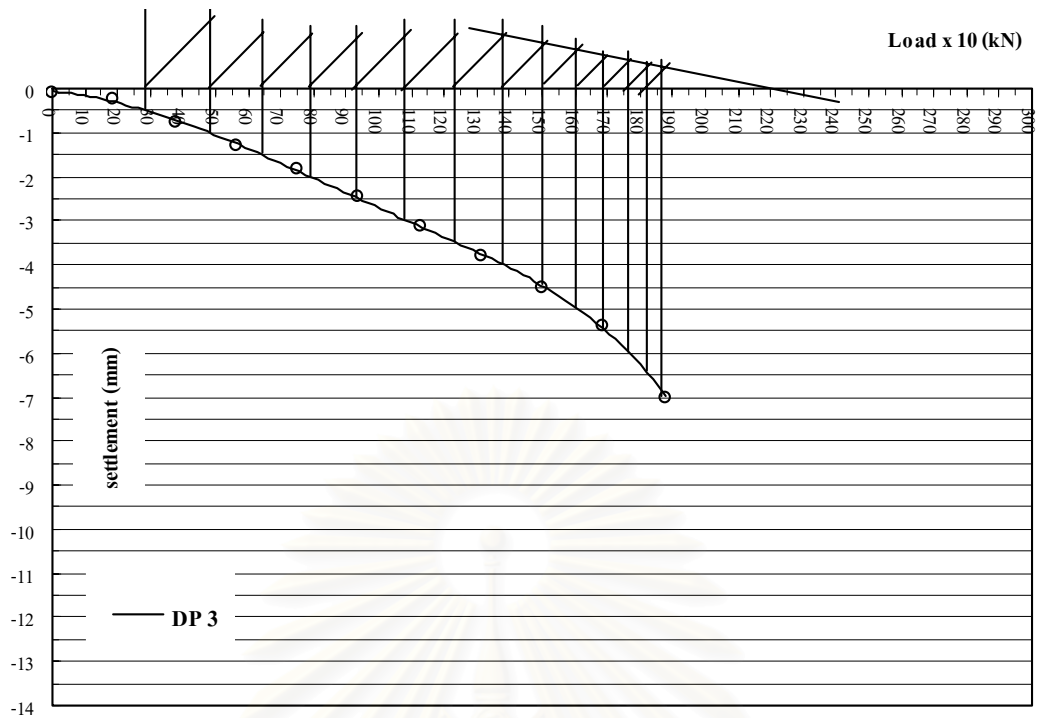
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



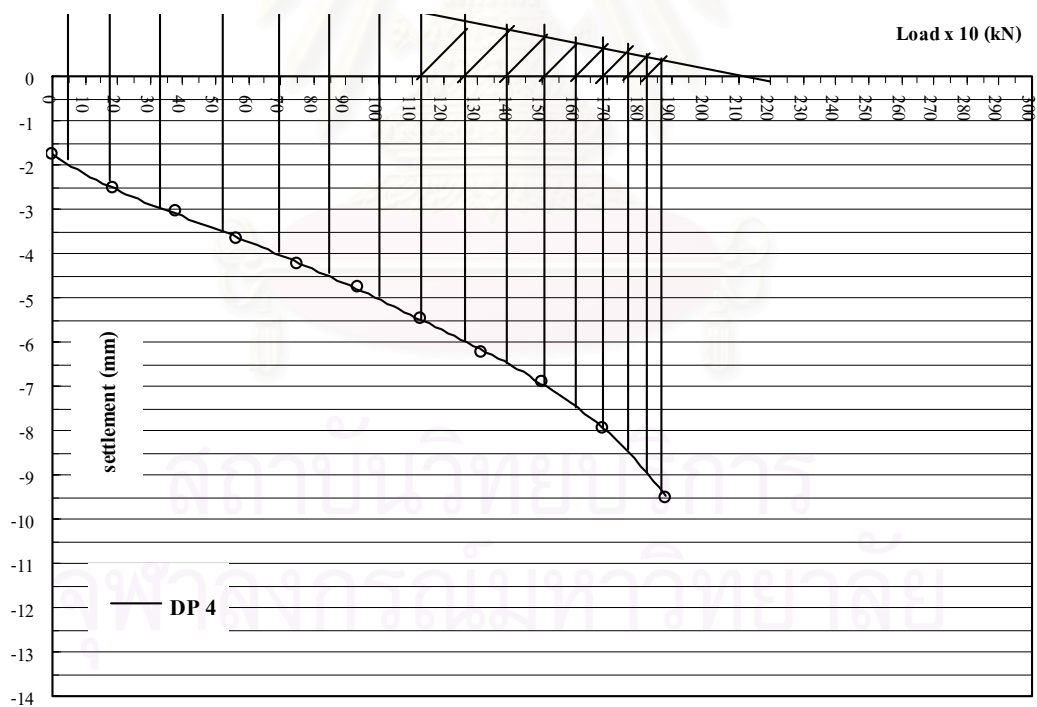
รูปที่ ค1 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม DP 1 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)



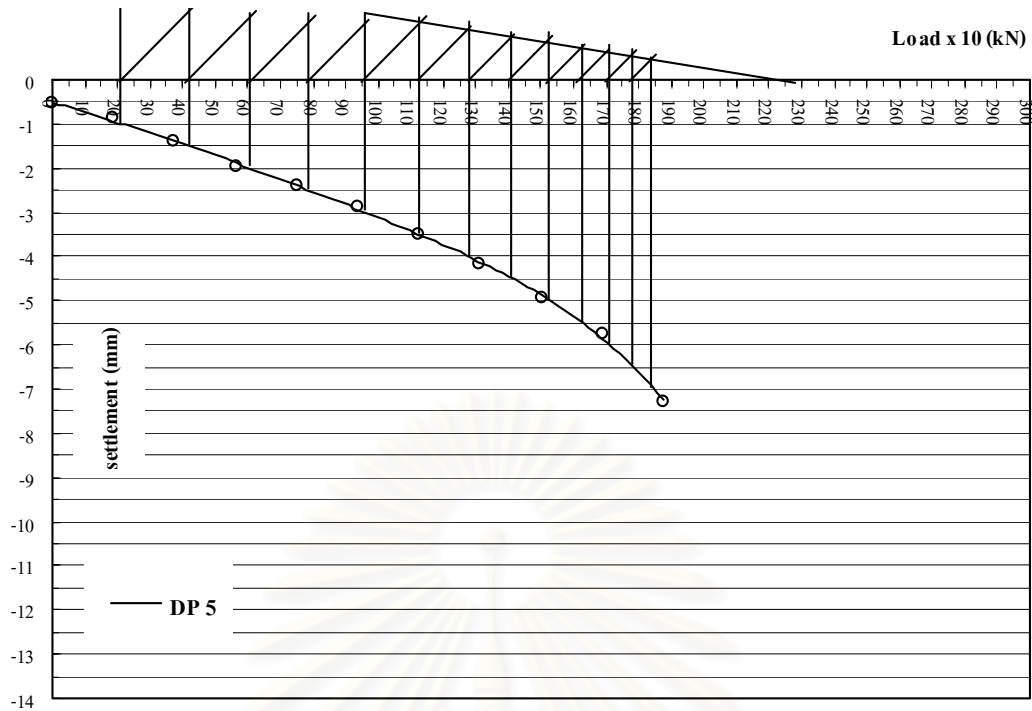
รูปที่ ค2 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม DP 2 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)



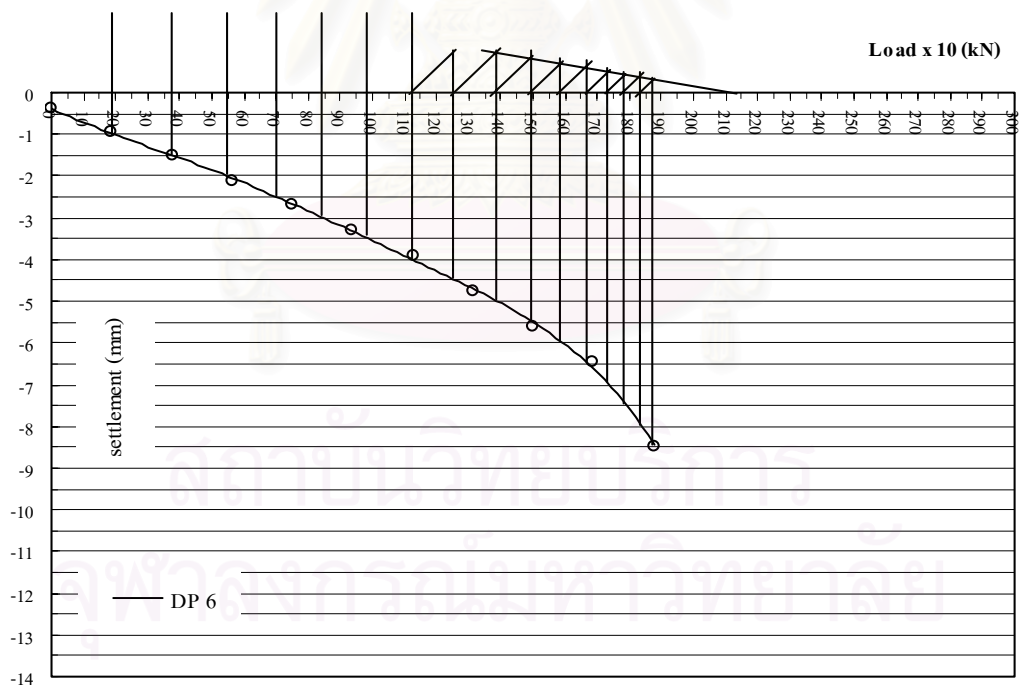
รูปที่ ค3 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัของเสาเข็ม DP 3 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)



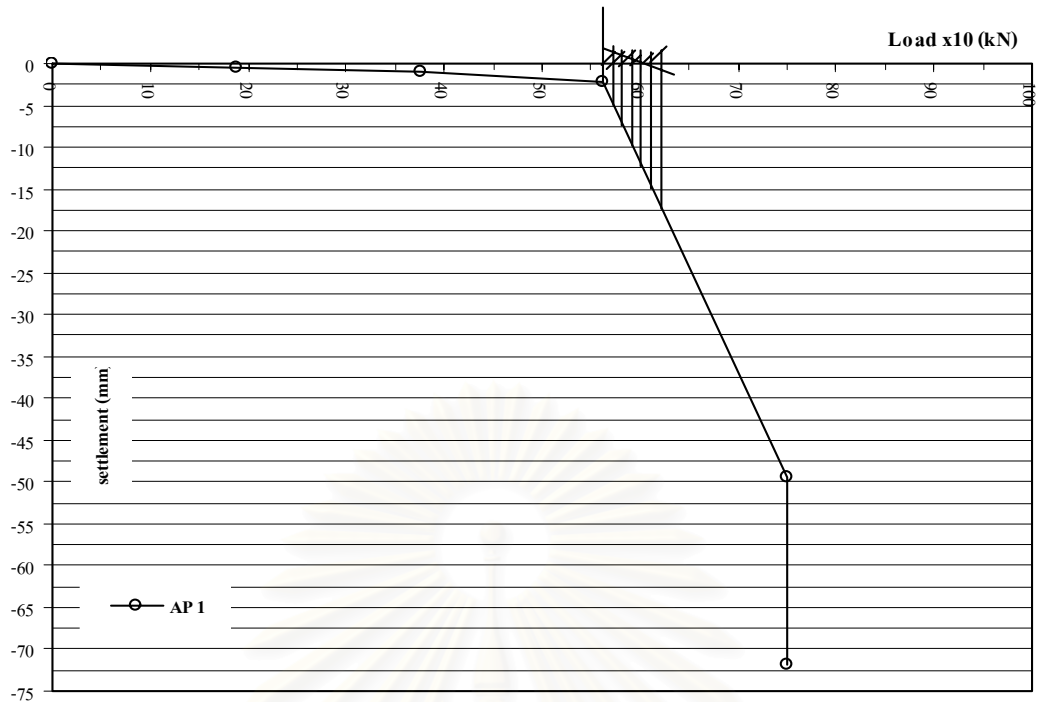
รูปที่ ค4 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัของเสาเข็ม DP 4 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)



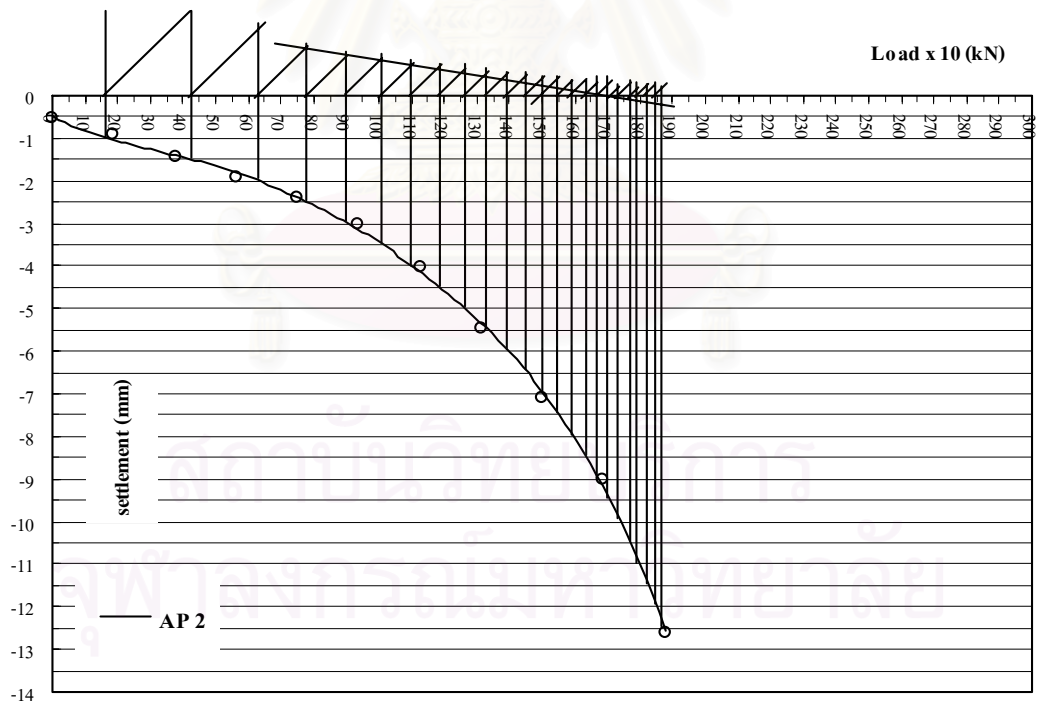
รูปที่ ค5 วิธีการคำนวณหาค่านำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม DP 5 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)



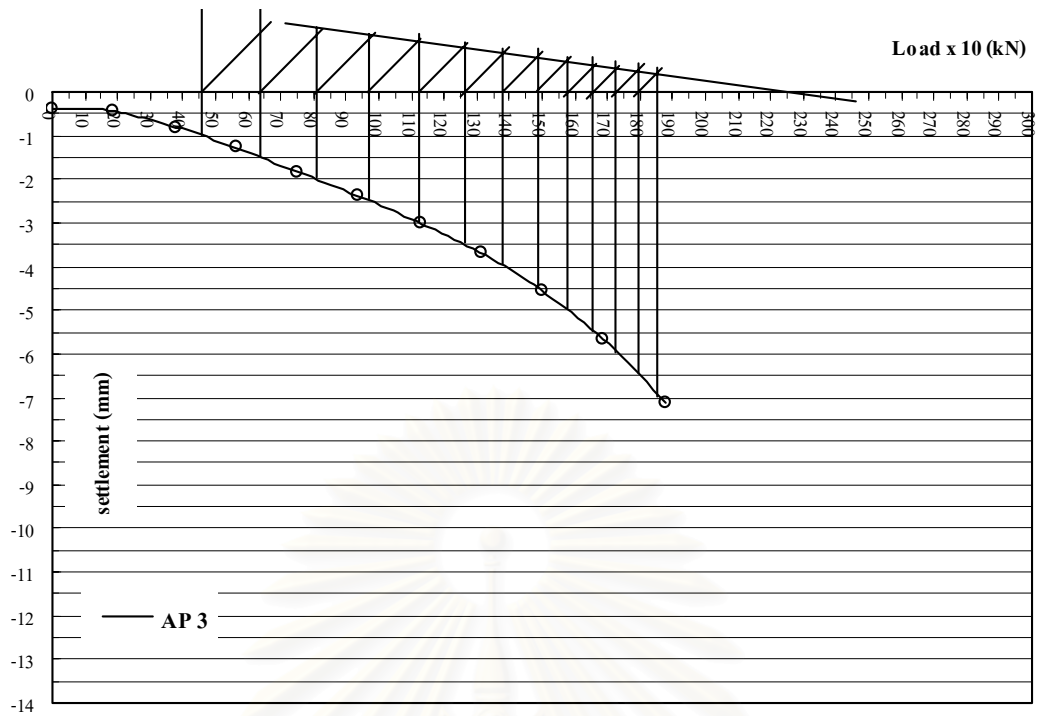
รูปที่ ค6 วิธีการคำนวณหาค่านำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม DP 6 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)



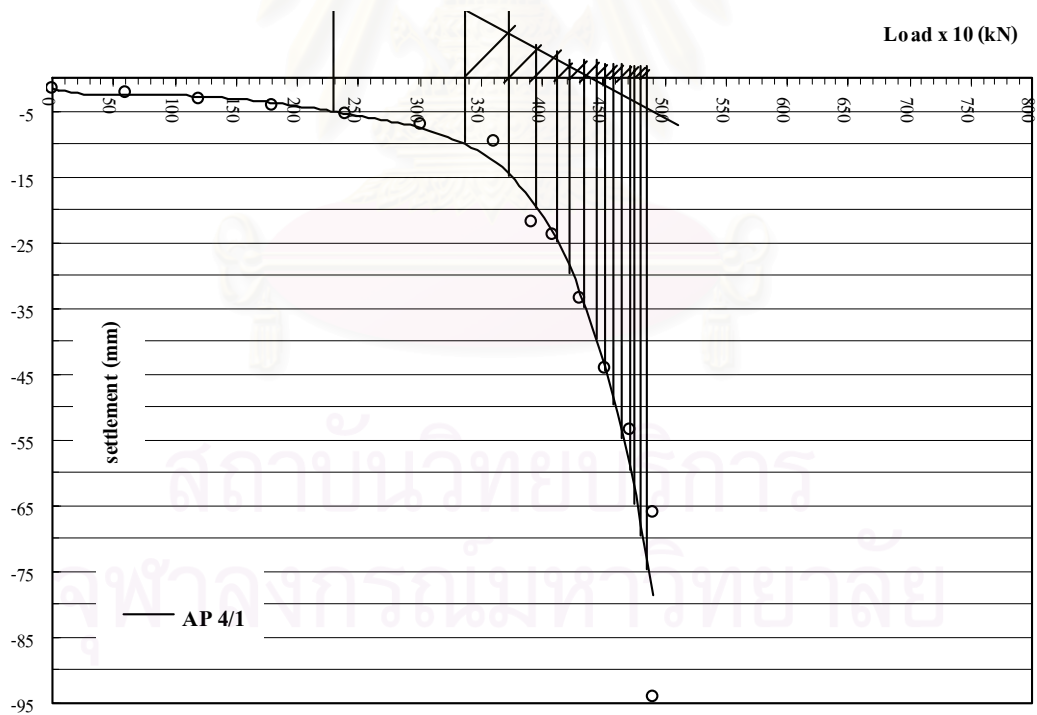
รูปที่ ค7 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม AP 1 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)



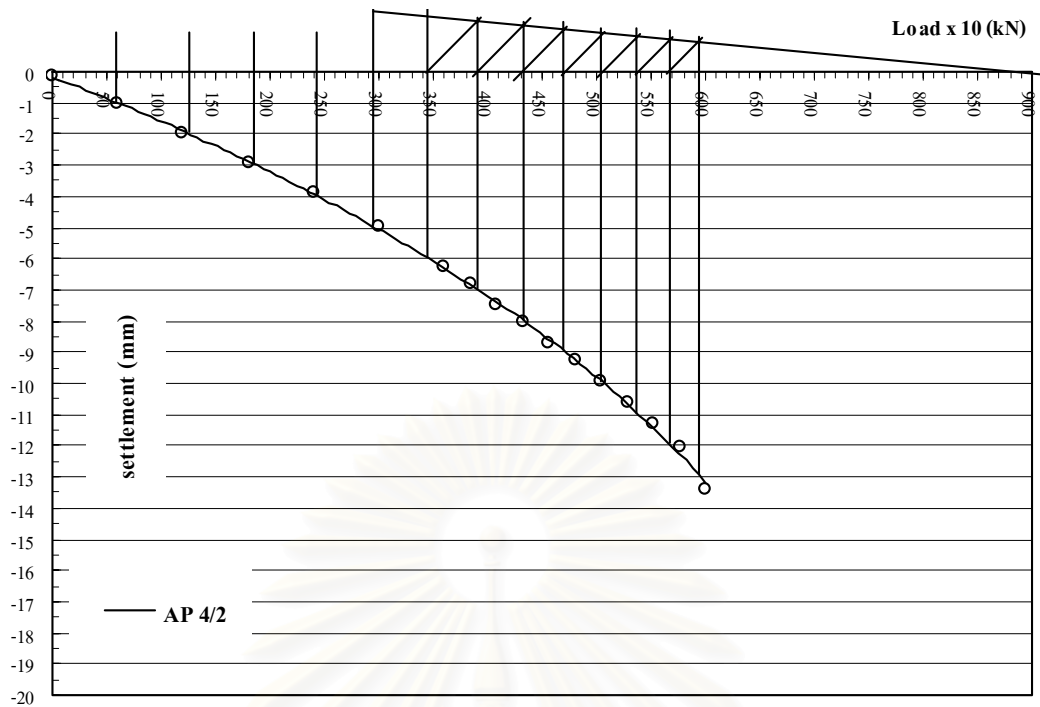
รูปที่ ค8 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม AP 2 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)



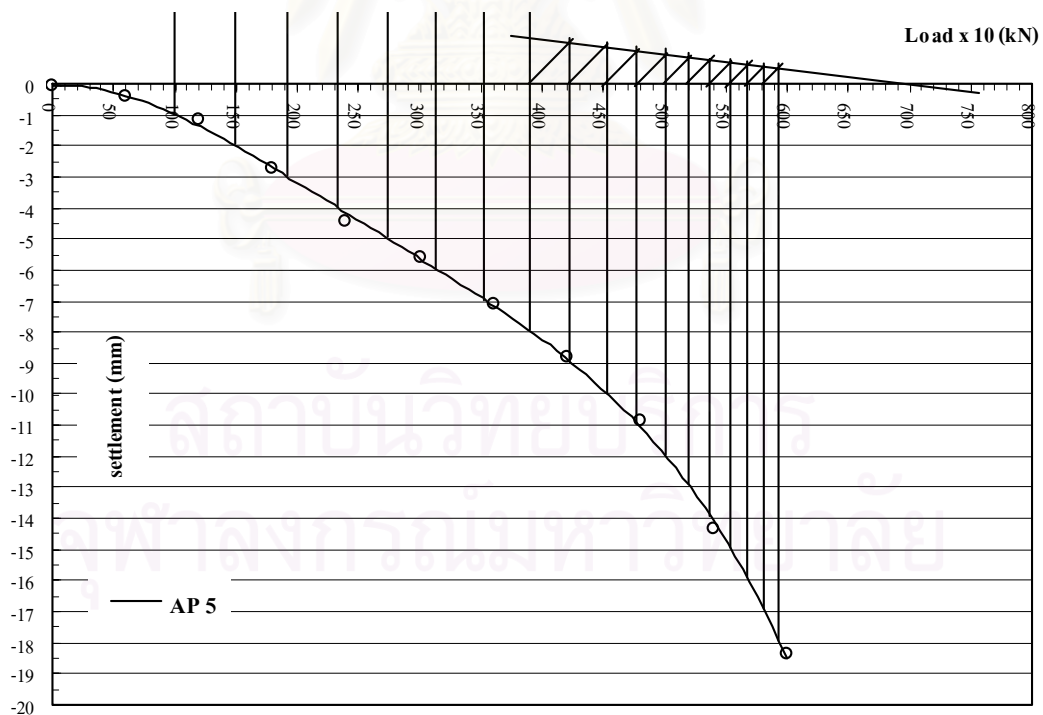
รูปที่ ๙ วิธีการคำนวณหาค่านำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม AP 3 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)



รูปที่ ๑๐ วิธีการคำนวณหาค่านำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม AP 4/1 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)



รูปที่ ค11 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม AP 4/2 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)



รูปที่ ค12 วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม AP 5 โดยวิธี Mazurkiewicz (1972)

ตารางที่ ๑1 แสดงผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยและค่าของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัย

Case	Type of Pile Installation	Pile No.	Size x Depth	Failure Load by Maz's (Q_{ult}) (x 10 KN)	Skin friction (Q_f) (x 10 KN)	End bearing (Q_b) (x 10 KN)	% of Skin friction	% of End bearing	Soil at Pile tip
1	Full Drive with tip in sand	DP 1	φ 0.50 x 22.30	220.00	160.00	60.00	72.73	27.27	1 st Sand
		DP 2	φ 0.50 x 25.60	215.00	157.00	58.00	73.02	26.98	1 st Sand
		DP 3	φ 0.50 x 23.20	218.00	160.00	58.00	73.39	26.61	1 st Sand
		DP 4	φ 0.50 x 20.30	210.00	145.00	65.00	69.05	30.95	1 st Sand
		DP 5	φ 0.50 x 24.10	220.00	158.00	62.00	71.82	28.18	1 st Sand
		DP 6	φ 0.50 x 22.90	210.00	155.00	55.00	73.81	26.19	1 st Sand
2	Auger press in clay with final drive	AP 1	φ 0.50 x 19.30	60.00	58.50	1.05	97.50	2.50	Stiff Clay
3	Auger press in clay with final drive into sand	AP 2	φ 0.50 x 19.30	170.00	116.00	54.00	68.24	31.76	1 st Sand
4	Full auger into sand layer with toe grout and redrive	AP 3	φ 0.50 x 20.45	222.00	150.00	72.00	67.57	32.43	1 st Sand

ตารางที่ ค1(ต่อ) แสดงผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและค่าของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัย

Case	Type of Pile Installation	Pile No.	Size x Depth	Failure Load by Maz's (Q_{ult}) (x 10 KN)	Skin friction (Q_f) (x 10 KN)	End bearing (Q_b) (x 10 KN)	% of Skin friction	% of End bearing	Soil at Pile tip
5	Full auger with press into sand	AP 4/1	φ 0.80 x 35.89	440.00	355.00	85.00	80.68	19.32	2 nd Sand
6	Full auger with press into sand with single stage of grout	AP 4/2	φ 0.80 x 35.89	880.00	570.00	310.00	64.77	35.23	2 nd Sand
7	Full auger in sand with two stage of grout	AP 5	φ 0.80 x 37.04	700.00	510.00	190.00	72.86	27.14	2 nd Sand

หมายเหตุ

- ค่าแรงเสียดทานด้านข้างประมาณจาก load settlement curve ของเสาเข็มในช่วงอีลาสติก



ภาคผนวก ง

ผลการคำนวณหาค่า Friction Factor (β), Adhesion Factor (α) และ Bearing Capacity Factor (N_q)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง1 แสดงการคำนวณหาค่า Friction factor, β (คิผลของ Drawdown)

Pile No.	Dia (m)	L (m)	Q _{ult} (ton)	Q _r (ton)	Q _b (ton)	Shaft resistance																			
						Medium to stiff clay (top soil)				Soft clay				Medium clay				Stiff clay				Very stiff clay			
						S _u (t/m ²)	α	L (m)	Q _{s1} (ton)	S _u (t/m ²)	α	L (m)	Q _{s2} (ton)	S _u (t/m ²)	α	L (m)	Q _{s3} (ton)	S _u (t/m ²)	α	L (m)	Q _{s4} (ton)	S _u (t/m ²)	α	L (m)	Q _{s5} (ton)
DP1	0.50	22.30	220.00	160.00	60.00	3.50	0.92	3.50	17.70	1.70	1.00	8.50	22.70	3.00	0.95	3.00	13.43	8.91	0.70	5.50	53.88	-	-	-	-
DP2	0.50	25.60	215.00	157.00	58.00	3.50	0.92	2.90	14.67	1.73	1.00	9.50	25.82	3.00	0.95	3.00	13.43	7.54	0.75	3.00	26.65	12.33	0.59	1.50	17.14
DP3	0.50	23.20	218.00	160.00	58.00	-	-	-	-	2.00	1.00	13.00	40.84	3.20	0.94	3.00	14.17	8.22	0.72	3.50	32.54	12.33	0.59	1.00	11.43
DP4	0.50	20.30	210.00	145.00	65.00	3.50	0.92	3.70	18.71	1.73	1.00	10.00	27.17	3.30	0.93	2.00	9.64	10.28	0.65	1.50	15.74	13.70	0.55	0.70	8.29
DP5	0.50	24.10	220.00	158.00	62.00	3.50	0.92	3.50	17.70	1.75	1.00	9.50	26.11	3.00	0.95	3.00	13.43	7.54	0.75	3.00	26.65	12.33	0.59	1.50	17.14
DP6	0.50	22.90	210.00	155.00	55.00	3.50	0.92	4.00	20.23	1.73	1.00	10.00	27.17	3.30	0.93	3.00	14.46	8.91	0.70	2.00	19.59	15.07	0.52	1.00	12.31
AP1	0.50	19.30	60.00	58.50	1.50	7.20	0.41	3.70	17.16	1.70	0.67	9.00	16.10	3.50	0.57	3.00	9.40	10.28	0.30	3.30	15.99	-	-	-	-
AP2	0.50	19.30	170.00	116.00	54.00	7.20	0.76	3.70	31.80	1.70	1.00	9.00	24.03	3.50	0.92	3.00	15.17	10.28	0.65	2.00	20.99	-	-	-	-
AP3	0.50	20.45	222.00	150.00	72.00	7.20	0.76	3.55	30.51	1.70	1.00	9.00	24.03	3.50	0.92	3.00	15.17	10.28	0.65	2.00	20.99	-	-	-	-
AP4/1	0.80	35.89	440.00	390.00	50.00	3.60	0.81	2.00	14.66	1.70	0.91	10.00	38.88	3.30	0.85	2.50	17.62	6.85	0.69	3.00	35.64	12.33	0.51	4.50	71.12
AP4/2	0.80	35.89	880.00	570.00	310.00	3.60	0.81	2.00	14.66	1.70	0.91	10.00	38.88	3.30	0.85	2.50	17.62	6.85	0.69	3.00	35.64	12.33	0.51	4.50	71.12
AP5	0.80	37.04	700.00	510.00	190.00	3.60	0.81	2.00	14.66	1.70	0.91	10.00	38.88	3.30	0.85	2.50	17.62	6.85	0.69	3.00	35.64	12.33	0.51	4.50	71.12

ตารางที่ ง1 (ต่อ) แสดงการคำนวณหาค่า Friction factor, β (คิดผลของ Drawdown)

Pile No.	Dia (m)	L (m)	Shaft resistance																		หมายเหตุ		
			Medium dense sand (***)					Dense sand (***)					Hard clay				Very dense sand (***)						
			ϕ	Q_{s6} (ton)	L (m)	σ'_{vi} (t/m ²)	β	ϕ	Q_{s7} (ton)	L (m)	σ'_{vi} (t/m ²)	β	S_u (t/m ²)	α	L (m)	Q_{s8} (ton)	ϕ	Q_{s9} (ton)	L (m)	σ'_{vi} (t/m ²)		β	
DP1	0.50	22.30	-	-	-	-	-	37.60	52.32	1.80	37.79	0.49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 ton = 10 kN
DP2	0.50	25.60	33.00	45.63	4.50	40.21	0.16	36.00	13.68	0.60	42.90	0.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DP3	0.50	23.20	-	-	-	-	-	37.00	61.02	2.70	36.34	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DP4	0.50	20.30	-	-	-	-	-	39.00	65.44	2.10	32.62	0.61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DP5	0.50	24.10	33.20	20.89	2.00	37.50	0.20	36.30	36.09	1.60	40.93	0.325	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DP6	0.50	22.90	-	-	-	-	-	36.40	61.24	2.90	36.68	0.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AP1	0.50	19.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AP2	0.50	19.30	-	-	-	-	-	36.70	24.01	1.30	30.91	0.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AP3	0.50	20.45	-	-	-	-	-	36.40	59.30	2.45	32.11	0.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AP4/1	0.80	35.89	-	-	-	-	-	36.30	68.92	6.00	41.85	0.11	23.98	0.30	7.50	135.60	37.20	7.59	0.39	52.87	0.14	-	
AP4/2	0.80	35.89	-	-	-	-	-	36.30	228.78	6.00	41.85	0.37	23.98	0.30	17.50	135.60	37.20	27.73	0.39	52.87	0.47	-	
AP5	0.80	37.04	-	-	-	-	-	36.30	134.92	6.00	41.85	0.23	23.98	0.30	7.50	135.60	37.20	61.59	2.50	53.54	0.25	-	

$\Sigma Q_{s(sand)}$ = $Q_f - \Sigma Q_{s(clay)}$
 Q_f = Total skin friction (ดูในภาคผนวก ก)
 $\Sigma Q_{s(clay)}$ = Skin friction in clay (ใช้ค่า α จากรูปที่ 4.14)
 $\Sigma Q_{s(sand)}$ = Skin friction in sand
 $\Sigma Q_{s(sand)}$ = $\Sigma (\beta_i \sigma'_{vi} A_i)$
 σ'_{vi} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณา (คิด Drawdown stress)
 A_i = พื้นที่ผิวสัมผัส
 β = Friction Factor (กรณีคิดผลของ Drawdown)

ตารางที่ ๖๒ แสดงการคำนวณหาค่า Adhesion factor (α) for stiff clay

Pile No.	Dia (m)	L (m)	Q _{ult}	Q _f	Q _b	Shaft resistance																			
			(ton)	(ton)	(ton)	Medium to stiff clay (top soil)				Soft clay				Medium clay				Stiff clay (***)				Very stiff clay (***)			
			By Maz's			S _u (t/m ²)	α	L (m)	Q _{s1} (ton)	S _u (t/m ²)	α	L (m)	Q _{s2} (ton)	S _u (t/m ²)	α	L (m)	Q _{s3} (ton)	Q _{s4} (ton)	S _u (t/m ²)	L (m)	α	Q _{s5} (ton)	S _u (t/m ²)	L (m)	α
DP1	0.50	22.30	220.00	160.00	60.00	3.50	0.92	3.50	17.70	1.70	1.00	8.50	22.70	3.00	0.95	3.00	13.43	54.11	8.91	5.50	0.70	-	-	-	-
DP2	0.50	25.60	215.00	157.00	58.00	3.50	0.92	2.90	14.67	1.73	1.00	9.50	25.82	3.00	0.95	3.00	13.43	25.23	7.54	3.00	0.71	15.93	12.33	1.50	0.55
DP3	0.50	23.20	218.00	160.00	58.00	-	-	-	-	2.00	1.00	13.00	40.84	3.20	0.94	3.00	14.17	32.54	8.22	3.50	0.72	11.41	12.33	1.00	0.59
DP4	0.50	20.30	210.00	145.00	65.00	3.50	0.92	3.70	18.71	1.73	1.00	10.00	27.17	3.30	0.93	2.00	9.64	15.74	10.28	1.50	0.65	8.39	13.70	0.70	0.56
DP5	0.50	24.10	220.00	158.00	62.00	3.50	0.92	3.50	17.70	1.75	1.00	9.50	26.11	3.00	0.95	3.00	13.43	26.65	7.54	3.00	0.75	17.20	12.23	1.50	0.59
DP6	0.50	22.90	210.00	155.00	55.00	3.50	0.92	4.00	20.23	1.73	1.00	10.00	27.17	3.30	0.93	3.00	14.46	20.71	8.91	2.00	0.74	12.97	15.07	1.00	0.55
AP1	0.50	19.30	60.00	58.50	1.50	7.20	0.41	3.70	17.16	1.70	0.67	9.00	16.10	3.50	0.57	3.00	9.40	15.99	10.28	3.30	0.30	-	-	-	-
AP2	0.50	19.30	170.00	116.00	54.00	7.20	0.76	3.70	31.80	1.70	1.00	9.00	24.03	3.50	0.92	3.00	15.17	20.99	10.28	2.00	0.65	-	-	-	-
AP3	0.50	20.45	222.00	150.00	72.00	7.20	0.76	3.55	30.51	1.70	1.00	9.00	24.03	3.50	0.92	3.00	15.17	35.98	10.28	2.00	1.11	-	-	-	-

ตารางที่ ง2 (ต่อ)แสดงการคำนวณหาค่า Adhesion factor (α) for stiff clay

Pile No.	Dia (m)	L (m)	Shaft resistance																				หมายเหตุ
			Medium dense sand					Dense sand					Hard clay				Very dense sand						
			ϕ	β	σ'_{vi} (t/m ²)	L (m)	Q_{s7} (ton)	ϕ	β	σ'_{vi} (t/m ²)	L (m)	Q_{s7} (ton)	S_u (t/m ²)	α	L (m)	Q_{s8} (ton)	ϕ	β	σ'_{vi} (t/m ²)	L (m)	Q_{s7} (ton)		
DP1	0.50	22.30	-	-	-	-	-	37.60	0.49	37.79	1.80	52.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
DP2	0.50	25.60	33.00	0.16	40.21	4.50	45.63	36.00	0.34	42.90	0.60	13.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
DP3	0.50	23.20	-	-	-	-	-	37.00	0.40	36.34	2.70	61.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
DP4	0.50	20.30	-	-	-	-	-	39.00	0.61	32.62	2.10	65.44	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
DP5	0.50	24.10	33.20	0.20	37.50	2.00	20.89	36.30	0.325	40.93	1.60	36.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
DP6	0.50	22.90	-	-	-	-	-	36.40	0.37	36.68	2.90	61.24	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
AP1	0.50	19.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
AP2	0.50	19.30	-	-	-	-	-	36.70	0.38	30.91	1.30	24.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
AP3	0.50	20.45	-	-	-	-	-	36.40	0.35	32.11	2.45	44.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

$\Sigma Q_{s(sand)}$ = $Q_f - \Sigma Q_{s(clay)}$
 Q_f = Total skin friction (ดูในภาคผนวก ก)
 $\Sigma Q_{s(sand)}$ = Skin friction in sand
 $\Sigma Q_{s(clay)}$ = Skin friction in clay
 $\Sigma Q_{s(clay)}$ = $\Sigma (\alpha_i S_u A_i)$
 S_u = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว
 A_i = พื้นที่ผิวสัมผัส
 α = Adhesion factor

ตารางที่ 3 แสดงการคำนวณหาค่า Adhesion factor (α) for medium clay

Pile No.	Dia (m)	L (m)	Q _{ult} (ton)	Q _r (ton)	Q _b (ton)	Shaft resistance																			
						Medium to stiff clay (top soil)***				Soft clay				Medium clay(***)				Stiff clay				Very stiff clay			
						Q _{s1} (ton)	S _u (t/m ²)	L (m)	α	S _u (t/m ²)	α	L (m)	Q _{s2} (ton)	Q _{s3} (ton)	S _u (t/m ²)	L (m)	α	S _u (t/m ²)	α	L (m)	Q _{s4} (ton)	S _u (t/m ²)	α	L (m)	Q _{s5} (ton)
DP1	0.50	22.30	220.00	160.00	60.00	18.28	3.50	3.50	0.95	1.70	1.00	8.50	22.70	13.85	3.00	3.00	0.98	8.91	0.70	5.50	54.11	-	-	-	-
DP2	0.50	25.60	215.00	157.00	58.00	13.55	3.50	2.90	0.85	1.73	1.00	9.50	25.82	12.29	3.00	3.00	0.87	7.54	0.71	3.00	25.23	12.33	0.55	1.50	15.93
DP3	0.50	23.20	218.00	160.00	58.00	-	-	-	-	2.00	1.00	13.00	40.84	14.16	3.20	3.00	0.94	8.22	0.72	3.50	32.54	12.33	0.59	1.00	11.41
DP4	0.50	20.30	210.00	145.00	65.00	18.51	3.50	3.70	0.91	1.73	1.00	10.00	27.17	9.55	3.30	2.00	0.92	10.28	0.56	1.50	15.74	13.70	0.56	0.70	8.39
DP5	0.50	24.10	220.00	158.00	62.00	18.09	3.50	3.50	0.94	1.75	1.00	9.50	26.11	13.47	3.00	3.00	0.95	7.54	0.75	3.00	26.65	12.33	0.59	1.50	17.20
DP6	0.50	22.90	210.00	155.00	55.00	21.55	3.50	4.00	0.98	1.73	1.00	10.00	27.17	15.21	3.30	3.00	0.98	8.91	0.74	2.00	20.71	15.07	0.55	1.00	12.97
AP1	0.50	19.30	60.00	58.50	1.50	17.58	7.20	3.70	0.42	1.70	0.67	9.00	16.10	8.84	3.00	3.50	0.54	10.28	0.30	3.30	15.99	-	-	-	-
AP2	0.50	19.30	170.00	116.00	54.00	31.80	7.20	3.70	0.76	1.70	1.00	9.00	24.03	14.99	3.00	3.50	0.91	10.28	0.65	2.00	20.99	-	-	-	-
AP3	0.50	20.45	222.00	150.00	72.00	40.95	7.20	3.55	1.02	1.70	1.00	9.00	24.03	20.85	3.00	3.50	1.26	10.28	0.65	2.00	20.99	-	-	-	-

ตารางที่ 3 (ต่อ)แสดงการคำนวณหาค่า Adhesion factor (α) for medium clay

Pile No.	Dia (m)	L (m)	Shaft resistance																				หมายเหตุ
			Medium dense sand					Dense sand					Hard clay				Very dense sand						
			ϕ	β	σ'_{vi} (t/m ²)	L (m)	Q_{s7} (ton)	ϕ	β	σ'_{vi} (t/m ²)	L (m)	Q_{s7} (ton)	S_u (t/m ²)	α	L (m)	Q_{s8} (ton)	ϕ	β	σ'_{vi} (t/m ²)	L (m)	Q_{s7} (ton)		
DP1	0.50	22.30	-	-	-	-	-	37.60	0.49	37.79	1.80	52.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 ton = 10 kN
DP2	0.50	25.60	33.00	0.16	40.21	4.50	45.63	36.00	0.34	42.90	0.60	13.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DP3	0.50	23.20	-	-	-	-	-	37.00	0.40	36.34	2.70	61.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DP4	0.50	20.30	-	-	-	-	-	39.00	0.61	32.62	2.10	65.44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DP5	0.50	24.10	33.20	0.20	37.50	2.00	20.89	36.30	0.325	40.93	1.60	36.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DP6	0.50	22.90	-	-	-	-	-	36.40	0.37	36.68	2.90	61.24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AP1	0.50	19.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AP2	0.50	19.30	-	-	-	-	-	36.70	0.38	30.91	1.30	24.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AP3	0.50	20.45	-	-	-	-	-	36.40	0.35	32.11	2.45	44.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

$\Sigma Q_{s(sand)}$ = $Q_f - \Sigma Q_{s(clay)}$
 Q_f = Total skin friction (ดูในภาคผนวก ก)
 $\Sigma Q_{s(sand)}$ = Skin friction in sand
 $\Sigma Q_{s(clay)}$ = Skin friction in clay
 $\Sigma Q_{s(clay)}$ = $\Sigma (\alpha_i S_u A_i)$
 S_u = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว
 A_i = พื้นที่ผิวสัมผัส
 α = Adhesion factor

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4 แสดงการคำนวณหาค่า Bearing capacity factor , N_q (กิตติผลของ Drawdown)

Pile No.	Dia (m)	L (m)	Q_{ult} (ton) By Maz's	Q_r (ton)	End Bearing						หมายเหตุ
					Q_b (ton)	A_b (m ²)	σ'_{vi} (t/m ²)	q_b (t/m ²)	ϕ'	N_q	
DP1	0.50	22.30	220.00	160.00	60.00	0.196	39.68	305.58	37.70	7.70	1 ton = 10 kN
DP2	0.50	25.60	215.00	157.00	58.00	0.196	43.23	295.39	35.90	6.83	
DP3	0.50	23.20	218.00	160.00	58.00	0.196	38.98	295.39	36.70	7.58	
DP4	0.50	20.30	210.00	145.00	65.00	0.196	34.78	331.04	38.10	9.52	
DP5	0.50	24.10	220.00	158.00	62.00	0.196	41.81	315.76	36.20	7.55	
DP6	0.50	22.90	210.00	155.00	55.00	0.196	39.66	280.11	36.10	7.06	
AP1	0.50	19.30	60.00	58.50	1.50	0.196					
AP2	0.50	19.30	170.00	116.00	54.00	0.196	32.27	275.02	36.90	8.52	
AP3	0.50	20.45	222.00	150.00	72.00	0.196	34.69	366.96	36.60	10.57	
AP4/1	0.80	35.89	440.00	390.00	50.00	0.503	53.10	99.47	37.20	1.87	
AP4/2	0.80	35.89	880.00	570.00	310.00	0.503	53.10	616.73	37.20	11.60	
AP5	0.80	37.04	700.00	510.00	190.00	0.503	54.42	377.99	37.20	6.95	

- q_b = $\sigma'_{vi} N_q$
 q_b = หน่วยแรงกำลังรับแรงเบกทานที่ปลายเข็ม (Unit End Bearing)
 σ'_{vi} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (กรณีคิด drawdown stress)
 N_q = สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเบกทานของปลายเสาเข็มในชั้นทราย(กรณีคิด z)-v' drawdown)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปรีชา ทองนวล เกิดวันที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2543 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย