การใช้การทดสอบเสาเข็มแบบสองทิศทางกับเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ

นายสาคเรศ นาคะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-3816-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

USE OF BI-DIRECTIONAL PILE TESTING ON BORED PILES IN BANGKOK SUBSOILS

Mr. Sakaret Naka

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 2002

ISBN 974-17-3816-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้การทดสอบเสาเข็มแบบสองทิศทางกับเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ
โดย	นายสาคเรศ นาคะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธารักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี)

นายสาคเรศ นาคะ : การใช้การทดสอบเสาเข็มแบบสองทิศทางกับเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ. (USE OF BI-DIRECTIONAL PILE TESTING ON BORED PILES IN BANGKOK SUBSOILS) อ.ที่ปรึกษา: รศ. ดร.วันชัย เทพรักษ์, 146 หน้า. ISBN 974-17-3816-1.

ปัจจุบันได้มีการนำวิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test มาทดสอบเป็นครั้งแรกในประเทศไทย การทดสอบนี้สามารถแยกค่าแรงเสียดทานรอบผิวเสาเข็ม (Skin Friction) กับแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing Resistance) ออกจากกันได้โดยตรงเนื่องจากมีการติดตั้ง Load Cell ภายในเสาเข็มบริเวณปลายและกลางเสาเข็ม การทดสอบ Bi-Directional Static Load Test จะมีแรงกระทำ 2 ทิศทางคือกดลงและดันขึ้น ซึ่งต่างจากการทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test ที่ทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มโดยกดน้ำหนักลงด้านเดียว จากความแตกต่างกันของวิธีการทดสอบดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเน้นการวิเคราะห์และศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเจาะที่ทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test เพื่อพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบ Conventional Static Load Test

งานวิจัยนี้ได้รวบรวมผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด (Geotechnical Instrumentation) และทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test ในชั้นดินกรุงเทพฯ จำนวน 2 ต้นและได้ทำการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่ติดตั้งเครื่องมือวัดซึ่งทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test จำนวน 5 ต้นในโครงการเดียวกัน ผลการวิจัยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Adhesion Factor, α) จากการทดสอบด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test จะต่ำกว่าค่า α จากการทดสอบด้วยวิธี Conventional Static Load Test และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมาของชาญชัย (2542), สุวรรณ (2531), NG (1983) และ Pimpasugdi (1989) ก็มีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันเฉพาะในชั้นดินเหนียวแข็งเท่านั้น ในขณะที่ชั้นดินอ่อนจะมีค่าสูงกว่ามาก สำหรับค่า Friction Factor (β) จากการทดสอบ Bi-Directional Static Load Test มีค่าสูงกว่าค่า β จากการทดสอบ Conventional Static Load Test เมื่อพิจารณาผลของการใช้สารละลายรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะพบว่า ค่า β จากการใช้สารละลาย Polymer มีแนวโน้มสูงกว่าค่า β จากการใช้สารละลาย Bentonite ซึ่งในส่วนของแรงต้านทานที่ปลายเข็มพบว่า ค่า Mobilized N_q จากการทดสอบ Bi-Directional Static Load Test มีค่าสูงกว่าค่า Mobilized N_q จากการทดสอบ Conventional Static Load Test ประมาณ 7 เท่า

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2546

4470595021: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: PILE TESTING / BORED PILE / BI-DIRECTIONAL TEST

SAKARET NAKA : USE OF BI-DIRECTIONAL PILE TESTING ON BORED PILES IN BANGKOK SUBSOILS. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF.WANCHAI TEPARAKSA, D.Eng. 146 pp. ISBN 974-17-3816-1.

Recently, the bi-directional static load test is introduced to test on bored pile in Thailand. This test can separate the skin friction and end bearing capacity of the pile, because the load cells are installed at tip and middle depth of the pile. The loading on load cell can be applied bi-directional both compression and tension, which is difference from conventional static load test that apply only compression on pile top. Due to this difference criteria, the behavior of bored pile from bi-directional static load test is determined to verify the appropriate parameters and compare with conventional static load test method.

Two instrumented test piles by means of bi-directional static load test and 5 tested pile by means of conventional method at the same project in Bangkok subsoils was analyzed and compared. The adhesion factor (α-value) from bi-directional static load test is lower than conventional method. However, the α-value from both test method agrees with results of recent research (Submaneewong (1999), Chiawchansin (1988), NG (1983) and Pimpasugdi (1989)) only in the stiff silty clay. However, it is much higher in the soft clay layer. The friction factor (β-value) from bi-directional static load test is higher than conventional method, while the β-values from tested pile using polymer slurry is higher than those of using bentonite slurry. For end bearing parameters, the mobilized N_q from bi-directional static load test is 7 time higher than those of conventional method.

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

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

Academic year.....2003

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง "การใช้การทดสอบเสาเข็มแบบสองทิศทางกับเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ" ผู้เขียนขอแสดงความขอบพระคุณ

รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธารักษ์ และอาจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้เขียนเป็นอย่างดี

คุณวิเชียร รุ่งรุจิรัตน์, คุณศราวุธ วรยศ จากบริษัท Italian Thai Development, PCL. และคุณนฤดล พินิจพล จากบริษัท Tams Consultants, Inc. ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการค้นหาข้อมูล การดูงานในสถานที่ก่อสร้างจริง และคำแนะนำที่มีประโยชน์อย่างมากในการทำวิทยานิพนธ์

บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เสมอ

เพื่อน ๆ และ พี่ ๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้ลุล่วงไปด้วยดี

สาคเรศ นาคะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญรูป ..... ฎ

สารบัญตาราง ..... ฑ

สัญลักษณ์ ..... ณ

บทที่

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 ขั้นตอนการศึกษา 2

1.4 ขอบเขตของการศึกษา 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพ ฯ 5

2.1.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพ ฯ 5

2.1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพ ฯ 7

2.2 ชนิดของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยและเทคนิคการก่อสร้าง 13

2.2.1 เสาเข็มเจาะ 13

2.2.2 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม 15

2.3 กลไกระหว่างดินและเข็ม (Mechanism of Soil–Pile Interaction) 20

2.4 เครื่องมือวัดในเสาเข็ม 25

2.4.1 Vibrating Wire Strain Gauge 25

2.4.2 Extensometer 26

2.5 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว 28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1 วิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method) 28
2.5.2 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม
(Load Testing of Piles) 37

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย 42
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย 42
3.1.1 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน 42
3.1.2 ข้อมูลเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัย 42
3.1.2.1 เสาเข็มเจาะที่ทำการทดสอบโดยวิธี Conventional Static
Load Test 43
3.1.2.2 เสาเข็มเจาะที่ทำการทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static
Load Test 43
3.2 วิธีการวิเคราะห์และข้อจำกัดในการวิเคราะห์ 47
3.2.1 ลักษณะการติดตั้ง Vibrating Wire Strain Gauges 47
3.2.2 การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม 48
3.2.2.1 ชั้นดินเหนียว 48
3.2.2.2 ชั้นทราย 48
3.2.3 การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม 49
3.2.3.1 กรณีปลายเข็มหยั่งในชั้นดินเหนียว 49
3.2.3.2 กรณีปลายเข็มหยั่งในชั้นทราย 50

บทที่ 4 ผลการทดสอบ, การวิเคราะห์ผลและ อภิปรายผลการวิจัย 51
4.1 ผลการศึกษาสมบัติของดินบริเวณสถานที่ก่อสร้างที่ใช้ในงานวิจัย 51
4.2 การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม 53
4.2.1 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test 53
4.2.2 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test 55
4.3 การศึกษาเรื่องการส่งถ่ายน้ำหนัก (Load Transfer) จากเสาเข็มไปสู่ดิน
รอบๆ เสาเข็ม 57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1 การคำนวณหาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในตัวเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ.....57
4.3.1.1 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test.....57
4.3.1.2 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test.....65
4.3.2 ผลการวิเคราะห์การส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากเข็มไปสู่ดินรอบๆ.....73
4.3.2.1 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test.....73
4.3.2.2 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test.....77
4.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์ในชั้นดินต่างๆ.....82
4.4.1 การประมาณแรงเสียดทานด้านข้าง.....82
4.4.1.1 ชั้นดินเหนียว.....82
4.4.1.2 ชั้นทราย.....84
4.4.2 การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายเข็ม.....85
4.4.2.1 เสาเข็มที่มีปลายหยั่งในชั้นทราย.....86
4.4.2.2 เสาเข็มที่มีปลายหยั่งในชั้นดินเหนียว.....87
4.5 การเปรียบเทียบและอภิปรายค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มแต่ละประเภท.....87
4.5.1 ค่า Adhesion Factor, α.....87
4.5.2 ค่า Friction Factor, β ($K_s \tan\delta$).....89
4.5.3 ค่า Mobilized N_q.....91

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....93
5.1 สรุปผลการวิจัย.....93
5.1.1 พารามิเตอร์สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม.....93
5.1.1.1 ค่า Adhesion Factor (α) ในชั้นดินเหนียว.....93
5.1.1.2 ค่า Friction Factor (β,$K_s \tan\delta$) ในชั้นทราย.....94
5.1.2 พารามิเตอร์สำหรับการประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายเข็ม.....94
5.2 ข้อจำกัดในการทดสอบเสาเข็มโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test.....94
5.3 ข้อเสนอแนะ.....95

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....97
ภาคผนวก.....101
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....146

สารบัญรูป

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 2-1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,1999) 7

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u (DM 7.1) 8

รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u (วีระนันท์,2526) 9

รูปที่ 2.4 แรงดันน้ำใต้ดินบริเวณโครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ (STS & NGI, 1992)... 10

รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_N กับค่า σ'_{vo} (Peck , Hanson & Thornburn ,1974) 12

รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N (SPT) กับค่า ϕ' (Peck , Hanson & Thornburn,1974) ... 12

รูปที่ 2.7a การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบ Conventional Static Load Test ระบบที่ 1 16

รูปที่ 2.7b การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบ Conventional Static Load Test ระบบที่ 2 17

รูปที่ 2.7c การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบ Conventional Static Load Test ระบบที่ 3 17

รูปที่ 2.8 รูปแสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับวิธี Bi-Directional Static Load Test ในเสาเข็มเจาะ (Schmertmann and Hayes,1997) 19

รูปที่ 2.9 Distribution Function Approach สำหรับเข็มเดียว 22

รูปที่ 2.10 Axial loaded pile divided into three segments 23

รูปที่ 2.11 ลักษณะของ Vibrating Wire Strain Gauges 25

รูปที่ 2.12a แสดงการติดตั้ง Extensometer กับโครงเหล็กเสริม 27

รูปที่ 2.12b แสดงการติดตั้ง Extensometer กับโครงเหล็กเสริม 27

รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u (Tomlinson,1970) 29

รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u สำหรับดินกรุงเทพฯ (Pimpasugdi,1989) 30

รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u สำหรับเสาเข็มเจาะแต่ละประเภท ในดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,2001) 30

รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s\tan\delta$ กับค่ามุมเสียดทานภายใน,ϕ' (Vesic,1967 และ Meyerhof,1976) 33

รูปที่ 2.17a ความสัมพันธ์ระหว่างค่า β,$K_s\tan\delta$ กับค่ามุมเสียดทานภายใน,ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะแต่ละประเภทในดินกรุงเทพฯ กรณีไม่คิดผล Drawdown (Teparaksa,2001) 34

รูปที่ 2.17b ความสัมพันธ์ระหว่างค่า β ,$K_s\tan\delta$ กับค่ามุมเสียดทานภายใน,ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะแต่ละประเภทในดินกรุงเทพฯ กรณีคิดผล Drawdown (Teparaksa,2001) 34

รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bearing Capacity Factor, N_q กับค่ามุมเสียดทานภายใน

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

ϕ' สำหรับเสาเข็มตอก (Berezantzev,1961 และ Meyerhof,1976) 35

รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bearing Capacity Factor, N_q กับค่ามุมเสียดทานภายใน, ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ (Pimpasugdi,1989) 36

รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bearing Capacity Factor, N_q กับค่ามุมเสียดทานภายใน,ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,2001) 37

รูปที่ 2.21 รูปแบบวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติจากการทดสอบเสาเข็ม (Fellenius,1980) 41

รูปที่ 3.1 บริเวณที่ตั้งพื้นที่โครงการที่มีการทดสอบเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ 44

รูปที่ 3.2 ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดในเสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test 45

รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Vibrating Wire Strain Gauges 47

รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างการสร้าง Equivalent Top – Loaded Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็มที่ทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test 54

รูปที่ 4.2ก แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP-15 (Stage 1) 59

รูปที่ 4.2ข แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP-15 (Stage 2) 60

รูปที่ 4.2ค แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP-15 (Stage 3) 61

รูปที่ 4.3ก แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP-19 (Stage 1) 62

รูปที่ 4.3ข แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP-19 (Stage 2) 63

รูปที่ 4.3ค แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP-19 (Stage 3) 64

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเข็ม TP-13/1 65

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเข็ม TP-14 66

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเข็ม TP-16 66

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเข็ม TP-17 67

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเข็ม TP-18 67

รูปที่ 4.9 แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP-13/1 68

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.10 แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP-14 69

รูปที่ 4.11 แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP-16 70

รูปที่ 4.12 แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP-17 71

รูปที่ 4.13 แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP-18 72

รูปที่ 4.14ก ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็มของเสาเข็ม TP-15 (Stage 1) 73

รูปที่ 4.14ข ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มสำหรับเข็ม TP-15 (Stage 2) 74

รูปที่ 4.14ค ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มสำหรับเข็ม TP-15 (Stage 3) 74

รูปที่ 4.15ก ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็มของเสาเข็ม TP-19 (Stage 1) 75

รูปที่ 4.15ข ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มสำหรับเข็ม TP-19 (Stage 2) 75

รูปที่ 4.15ค ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มสำหรับเข็ม TP-19 (Stage 3) 76

รูปที่ 4.16ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มสำหรับเข็ม TP-13/1 77

รูปที่ 4.16ข ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็มของเสาเข็ม TP-13/1 77

รูปที่ 4.17ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มสำหรับเข็ม TP-14 78

รูปที่ 4.17ข ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็มของเสาเข็ม TP-14 78

รูปที่ 4.18ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มสำหรับเข็ม TP-16 79

รูปที่ 4.18ข ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็มของเสาเข็ม TP-16 79

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.19ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม สำหรับเข็ม TP-17 80

รูปที่ 4.19ข ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็มของเสาเข็ม TP-17 80

รูปที่ 4.20ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม สำหรับเข็ม TP-18 81

รูปที่ 4.20ข ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็มของเสาเข็ม TP-18 81

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u ที่คำนวณได้จากเสาเข็ม TP-15 และ TP-19 83

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u ที่คำนวณได้จากเสาเข็ม TP-13/1, TP-14, TP-16, TP-17 และ TP-18 83

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับค่ามุม ϕ' ที่คำนวณได้จากเสาเข็ม TP-15 และ TP-19 84

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับค่ามุม ϕ' ที่คำนวณได้จากเสาเข็ม TP-13/1, TP-14, TP-16, TP-17 และ TP-18 85

รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized N_q กับค่ามุม ϕ' 86

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u ในชั้นดินเหนียวเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้าสำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ 88

รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u ในชั้นดินเหนียวเทียบกับผลการศึกษาของธยานันท์ (2544) สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ 89

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับค่ามุม ϕ' เทียบกับผลการศึกษาของชาญชัย (2542)และสุวรรณ (2531) สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ 90

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า β กับค่ามุม ϕ' เทียบกับผลการศึกษาของ ธยานันท์ (2544) โดยแยกตามชนิดของสารที่ใช้รักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ 90

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized N_q กับค่ามุม ϕ' เทียบกับ ผลการศึกษาที่ผ่านมา 92

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติขั้นพื้นฐานโดยทั่วไปของดินกรุงเทพฯ (Chin, 1972 และ Tonyagate,1978)....6

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า K_s และ δ สำหรับเสาเข็มตอกที่เสนอโดย Brom & Aas (1966)....32

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเสาเข็มทดสอบที่รวบรวมได้....46

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการเจาะสำรวจดินของหลุมเจาะ BH-1 ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็ม TP-13/1 และ TP-15....51

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการเจาะสำรวจดินของหลุมเจาะ B-6 ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็ม TP-19....52

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการเจาะสำรวจดินของหลุมเจาะ BH-1 ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็ม TP-14....52

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการเจาะสำรวจดินของหลุมเจาะ BN-5 ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็ม TP-16, TP-17 และ TP-18....53

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม ที่ใช้ในงานวิจัยนี้โดยใช้ทฤษฎีของ Mazurkiewicz (1972)....56

สัญลักษณ์

α = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเหนียว (Adhesion Factor)

β = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของทราย (Friction Factor)

δ = มุมเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็ม

ε = ความเครียดของเสาเข็มที่วัดได้จาก Straingauge

ϕ' = มุมต้านทานภายในของดิน (Angle of Internal Resistance)

γ_t = หน่วยน้ำหนักรวมของดิน (Total Unit Weight)

σ_v = หน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง

σ_h = หน่วยแรงรวมในแนวนอน

σ'_{vo} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง

σ'_{vi} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณา

ω = ปริมาณความชื้นในมวลดิน

A_c = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

A_g = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาเข็ม

A_s = พื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กเสริมรับแรงอัด

$(AE)_p$ = ค่าสตีฟเนสสมดุลย์ของเสาเข็ม

CH = High Plastic Clay

CL = Low Plastic Clay

C_N = ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง

D = เส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม

dW_z = Elastic Compression ของเสาเข็ม

e = อัตราส่วนช่องว่างในมวลดิน (Void Ratio)

E = Modulus of Elasticity ของเสาเข็ม

E_c = Modulus of Elasticity ของคอนกรีต

E_s = Modulus of Elasticity ของเหล็กเสริม

f_s = หน่วยแรงเสียดทานด้านข้าง (Unit Skin Friction)

G_s = ความถ่วงจำเพาะของดิน

K_s = ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างระหว่างดินกับเสาเข็ม

L = ความยาวเสาเข็ม

L_c = เส้นรอบรูปเสาเข็ม

LI = ดัชนีความเหลว

สัญลักษณ์ (ต่อ)

LL	=	พิกัดความเหลว
N	=	ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value)
N'	=	ค่าจำนวนครั้งของการทดสอบการทะลุผ่านมาตรฐาน (SPT-N Value) หลังการปรับแก้
N_c	=	สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของปลายเสาเข็มในชั้นดินเหนียว
N_q	=	สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของปลายเสาเข็มในชั้นทราย
P_i	=	แรงตามแนวแกนเสาเข็ม
PI	=	ดัชนีความเหนียวหนืด
PL	=	พิกัดความเหนียวหนืด
q_E	=	หน่วยแรงกำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเข็ม (Unit End Bearing)
Q_E	=	แรงต้านทานของดินบริเวณปลายเสาเข็ม
Q_s	=	แรงต้านทานของดินรอบๆ ลำตัวเสาเข็ม
Q_T	=	แรงกระทำที่หัวเข็ม
Q_{ult}	=	กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของฐานราก
S_u	=	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว
S_z	=	น้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเข็มไปสู่ดินรอบลำตัวเข็มที่ความลึก z
U	=	แรงดันน้ำใต้ดิน
W_o	=	การทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม
W_p	=	น้ำหนักเสาเข็ม
W_z	=	การเคลื่อนตัวของผนังเสาเข็มที่ความลึก z