พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดและไดอะแฟรม สำหรับงานขุดแบบใช้ค้ำยันในดินเหนียวกรุงเทพ

นายพงษ์พินันท์ บูรณะกิติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2890-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEFLECTION BEHAVIOR OF SHEET PILE AND DIAPHRAGM WALL FOR BRACED CUT EXCAVATION IN BANGKOK CLAY

Mr. Pongpinan Buranakiti

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2890-1

481837

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดและไดอะแฟรม สำหรับงานขุดแบบใช้ค้ำยันในดินเหนียวกรุงเทพ
โดย	นายพงษ์พินันท์ บูรณะกิติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อโชค จันทวรางกูร)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ธเนศ ศรีศิริโรจนากร)

พงษ์พินันท์ บูรณะกิติ : พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดและไดอะแฟรม สำหรับงานขุดแบบใช้ค้ำยันในดินเหนียวกรุงเทพ. (DEFLECTION BEHAVIOR OF SHEET PILE AND DIAPHRAGM WALL FOR BRACED CUT EXCAVATION IN BANGKOK CLAY) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. วันชัย เทพรักษ์, 99 หน้า. ISBN 974-53-2890-1.

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเข็มพืด ในการก่อสร้างอาคอเรียม ของโครงการสยามพารากอน เพื่อขุดดินลึก 10.55 เมตร พร้อมระบบค้ำยัน 4 ชั้น โดยใช้เข็มพืดเหล็ก Type IV ยาว 18.0 เมตร โดยก่อสร้างเป็นระบบกำแพงเข็มพืดชั้นเดียว และกำแพงเข็มพืด 2 ชั้น หรือระบบ Cofferdam และศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงไดอะแฟรมวอลล์ ในการก่อสร้างบ่อบำบัดน้ำเสีย ที่ขุดดินลึก 12.15 เมตร ด้วยระบบไดอะแฟรมวอลล์หนา 1.0 เมตร ลึก 28.2 เมตร พร้อมระบบค้ำยัน 3 ชั้น

ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงเข็มพืดเหล็กจาก Inclinometer พบว่าระบบเข็มพืด Cofferdam มีค่าการเคลื่อนตัวน้อยกว่าระบบเข็มพืดแถวเดียว ประมาณ 50 % โดยมีระดับ Shear Strain ของระบบเข็มพืด Coffderdam ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลาง มีค่าระหว่าง 0.22 – 0.30 % และ 0.21 – 0.39 % ตามลำดับ ในขณะที่ Shear Strain ของระบบเข็มพืดแถวเดียว ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลาง มีค่าระหว่าง 0.26 – 0.34 % และ 0.28 – 0.46 % ตามลำดับ ในส่วนของการเคลื่อนตัวของกำแพงไดอะแฟรมวอลล์ พบว่าความแข็งของระบบค้ำยันมีผลอย่างมากต่อการเคลื่อนตัวของกำแพง โดยพบว่ากำแพงไดอะแฟรมวอลล์เคลื่อนตัวมากถึง 50 มิลลิเมตร เนื่องจากการสูญเสียแรงในค้ำยันชั้นที่ 1 ผลการตรวจวัดแรงในระบบค้ำยันด้วย Pressure Gauge พบว่าแรงอัดในค้ำยันเหล็กเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป โดยมีค่าประมาณ 57 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และ 151 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร สำหรับระบบค้ำยันเข็มพืด Cofferdam และกำแพงไดอะแฟรมวอลล์ ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์กลับด้วยวิธีไฟไนท์เอลลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพง เปรียบเทียบกับการตรวจวัด พบว่าในขั้นตอนสุดท้ายของการขุดดินลึกประมาณ -10.0 เมตร ถึง -12.5 เมตร ค่าโมดูลัสของดิน (Young 's Modulus) ในรูปอัตราส่วนกับความต้านทานแรงเฉือนของดิน (S_u) ของดินเหนียวอ่อน , ดินเหนียวแข็งปานกลาง และดินเหนียวแข็ง มีค่าประมาณ 150 S_u , 250 S_u , 1000 S_u และ 125 S_u , 200 S_u , 1000 S_u สำหรับระบบกำแพงเข็มพืด Cofferdam และเข็มพืดแถวเดียว ตามลำดับ ในขณะที่ค่าโมดูลัสของดินของระบบกำแพงไดอะแฟรมวอลล์ มีค่าประมาณ 350 S_u , 500 S_u และ 1000 S_u สำหรับดินเหนียวอ่อน , ดินเหนียวแข็งปานกลาง และดินเหนียวแข็ง ตามลำดับ ในส่วนของการขุดดินตื้นนั้น ค่า Shear Strain ของการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพง มีค่าน้อยกว่าที่ขั้นตอนขุดสุดท้าย และโมดูลัสของดินเพิ่มขึ้น เมื่อ Shear Strain ต่ำกว่าขั้นตอนขุดสุดท้าย และมีพฤติกรรมความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง (Non-Linear Young 's Modulus)

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต พงษ์พินันท์ บูรณะกิติ
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548 ลายมือชื่ออาจารย์ทีปรึกษาร่วม -

#4670392121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: COFFERDAM / DEEP EXCAVATION / DIAPHRAGM / FEM / SHEET PILE

PONGPINAN BURANAKITI : DEFLECTION BEHAVIOR OF SHEET PILE AND DIAPHRAGM WALL FOR BRACED CUT EXCAVATION IN BANGKOK CLAY. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. WANCHAI TEPARAKSA, D.Eng. 99 pp. ISBN 974-53-2890-1.

This research aims to study the deflection behavior of sheet pile in the Aquarium construction of Siam Paragon project for excavation of 10.55 m depth with 4 layers of bracings. The sheet piles was 18.0 m long Type IV. The construction consists of two parts as single row of sheet pile wall and double row of sheet pile walls or cofferdam. This research also studies the deflection behavior of diaphragm wall for construction of waste water treatment of 12.15 m depth by using 1.00 m thick and 28.20 m long diaphragm wall with 3 bracing layers.

The results of the measured horizontal displacement of steel sheet pile wall by Inclinometer indicated that the horizontal displacement of cofferdam was about 50% less than the single row sheet pile wall. The shear strain levels of cofferdam in the soft clay and medium clay were about 0.22 - 0.30% and 0.21 - 0.39 %, respectively while the shear strain of the single row sheet pile wall in the soft clay and medium clay were about 0.26 - 0.34% and 0.28 - 0.46%, respectively. The diaphragm wall was moved more than 50 mm, because of the lost of pressure on the first struting system. The deflection behavior of diaphragm wall was significantly affected by the stiffness of bracing system. According to the strut force measured by pressure gauge, it found that force in the strut depended on the temperature changes by induce the axial stress of 57 ksc and 151 ksc for the sheet pile cofferdam and diaphragm wall, respectively.

The results of back analysis by Finite Element Method (FEM) for determination of horizontal displacement of the sheet pile wall systems to compare with the measurement showed that at the final stage of excavation at -10.0 m to -12.5 m, the ratio of Young's modulus (E_u) to undrained shear strength (S_u) of soft clay, medium clay and stiff clay were in the order of 150 , 250 , 1000 and 125 , 200 , 1000 for the cofferdam and the single row of sheet pile systems, respectively. The value of Young's modulus for the diaphragm wall was in the order of 350 S_u , 500 S_u , 1000 S_u for soft clay, medium stiff clay and stiff clay, respectively. For initial stage shallow excavation, the shear strain of the wall was less than at the final excavation stage. The Young 's Modulus of soil increases with non linear behavior depended on the shear strain of the wall.

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

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

Academic year.....2005.....Co-advisor's signature.....-.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อโชค จันทวรางกูร (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) และ อาจารย์ ดร. ธเนศ ศรีศิริโรจนากร ที่ได้กรุณาร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท นันทวัน (Thai Obayashi) จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับการวิจัย รวมทั้ง คุณชลธิชา บุญส่ง วิศวกร บริษัท สแตรตีเจีย เอ็นจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์ส จำกัด ที่ได้ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ยิ่ง รวมทั้งทุกท่านที่ไม่อาจเอ่ยนามได้ทั้งหมดสำหรับความร่วมมือ และความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ซึ่งให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฏ

สัญลักษณ์..... ณ

บทที่

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและทบทวนงานในอดีต..... 4

2.1 การประเมินค่าแรงดันดินที่กระทำต่อระบบกำแพงกันดิน..... 4

2.1.1 การคำนวณหน่วยแรงดันดินด้านข้าง..... 4

2.1.2 การใช้หลักการของ Rankine คำนวณหาแรงดันด้านข้าง..... 9

2.1.3 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันด้านข้างแบบสถิต..... 10

2.1.4 การใช้ไดอะแกรมขอบเขตของหน่วยแรงดันดินปรากฏ..... 12

2.2 การประเมินค่าคุณสมบัติทางปฐพีกลศาสตร์ของดินเหนียว..... 14

2.2.1 หลักการหน่วยแรงประสิทธิผล..... 14

2.2.2 หลักการเบื้องต้นของกำลังรับแรงเฉือน..... 15

2.2.3 ค่าปรับแก้กำลังรับแรงเฉือนที่ได้รับจากการทดสอบแบบเวนใน สนามของ Bjerrum..... 15

2.2.4 สภาพความดันน้ำและหน่วยแรงประสิทธิผลในชั้นดินกรุงเทพ..... 17

2.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินกรุงเทพ..... 18

2.3 รูปแบบการเคลื่อนตัวพื้นฐาน..... 18

2.4 พฤติกรรมการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงกันดิน..... 19

2.5 ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินกับการทรุดตัวที่ผิวดิน..... 23
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินกับการทรุดตัวที่ผิวดิน..... 24
2.6.1 พารามิเตอร์ของดิน..... 24
2.6.1.1 กำลังรับแรงเฉือนของดิน..... 24
2.6.1.2 โมดูลัสของดิน..... 27
2.6.2 ระบบโครงสร้างค้ำยัน..... 29
2.6.2.1 สติฟเนสของกำแพงกันดิน..... 29
2.6.2.2 สติฟเนสของค้ำยัน..... 31
2.6.2.3 ระยะห่างในแนวดิ่งของค้ำยัน..... 31
2.6.2.4 การอัดแรงในค้ำยัน..... 32
2.6.3 วิธีการก่อสร้าง..... 33
2.6.3.1 ขนาดการเว้นคันดิน..... 34
2.7 การใช้วิธี Finite–Element ในการวิเคราะห์ระบบกำแพงกันดิน..... 34
บทที่ 3 การเก็บและข้อมูลการวิจัย..... 38
3.1 ข้อมูลทั่วไป..... 38
3.2 รายละเอียดข้อมูลสำรวจ Aquarium 39
3.2.1 รายละเอียดการก่อสร้างในส่วนงานขุดดินระดับลึก..... 41
3.2.2 สภาพชั้นดินและข้อมูลการเจาะสำรวจดิน..... 42
3.2.3 ข้อมูลการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินจากเครื่องมือ Inclinometer..... 47
3.2.4 ข้อมูลการวัดแรงในระบบค้ำยันด้วยเครื่องมือ Pressure Gauge 51
3.2.5 ข้อมูลการวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน..... 53
3.2.6 Stress ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ในระบบค้ำยันเข็มพืดแบบ Cofferdam..... 53
3.3 รายละเอียดข้อมูลสำรวจบ่อบำบัดน้ำเสีย..... 55
3.3.1 รายละเอียดการก่อสร้างในส่วนงานขุดดินระดับลึก..... 55
3.3.2 สภาพชั้นดินและข้อมูลการเจาะสำรวจดิน..... 58
3.3.3 ข้อมูลการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินจากเครื่องมือ Inclinometer 58
3.3.4 ข้อมูลการวัดแรงในระบบค้ำยันด้วยเครื่องมือ Pressure Gauge 61

3.3.5 Stress ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ในระบบค้ำยันไดอะแฟรม..... 62
บทที่ 4 ขั้นตอนวิธีดำเนินการและผลของการวิจัย..... 63
4.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย..... 63
4.2 การคัดเลือกและเสนอค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ของดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ..... 63
4.3 คุณสมบัติของกำแพงกันดิน และค้ำยัน..... 65
4.4 ผลการวิเคราะห์..... 65
4.4.1 ระบบกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดของ Aquarium..... 65
4.4.1.1 การคาดคะเนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดของพื้นที่ Aquarium จากการใช้ Finite Element Method เปรียบเทียบกับการวัดจริงในสนาม..... 65
4.4.1.1.1 ระบบเข็มพืดแบบ Cofferdam 66
4.4.1.1.2 ระบบเข็มพืดแบบ Single Row 73
4.4.1.2 การเคลื่อนตัวด้านข้างของ Cofferdam Sheet Pile เปรียบเทียบกับการเคลื่อนตัวด้านข้างของ Single Row of Sheet Pile..... 80
4.4.1.3 ความสัมพันธ์ของการทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดินต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของระบบค้ำยันระบบเข็มพืดแบบ Cofferdam.. 80
4.4.1.4 ค่าแรงดันดินของ Cofferdam Sheet Pile เปรียบเทียบกับค่าแรงดันดินของ Single Row of Sheet Pile..... 80
4.4.1.5 การประมาณค่าไดอะแกรมขอบเขตหน่วยแรงดันดิน..... 81
4.4.1.6 การหาค่า Stress ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในระบบค้ำยันเข็มพืดแบบ Cofferdam..... 81
4.4.1.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety Against Besal Heave กับค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบค้ำยันเข็มพืดแบบ Cofferdam และ Single Row..... 83
4.4.2 ระบบกำแพงกันดินชนิดไดอะแฟรมของบ่อบำบัดน้ำเสีย..... 84
4.4.2.1 การคาดคะเนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินชนิดไดอะแฟรม ของพื้นที่บ่อบำบัดน้ำเสีย จากการใช้ Finite Element Method เปรียบเทียบกับการวัดจริงในสนาม 84

4.4.2.2 การประมาณค่าไดอะแกรมขอบเขตหน่วยแรงดันดิน..... 90
4.4.2.3 การหาค่า Stress ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่ เปลี่ยนแปลง
ในระบบค้ำยันไดอะแฟรม..... 93
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ..... 94
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์..... 94
5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม..... 96
รายการอ้างอิง..... 97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 99

สารบัญตาราง

บทที่		หน้า
2.1	ค่า Tilt (δ/H) ของกำแพงที่ทำให้เกิดสภาพ Active และ Passive.....	7
2.2	พฤติกรรมในการขุดดินที่ค่า Stability Number ต่างๆ.....	25
3.1	แสดงคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิจัยงานขุดเพื่อการก่อสร้าง Aquarium	47
3.2	แสดงคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิจัยงานขุดเพื่อการก่อสร้างบ่อบำบัดน้ำเสีย.....	58

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
2.1	ชนิดหน่วยแรงดันด้านข้างเป็นฟังก์ชันกับการเคลื่อนตัวของกำแพง.....	5
2.2	สภาพหน่วยแรงดันด้านข้างของระบบกำแพงกันดินชนิดต่างๆ.....	5
2.3	การคาดคะเนค่า $\Delta\sigma_h$ เนื่องจากผลของ Line Load และ Concentrated Load กระทำข้างกำแพงโดยทฤษฎี Elasticity.....	8
2.4	การคาดคะเนค่า $\Delta\sigma_h$ เนื่องจากผลของ Uniform Load กระทำข้างกำแพง.....	9
2.5	ค่า K_o เป็นฟังก์ชันกับ OCR และค่า PI	12
2.6	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ m ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ K_o และ OCR กับค่า PI.....	12
2.7	วิธีการคิดแรงดันดิน.....	13
2.8	ไดอะแกรมขอบเขตหน่วยแรงดันดินปรากฏ เสนอโดย Terzaghi and Peck	13
2.9	แสดงรูปแบบแรงดันดิน เสนอโดย Tschebotarioff	14
2.10	แสดงรูปแบบแรงดันดิน เสนอโดย Sower.....	14
2.11	ค่าปรับแก้กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบแบบเวนในสนาม.....	17
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำในโพรงดินและค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งกับความลึกของชั้นดินกรุงเทพ.....	17
2.13	รูปแบบการเคลื่อนตัวพื้นฐานของงานขุดที่ใช้ระบบกำแพงกันดินในชั้นดินเหนียวอ่อน	20
2.14 ก	ขอบเขตนอร์มัลไลซ์การทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงกันดินเนื่องจากการขุดในชั้นดินชนิดต่างๆ.....	22
2.14 ข	ขอบเขตนอร์มัลไลซ์การทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงกันดินเนื่องจากการขุดในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง.....	22
2.15	แสดงวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของบ่อขุด (Factor of Safety Against Basal Heave, F.S.).....	26
2.16	นอร์มัลไลซ์การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน กับ Factor of Safety Against Basal Heave.....	27
2.17	ผลของสติสเนสของกำแพงกันดินที่มีต่อปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน.....	30
2.18	นอร์มัลไลซ์การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดินกับนอร์มัลไลซ์สติฟเนสของกำแพง.....	30

2.19 นอร์มัลไลซ์การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดินกับนอร์มัลไลซ์สติฟเนสของค้ำยัน..... 31
2.20 นอร์มัลไลซ์การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดินกับนอร์มัลไลซ์การอัดแรงในค้ำยัน..... 33
2.21 Yield function สำหรับ Mohr–Coulomb Model..... 36
2.22 (a) Elastic Point..... 36
2.22 (b) Plastic Point..... 36
2.20 (c) Elastic–Plastic Stress Point..... 37
3.1 แสดงแผนผังที่ตั้งของโครงการ..... 38
3.2 แผนผังโซนของการขุดดิน..... 39
3.3 แผนผังแสดงการติดตั้งกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดและระบบค้ำยันของการก่อสร้าง Aquarium 40
3.4 แสดงรูปตัดด้านข้างแนว A-A` ในรูปที่ 3.3 ของระบบค้ำยันเข็มพืดแบบ Cofferdam ในการก่อสร้าง Aquarium..... 41
3.5 แสดงรูปตัดด้านข้างแนว B-B` ในรูปที่ 3.3 ของระบบค้ำยันเข็มพืดแบบ Single Row ในการ ก่อสร้าง Aquarium..... 42
3.6 แสดงลำดับขั้นตอนการก่อสร้างระบบค้ำยันเข็มพืดแบบ Cofferdam (รูปตัดด้านข้างแนว A-A` ในรูปที่ 3.3)..... 43
3.7 แสดงลำดับขั้นตอนการก่อสร้างระบบค้ำยันเข็มพืดแบบ Single Row (รูปตัดด้านข้างแนว B-B` ในรูปที่ 3.3)..... 45
3.8 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน , Inclinometer และ Pressure Gauge ของการก่อสร้าง Aquarium 48
3.9 แสดงผลการวัดปริมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดแบบ Cofferdam โดยอุปกรณ์ Inclinometer หมายเลข NO.29..... 49
3.10 แสดงผลการวัดปริมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดแบบ Single Row โดยอุปกรณ์ Inclinometer หมายเลข NO.31..... 50
3.11 แสดงข้อมูลการวัดค่าแรงในระบบค้ำยันระบบเข็มพืดแบบ Cofferdam โดยอุปกรณ์ Pressure Gauge หมายเลข PG.2..... 52
3.12 แสดงข้อมูลการวัดค่าแรงในระบบค้ำยันระบบเข็มพืดแบบ Single Row โดยอุปกรณ์ Pressure Gauge หมายเลข PG.3..... 52
3.13 แสดงผลของการวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน..... 54
3.14 แสดง Stress ที่เกิดขึ้นในระบบค้ำยันเข็มพืดแบบ Cofferdam ณ เวลาที่แตกต่างกัน. 54

3.15 แสดงแผนผังแสดงการติดตั้งกำแพงกันดินชนิดไดอะแฟรม และระบบค้ำยันของการก่อสร้างบ่อบำบัดน้ำเสีย..... 55

3.16 แสดงรูปตัดด้านข้างแนว A-A` ในรูปที่ 3.15 ของระบบค้ำยันไดอะแฟรมในการก่อสร้าง บ่อบำบัดน้ำเสีย..... 56

3.17 แสดงลำดับขั้นตอนการก่อสร้างกำแพงกันดินชนิดไดอะแฟรม (รูปตัดด้านข้างในแนว A-A` ในรูปที่ 3.15) 57

3.18 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือ Inclinometer และ Pressure Gauge ของการก่อสร้างบ่อบัดน้ำเสีย..... 59

3.19 แสดงผลการวัดปริมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินชนิดไดอะแฟรม โดยอุปกรณ์ Inclinometer หมายเลข NO.I-5..... 60

3.20 แสดงผลการวัดค่าแรงในระบบค้ำยันแบบไดอะแฟรมโดยอุปกรณ์ Pressure Gauge หมายเลข PG.2..... 61

3.21 แสดง Stress ที่เกิดขึ้นในระบบค้ำยันไดอะแฟรม ณ เวลาที่แตกต่างกัน..... 62

4.1 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเข็มพืดระหว่างการวัดจริงในสนามเปรียบกับการใช้ FEM ของ Aquarium..... 67

4.2 แสดงการคาดคะเนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืด โดยการใช้ FEM ในขั้นตอนการขุดสุดท้าย..... 72

4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_u/S_u และ G/S_u กับค่า Shear Strain ของระบบค้ำยันเข็มพืดแบบ Cofferdam..... 72

4.4 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเข็มพืดระหว่างการวัดจริงในสนามเปรียบกับการใช้ FEM ของ Aquarium..... 74

4.5 แสดงการคาดคะเนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืด โดยการใช้ FEM ในขั้นตอนการขุดสุดท้าย..... 79

4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_u/S_u และ G/S_u กับค่า Shear Strain ของระบบค้ำยันแบบ Single Row of Sheet Pile..... 79

4.7 แสดงการเปรียบเทียบไดอะแกรมขอบเขตหน่วยแรงดันดินที่เสนอโดย Sower (1979), Terzaghi & Peck (1967), Rankine และ Hydrostatic Earth Pressure กับค่าแรงดันดินที่วัดได้จาก Strut ที่กระทำกับกำแพงกันดินระบบเข็มพืดแบบ Cofferdam..... 82

4.8 แสดง Stress ที่เกิดขึ้นในระบบค้ำยันเข็มพืดแบบ Cofferdam ณ เวลาที่แตกต่างกัน. 83

4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety Against Besal Heave กับค่า

δHmax/H ของระบบค้ำยันเข็มพืดแบบ Cofferdam และ Single Row โครงการสยามพารากอนเปรียบเทียบกับงานวิจัยของศิริมาส วิเศษศรี (2541)..... 84

4.10 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของไดอะแฟรมระหว่างการวัดจริงในสนามเปรียบกับการใช้ FEM ของบ่อบำบัดน้ำเสีย..... 85

4.11 แสดงการคาดคะเนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินชนิดไดอะแฟรมโดยการใช้ FEM ในขั้นตอนการขุดสุดท้าย..... 89

4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_u/S_u และ G/S_u กับค่า Shear Strain ของกำแพงกันดินชนิดไดอะแฟรม..... 90

4.13 แสดงผลการวัดค่าแรงในระบบค้ำยันแบบไดอะแฟรม..... 91

4.14 แสดงการเปรียบเทียบไดอะแกรมขอบเขตหน่วยแรงดันดินที่เสนอโดย Sower (1979), Terzaghi & Peck (1967), Rankine และ Hydrostatic Earth Pressure กับค่าแรงดันดินที่วัดได้จาก Strut ที่กระทำกับกำแพงกันดินระบบไดอะแฟรม..... 92

4.15 แสดง Stress ที่เกิดขึ้นในระบบค้ำยันไดอะแฟรม ณ เวลาที่แตกต่างกัน..... 93

สัญลักษณ์

c	=	ความเชื่อมแน่นที่ปรากฏ
c`	=	ความเชื่อมแน่นที่ปรากฏในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล
CH	=	ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง
CL	=	ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำถึงปานกลาง
EI	=	สติฟเนสของกำแพงกันดิน
E_C	=	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต
E_u	=	ค่าโมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำ
FEM	=	Finite Element Method
$f`_C$	=	ค่ากำลังประลัยของคอนกรีต
F.S.	=	ค่าความปลอดภัย
H	=	ความลึกของการขุด
H_C	=	ความลึกวิกฤติ
h	=	ระยะห่างในแนวดิ่งของกำแพง
K_O	=	สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต
$K_{O(NC)}$	=	สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันด้านข้างแบบสถิตของดินเหนียวชนิดอัดแน่นปกติ
$K_{O(OC)}$	=	สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันด้านข้างแบบสถิตของดินเหนียวชนิดอัดแน่นเกินตัว
K_A	=	สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันด้านข้างแบบ Active
K_P	=	สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันด้านข้างแบบ Passive
LL	=	ขีดจำกัดความเหลว
M	=	อัตราส่วนของโมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ
N	=	ค่าการทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน (ครั้ง/ฟุต)
NC	=	ดินเหนียวอัดแน่นปกติ
OC	=	ดินเหนียวอัดแน่นเกินตัว
OCR	=	สัดส่วนอัดแน่นเกินตัวของดิน
PI	=	Plasticity Index
PL	=	Plastic Limit
q	=	Surcharge
S	=	สติฟเนสของค้ำยัน
S_U	=	ค่ากำลังรับแรงเฉือนชนิดไม่ระบายน้ำ

$S_{U(FV)}$ = ค่ากำลังรับแรงเฉือนชนิดไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบแบบเวนในสนาม

$S_{U(UC)}$ = ค่ากำลังรับแรงเฉือนชนิดไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบรับแรงอัดแบบไม่จำกัด

u = ความดันน้ำในโพรงดิน

W_n = ค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ

Z = ระดับความลึกของชั้นดิน

σ = หน่วยแรงรวม

σ' = หน่วยแรงประสิทธิผล

σ_h = หน่วยแรงดันด้านข้างรวม

$\Delta\sigma_h$ = หน่วยแรงดันด้านข้างรวมที่เพิ่มขึ้น

σ_{hA} = หน่วยแรงดันด้านข้างรวมแบบ Active

σ_{hO} = หน่วยแรงดันด้านข้างรวมแบบสถิต

σ_{hP} = หน่วยแรงดันด้านข้างรวมแบบ Passive

σ_v = หน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง

σ'_h = หน่วยแรงดันด้านข้างในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล

σ'_{VC} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง

σ'_{VO} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ

γ_t = หน่วยน้ำหนักรวมของดิน

μ = ค่าปรับแก้ของ Bjerrum

ϕ = ค่ามุมเสียดทานภายใน

ϕ' = ค่ามุมเสียดทานในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล

δ = ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

δ_H = ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดิน

$\delta_{H,max}$ = ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน

δ_V = ค่าการทรุดตัวที่ผิวดิน

$\delta_{V,max}$ = ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินสูงสุด