

พฤติกรรมหลังการวิบัติของคันดินบนชั้นดินโคลนบริเวณปากแม่น้ำ



นายประสม ณิชชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2700-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 21044624

PERFORMANCE OF POST FAILURE EMBANKMENT ON MUD AT DELTA AREA

Mr. Prasom Na Chatre

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 974-17-2700-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมหลังการวิบัติของคันดินบนชั้นดินโคลนบริเวณปากแม่น้ำ

โดย

นาย ประสม ฒ ชาติรี


สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

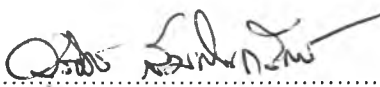
อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรัักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

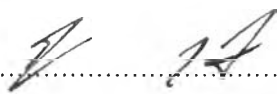
  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรัักษ์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏ์ชน)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. จีรวัตร บุญญะฐิติ)

นายประสม ฒ ชาตรี : พฤติกรรมหลังการวิบัติของคันดินบนชั้นดินโคลนบริเวณปากแม่น้ำ  
(PERFORMANCE OF POST FAILURE EMBANKMENT ON MUD AT DELTA AREA)  
อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร. วันชัย เทพรัักษ์, 175 หน้า. ISBN 974 – 17 – 2700 - 3

การก่อสร้างคันดินบนชั้นดินเหนียวอ่อนมากในปัจจุบันมีวิธีการก่อสร้างหลากหลายรูปแบบ แต่ละรูปแบบวิธีการมีความเหมาะสมที่แตกต่างกันไป งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวและเสถียรภาพของคันดินที่ก่อสร้างบนชั้นดินโคลนปากแม่น้ำ ลักษณะชั้นดินประกอบด้วยชั้นดินโคลนลึก 6 ม. มีค่าความชื้น 110 – 130 % และกำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงตามความลึกมีค่าประมาณ 2.55 – 8.55 kN/m<sup>2</sup>. ถัดมาเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางและดินเหนียวแข็ง โดยคันดินที่ทำการก่อสร้างมีการใช้วัสดุเสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ ไม้ไผ่ และเสาเข็มไม้ ซึ่งได้ทำการทดลองก่อสร้างคันดินทดสอบ โดยถมสูงขึ้นไปเป็นชั้นคอนจาก 1 ม., 2 ม. และสิ้นสุดที่ความสูง 3 ม. จำนวน 3 พื้นที่ พร้อมทั้งทำการติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัว เพื่อเก็บข้อมูลปริมาณการทรุดตัวของคันดินระหว่างทำการก่อสร้างและภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ นอกจากนี้ยังได้เก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินฐานรากบริเวณด้านข้างของคันดินทดสอบ เพื่อตรวจสอบการวิบัติของคันดิน

การก่อสร้างคันดินบนชั้นดินโคลนโดยวิธีการเสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ ไม้ไผ่ และเสาเข็มไม้ ถึงแม้จะเกิดการวิบัติเนื่องจากเกิดการไหลของดิน แต่ก็ยังเป็นวิธีการที่สามารถก่อสร้างได้และช่วยให้ปริมาณการเคลื่อนตัวของดินลดน้อยลงกว่ากรณีปกติ เนื่องจากพฤติกรรมของคันดินทดสอบจะเกิดการแทนที่ของดินถมลูกเรียง (ดินถม) เข้าไปในดินโคลน โดยมีระบบของเสาเข็มไม้ แผ่นใยสังเคราะห์ และ ไม้ไผ่ เป็นระบบที่พองให้เกิดเป็นกระเปาะดิน ผลการวิเคราะห์ปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างการก่อสร้าง ณ แนวกึ่งกลางของคันดินมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักจากคันดินถม พบว่า  $\rho_i = 0.0041 q^2 + 0.2542 q + 0.0336$  เมื่อ  $\rho_i$  คือปริมาณการทรุดตัว (เมตร) และ  $q$  คือ น้ำหนักคันดิน (กิโลนิวตันต่อตารางเมตร)

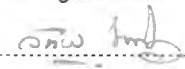
ผลการศึกษาด้านเสถียรภาพ พบว่าดินฐานรากชั้นดินโคลนที่ไม่คำนึงถึงการเสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ ไม้ไผ่ และเสาเข็มไม้ มีค่าความปลอดภัยของกำลังรับแรงแบกทานและค่าความปลอดภัยเชิงลาดต่ำมาก โดยค่าความปลอดภัยด้านกำลังรับแรงแบกทานมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.22 มีผลทำให้เกิดการวิบัติการใช้วัสดุเสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ ไม้ไผ่ และเสาเข็มไม้ มีผลทำให้เสถียรภาพเชิงลาดหลังจากเกิดการแทนที่ของดินถมเข้าไปในดินโคลนฐานรากมีค่าสูงขึ้นและสามารถก่อสร้างได้จริง โดยค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพที่ความสูง 3 ม. มีค่าประมาณ 1.11

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโยธา .....

สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโยธา .....

ปีการศึกษา ..... 2545 .....

ลายมือชื่อนิสิต .....  .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  .....

## 4370379821: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: EMBANKMENT / REINFORCEMENT / PILE / SETTLEMENT / STABILITY

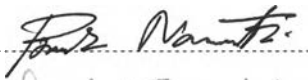

PRASOM NA CHATRE : PERFORMANCE OF POST FAILURE EMBANKMENT  
ON MUD AT DELTA ARAE

THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF.WANCHAI TEPARAKSA, D.Eng., 175 pp.  
ISBN 974 – 17 – 2700 – 3

Embankment on very soft clay can be constructed by various different methods. This research aims to study the behavior and settlement of the embankment constructed on mud foundation at delta area. Soil profile consists of 6 m. thick mud with water content between 110 to 130 percent and the undrained shear strength increasing linearly with depth between 2.55 to 8.55 kN/m<sup>2</sup>. The embankment was reinforced by geotextile, bamboo and timber piles. Three test sections of embankment were constructed in stages from 1 m high 2 m high and end at 3 m. high. The vertical and lateral ground displacement during and after construction were measured by means of surface settlement markers installed on geotextile.

The embankment constructed on mud with reinforced by geotextile, bamboo and timber piles can be constructed even the bearing capacity failure on mud foundation was induced. The reinforced pattern can reduce the lateral soil movement than case of non-reinforce embankment because the mud foundation was replaced by filled embankment and forming the compacted soil bulb beneath the embankment. The settlement at centerline of embankment ( $\rho_i$ , m.) during construction is in function of embankment surcharge ( $q$ , kN/m<sup>2</sup>) as follows:  $\rho_i = 0.0041q^2 + 0.2542q + 0.0336$ .

The non-reinforced embankment shows a very low safety factor against overall stability failure. The safety factor against bearing capacity failure on mud foundation for case of non-reinforcement with geotextile, bamboo and timber pile is in the order of 0.22. The embankment with reinforcement of geotextile, bamboo and timber piles induces the compacted soil bulb in the mud foundation and lead to increase the safety factor against stability of embankment. The safety factor for case of 3 m. high embankment with reinforcement is in the order 1.11

Department ..... Civil Engineering ..... Student's signature .....  .....  
Field of study ..... Civil Engineering ..... Advisor's signature .....  .....  
Academic year ..... 2002 .....

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาในหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลงได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณความเอาใจใส่ของบิดา มารดา และครอบครัว ที่ช่วยเหลือทั้งร่างกาย แรงใจ ทุนทรัพย์ และความห่วงใยเสมอมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วันชัย เทพรัักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้โอกาสในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ และให้คำปรึกษา ในปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นอย่างมากมาย ในการปฏิบัติงาน จนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาสละเวลา และให้คำแนะนำ รวมทั้งให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องวิจัยพฤกษศาสตร์ ทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือ และให้ความช่วยเหลือในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ทั้งอุปกรณ์ และสถานที่ ในการปฏิบัติงาน จนงานสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัทโปรเกรสเทคโนโลยีคอนซัลแตนท์ จำกัด ที่อำนวยความสะดวกในการศึกษาและเก็บข้อมูล ณ สถานที่ก่อสร้าง จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ รุ่นพี่ และเพื่อน ๆ ทุกท่าน ในความเป็นเพื่อนร่วมงาน ในความช่วยเหลือ ในการเป็นผู้รับฟัง และให้คำแนะนำดี ๆ เสมอมา รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้เอ่ยถึงในที่นี้ ที่มีส่วนร่วมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

ประสม ณ ชาตรี

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
สัญลักษณ์.....	ด

บทที่

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 การก่อสร้างคันทางบนชั้นดินอ่อน.....	8
2.2 การปรับปรุงสมบัติของดินโดยวิธีการใช้วัสดุเสริมแรง.....	9
2.2.1 การใช้ Geotextile ในงานวิศวกรรมปฐพี.....	10
2.2.2 คุณสมบัติและการเลือกใช้ แผ่นใยสังเคราะห์.....	11
2.2.2.1 คุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์.....	11
2.2.2.2 คุณสมบัติทางกลศาสตร์.....	14
2.2.3 การใช้ Geotextile สำหรับงานคันทาง.....	14
2.3 เทคนิคการก่อสร้างคันทางโดยวิธีการใช้เสาเข็ม.....	18
2.3.1 การใช้เสาเข็มเสริมเสถียรภาพของเชิงลาด.....	19
2.3.1.1 การวิเคราะห์แรงต้านทานด้านข้างของเสาเข็ม โดยวิธีของ Broms, B.B.(1974).....	20
2.3.1.1.1 การวิเคราะห์แรงต้านทานด้านข้างของเสาเข็มในดินเหนียว .....	20
2.3.1.1.2 การวิเคราะห์แรงต้านทานด้านข้างของเสาเข็มในดินทราย .....	25
2.3.1.2 การวิเคราะห์แรงต้านทานด้านข้างของเสาเข็ม โดยวิธีของ Hansen, J.B., (1961).....	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1.3	การวิเคราะห์แรงต้านทานด้านข้างของเสาเข็ม โดยวิธีของ Ito, et al., (1975).....	33
2.4	การทรุดตัวในมวลดิน.....	34
2.4.1	การวิเคราะห์หน่วยแรงในมวลดินเนื่องจากแรงกระทำภายนอก.....	35
2.4.1.1	แรงกระทำแบบแผ่สม่ำเสมอเป็นแถบ .....	35
2.4.1.2	แรงกระทำแบบคันดินถม.....	37
2.5	ชนิดของการทรุดตัว.....	39
2.5.1	การทรุดตัวที่เกิดขึ้นแบบทันที.....	39
2.5.2	การทรุดตัวที่เป็นฟังก์ชันของเวลา.....	40
2.5.3	การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวครั้งที่สอง.....	40
2.6	การคาดคะเนการทรุดตัวของดินเหนียว.....	40
2.6.1	การคาดคะเนการทรุดตัวที่เกิดขึ้นแบบทันที.....	41
2.6.1.1	การคาดคะเนการทรุดตัวโดยทฤษฎีอีลาสติก.....	41
2.6.1.2	การคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธี Poulos (1967).....	43
2.6.1.3	การคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธี D'Appolonia et al (1971)....	44
2.6.2	การคาดคะเนการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการอัดตัวคายน้ำ.....	46
2.6.2.1	การประมาณการทรุดตัวโดยวิธี Terzaghi and Peck (1948).....	46
2.6.2.2	การประมาณการทรุดตัวโดยวิธี Asaoka (1978).....	48
2.7	การวิเคราะห์เสถียรภาพ ( Stability Analysis).....	50
2.7.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้านกำลังรับแรงแบกาน .....	50
2.7.1.1	ทฤษฎีกำลังรับแรงแบกานของ Terzaghi, 1943 .....	51
2.7.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาด (Slope Stability) .....	53
2.7.2.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธี Fellenius (1927) หรือวิธี Swedish, Ordinary Method of Slice .....	55
2.7.2.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธี Simplified Bishop Method of Slice .....	56
2.7.2.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีที่ใช้วัสดุเสริมแรง .....	57
2.7.2.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีที่มีการเสริมเสาเข็มด้านการวิบัติ.....	58
บทที่ 3	การดำเนินการวิจัย.....	60
3.1	ศึกษาสมบัติทางกลศาสตร์ของดินบริเวณสถานที่ทำการก่อสร้าง.....	60



สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.1 การเจาะสำรวจดิน (Soil Exploration) .....	60
3.1.2 การทดสอบในสนาม (In-Situ Test).....	61
3.1.2.1 การทดสอบไบนเฉือน (Vane Shear Test).....	61
3.1.2.2 การทดสอบฝังจุมมาตรฐาน (Standard Penetration Test).....	64
3.1.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Testing).....	67
3.1.3.1 การทดสอบหาสมบัติชั้นพื้นฐาน.....	67
3.1.3.2 การทดสอบหาสมบัติด้านวิศวกรรม.....	67
3.2 วิธีดำเนินการก่อสร้าง.....	68
3.3 ศึกษาเก็บข้อมูลการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนาม.....	75
3.4 การวิเคราะห์การทรุดตัว.....	76
3.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทาง.....	76
3.5.1 การวิเคราะห์กรณีที่ไม่มีการเสริมแรง (Non Reinforcement) .....	76
3.5.2 การวิเคราะห์กรณีที่มีการเสริมแรง (Reinforcement) .....	77
<b>บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลและอภิปรายผล.....</b>	<b>79</b>
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกลศาสตร์ของดินบริเวณสถานที่ทำการก่อสร้าง.....	79
4.1.1 ผลการศึกษาสมบัติชั้นพื้นฐาน.....	79
4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรม.....	83
4.1.2.1 ผลการศึกษาสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของมวลดิน.....	83
4.1.2.2 ผลการศึกษาสมบัติด้านการเคลื่อนตัวของมวลดิน.....	84
4.2 ผลข้อมูลการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในสนามและพฤติกรรมของคันดินถม	
ในช่วงระหว่างการก่อสร้าง .....	85
4.2.1 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในสนามและพฤติกรรมการวิบัติ	
ในช่วงระหว่างการก่อสร้าง .....	85
4.2.2 ผลการศึกษาวิเคราะห์การทรุดตัวชนิดที่เกิดขึ้นทันที .....	95
4.3 ผลข้อมูลการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในสนามและพฤติกรรมของคันดินถม	
หลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ .....	95
4.3.1 ผลข้อมูลปริมาณการทรุดตัวและพฤติกรรมของคันดิน	
ภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ .....	95
4.4 ผลการศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินถม .....	102
4.4.1 เสถียรภาพด้านกำลังรับแรงแบกทาน .....	103

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2	เสถียรภาพเชิงลาดของคันดิน .....	104
4.4.2.1	กรณีคันดินไม่มีการเสริมแรง .....	106
4.4.2.2	กรณีคันดินมีการเสริมแรง .....	106
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....		109
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	109
5.1.1	การทรุดตัวระหว่างการก่อสร้าง.....	109
5.1.2	เสถียรภาพของคันดิน .....	109
5.1.3	พฤติกรรมของคันดินถม .....	110
5.1.4	สรุปผลการศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการก่อสร้างคันดินบนชั้นดินโคลน.....	110
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	110
รายการอ้างอิง.....		111
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทรุดตัวที่ตรวจวัดในสนาม.....		115
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำและการทดสอบไบนีออน.....		135
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินถม.....		145
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		158

## สารบัญตาราง

ตาราง

หน้า

2.1	คุณสมบัติของแผ่นใยสังเคราะห์(Geotextile).....	11
2.2	การเลือกใช้ แผ่นใยสังเคราะห์(Geotextile).....	12
2.3	ค่ามุมเสียดทานระหว่าง มวลดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นกับ แผ่นใยสังเคราะห์.....	14
2.4	ค่าตัวคูณลดกำลัง $RF_{ID}, RF_{CR}, RF_{CD}, RF_{BD}$ .....	16
2.5	การพิจารณาชนิดของเสาเข็ม.....	21
2.6	ค่า subgrade Reaction , $k_1$ .....	21
2.7	ค่า Influence Factor , $I_p$ .....	42
3.1	วิธีการปรับแก้ค่า N (SPT) เนื่องจากผลของ Effective Overburden Pressure.....	65
3.2	คุณสมบัติของแผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้งาน .....	72
4.1	คุณสมบัติของมวลดินประกอบการวิเคราะห์ .....	103
4.2	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้านกำลังรับแรงเบกทาน .....	104
4.3	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินในกรณีต่างๆ.....	105
ก1	ข้อมูลปริมาณการทรุดตัวของคันดินทดสอบจากการตรวจวัดระหว่างการก่อสร้าง Test Section Line C.....	115
ก2	ข้อมูลการตรวจวัดระดับดินเดิมก่อนทำการถมดินของ Test Section LineB.....	116
ก3	ข้อมูลการตรวจวัดระดับการปูดตัวของมวลดินที่ระยะต่างๆ จากแนวศูนย์กลางคันดิน ภายหลังจากการถมที่ระดับ +1.00 เมตร ของคันดิน Test Section Line B .....	116
ก4	ข้อมูลการตรวจวัดระดับการปูดตัวของมวลดินที่ระยะต่างๆ จากแนวศูนย์กลางคันดิน ภายหลังจากการถมที่ระดับ +1.50 เมตร ของคันดิน Test Section Line B .....	117
ก5	ข้อมูลการตรวจวัดระดับการปูดตัวของมวลดินที่ระยะต่างๆ จากแนวศูนย์กลางคันดิน ภายหลังจากการถมที่ระดับ +1.70 เมตร ของคันดิน Test Section Line B .....	117
ก6	ข้อมูลการตรวจวัดระดับการปูดตัวของมวลดินที่ระยะต่างๆ จากแนวศูนย์กลางคันดิน ภายหลังจากการถมที่ระดับ +2.50 เมตร ของคันดิน Test Section Line B .....	118
ก7	ข้อมูลการตรวจวัดระดับการปูดตัวของมวลดินที่ระยะต่างๆ จากแนวศูนย์กลางคันดิน ภายหลังจากการถมที่ระดับ +3.00 เมตร ของคันดิน Test Section Line B .....	118
ก8	ข้อมูลการตรวจวัดระดับดินเดิมก่อนทำการถมดินของ Test Section Line C.....	119
ก9	ข้อมูลการตรวจวัดระดับการปูดตัวของมวลดินที่ระยะต่างๆ จากแนวศูนย์กลางคันดิน ภายหลังจากการถมที่ระดับ +1.00 เมตร ของคันดิน Test Section Line C .....	120
ก10	ข้อมูลการตรวจวัดระดับการปูดตัวของมวลดินที่ระยะต่างๆ จากแนวศูนย์กลางคันดิน ภายหลังจากการถมที่ระดับ +2.00 เมตร ของคันดิน Test Section Line C .....	121

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ก11	ข้อมูลการตรวจวัดระดับการปวดตัวของมวลดินที่ระยะต่างๆ จากแนวศูนย์กลางคันดิน ภายหลังจากการถมที่ระดับ +3.00 เมตร ของคันดิน Test Section Line C .....	122
ก12	ข้อมูลการทรุดตัวภายหลังการก่อสร้างของคันดินทดสอบ Test Section Line B .....	126
ก13	ข้อมูลการทรุดตัวภายหลังการก่อสร้างของคันดินทดสอบ Test Section Line C .....	129
ง1	ตัวอย่างการวิเคราะห์ Resisting Moment, $M_p$ กรณีก่อนทำการก่อสร้าง เมื่อคันดินมีระดับ +3 เมตร .....	157

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ

หน้า

1.1 แผนที่ตั้งสถานที่ตั้งโครงการ.....2

1.2 ลักษณะคันหินทิ้งที่สร้างล้อมรอบเพื่อกักเก็บตะกอน โคลน.....3

1.3 รูปตัดตามขวางของคันดินรูปแบบที่ 1.....4

1.4 ผังบริเวณสถานที่ก่อสร้างคันดินบ่อบำบัดน้ำเสีย.....4

1.5 รูปตัดตามขวางของคันดินรูปแบบที่ 2.....5

1.6 รูปตัดตามขวางของคันดินรูปแบบที่ 3.....5

1.7 รูปตัดตามขวางของคันดินรูปแบบที่ 4.....6

2.1 ลักษณะการวิบัติของคันทาง.....8

2.2 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนระหว่างมวลดิน กับ Geotextile.....14

2.3 ลักษณะของการเสริม Geotextile ในงานก่อสร้างคันทาง.....15

2.4 ลักษณะการวิบัติของคันดินที่เสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์.....18

2.5 ลักษณะการเสริมเสาเข็มในงานก่อสร้างคันทาง.....19

2.6 ลักษณะการใส่เสาเข็มเสริมในงานเพิ่มเสถียรภาพ.....19

2.7 ลักษณะการวิบัติของเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้าง.....20

2.8 ลักษณะการกระจายของหน่วยแรงภายใต้แรงกระทำด้านข้าง.....20

2.9 ค่าสัมประสิทธิ์  $n_h$  ..... 21

2.10 ลักษณะการแอ่นตัวด้านข้าง แรงปฏิกิริยาของดิน และการกระจายของโมเมนต์  
ของเสาเข็มสั้น.....22

2.11 แรงต้านทานด้านข้างของเสาเข็มสั้น.....22

2.12 ลักษณะการแอ่นตัวด้านข้าง แรงปฏิกิริยาของดิน และการกระจายของโมเมนต์  
ของเข็มยาว.....23

2.13 แรงต้านทานด้านข้างของเสาเข็มยาว.....23

2.14 ลักษณะการแอ่นตัวด้านข้าง แรงปฏิกิริยาของดิน และการกระจายของโมเมนต์  
ของเข็มสั้นหัวยึด.....24

2.15 ลักษณะการแอ่นตัวด้านข้าง แรงปฏิกิริยาของดิน และการกระจายของโมเมนต์  
ของเข็มยาวปานกลางหัวยึด.....24

2.16 ลักษณะการแอ่นตัวด้านข้าง แรงปฏิกิริยาของดิน และการกระจายของโมเมนต์  
ของเข็มยาวหัวยึด.....25

2.17 ลักษณะการวิบัติและการกระจายของหน่วยแรงภายใต้  
แรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มในดินทราย .....26

2.18 ลักษณะการวิบัติและการกระจายของหน่วยแรงและโมเมนต์ของเสาเข็มสั้นหัวอิสระ ....27

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

2.19	แรงต้านทานด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มสั้น .....	27
2.20	ลักษณะการวิบัติและการกระจายของหน่วยแรงและโมเมนต์ของเสาเข็มยาวหัวอิสระ ....	28
2.21	แรงต้านทานด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มยาว.....	29
2.22	ลักษณะการวิบัติและการกระจายของหน่วยแรงคั่นด้านข้าง และโมเมนต์ของเสาเข็มสั้นหัวยึด .....	29
2.23	ลักษณะการวิบัติและการกระจายของหน่วยแรงคั่นด้านข้าง และโมเมนต์ของเสาเข็มยาวปานกลางแบบหัวยึด .....	30
2.24	ลักษณะการวิบัติและการกระจายของหน่วยแรงคั่นด้านข้าง และโมเมนต์ของเสาเข็มยาวแบบหัวยึด .....	31
2.25	ลักษณะหน่วยแรงคั่นทางคั่นข้างของเสาเข็ม.....	32
2.26	ค่าสัมประสิทธิ์ $K_q, K_c$ .....	32
2.27	ลักษณะแรงคั่นทางคั่นข้างที่กระทำต่อเสาเข็มกรณีที่ดินมีการเปลี่ยนแปลง.....	32
2.28	ลักษณะของการใช้เสาเข็มแถวด้านการวิบัติ.....	32
2.29	ลักษณะการเคลื่อนตัวของมวลดินระหว่างเสาเข็ม.....	33
2.30	ลักษณะของหน่วยแรงที่กระทำแบบสมมาตรเป็นแถบ.....	33
2.31	ลักษณะของหน่วยแรงที่กระทำแบบสมมาตรเป็นแถบเมื่อมีฐานรองรับที่แข็งแรง.....	35
2.32	ค่า $I_{st}$ สำหรับการคำนวณค่า $\Delta\sigma_{zz}$ ที่ขอบของหน่วยแรงเมื่อค่า $U$ มีค่าต่าง ๆ กัน.....	36
2.33	ค่า $I_{st}$ สำหรับการคำนวณค่า $\Delta\sigma_{\theta}$ ที่ขอบของหน่วยแรงเมื่อค่า $U$ มีค่าต่าง ๆ กัน.....	36
2.34	ลักษณะของหน่วยแรงกระทำแบบคั่นดินถม.....	37
2.35	ค่าแฟคเตอร์ $I$ สำหรับการคำนวณค่า $\Delta\sigma_{zz}$ .....	38
2.36	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับการทรุดตัว.....	38
2.37	ตำแหน่งที่พิจารณาค่าแฟคเตอร์ $I_p$ .....	41
2.38	ลักษณะของหน่วยแรงและมิติสำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัว.....	42
2.39	ค่า Influence Factor สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้าง.....	43
2.40	ค่า Influence Factor สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง.....	43
2.41	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $f$ กับค่า OCR .....	44
2.42	ค่า SR ของ D'Applonia et al. (1971).....	45
2.43	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ.....	46
2.44	ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา.....	47
2.45	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\rho_k$ กับ $\rho_{k-1}$ .....	48
2.46	ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ.....	49

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

2.47	รูปแบบการวิบัติของวิบัติ ของฐานรากเนื่องจากกำลังรับแรงแบกทาน .....	49
2.48	ลักษณะ Bearing Capacity Failure ของ Terzaghi (1943) .....	51
2.49	Bearing Capacity Factor [Meyerhof, 1955] .....	52
2.50	รูปแบบลักษณะการวิบัติของเชิงลาด (Mode of Failure) .....	52
2.51	ลักษณะการวิบัติของเชิงลาดแบบส่วนโค้งของวงกลม.....	53
2.52	ระบบของแรงกระทำต่อมวลดินทั้งหมดในแต่ละส่วน (Slice) .....	54
2.53	ระบบของแรงกระทำต่อมวลดินในแต่ละ Slice (Fellenius, Ordinary Method).....	55
2.54	ระบบของแรงกระทำต่อมวลดินในแต่ละ Slice (Simplified Bishop Method).....	56
2.55	ลักษณะของแรงกระทำเมื่อมีการเสริมแรงด้วย Geotextile.....	57
2.56	ลักษณะการเสริมเสาเข็มสำหรับงานเชิงลาด.....	58
3.1	ตำแหน่งหลุมเจาะและการทดสอบไบนีออน.....	61
3.2	เครื่องมือและการทดสอบไบนีออน (Field Vane Shear Test) .....	62
3.3	ค่าตัวคูณปรับแก้ $\mu$ สำหรับผลจากการทดสอบไบนีออน (Bjerrum, 1972)... ..	63
3.4	วิธีการทดสอบฝังจรมมาตรฐาน (Standard Penetration Test , SPT).....	64
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT (N) กับค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ).....	65
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT (N) กับ กำลังรับแรงเฉือน จากการทดสอบแบบ Unconfined Compressive Strength.....	66
3.7	ค่าแฟคเตอร์ปรับแก้ค่า SPT ( $C_N$ ).....	66
3.8	รูปตัดตามขวางของคันดินที่ทำการศึกษา.....	68
3.9	แบบแปลนตำแหน่งเสาเข็ม.....	69
3.10	ตำแหน่งจุดทดสอบคันดิน (Test Section).....	70
3.11	ขั้นตอนการตอกเข็มไม้.....	71
3.12	ขั้นตอนการผูกวางตะแกรงไม้ไผ่.....	71
3.13	ขั้นตอนการปูแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile).....	72
3.14	การถมดินชั้นที่ 1.....	73
3.15	การถมดินชั้นที่ 2.....	74
3.16	การถมดินชั้นที่ 3.....	74
3.17	เครื่องมือวัดการทรุดตัว Settlement Plate.....	75
3.18	ตำแหน่งการติดตั้ง Settlement Plate.....	76
4.1	ลักษณะชั้นดินบริเวณก่อสร้างโครงการระบบบำบัดน้ำเสีย.....	80
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความลึก.....	82

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับความลึก.....	82
4.4	ผลการทดสอบไบนีออน (Field Vane Shear Test).....	83
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคันดิน กับ ปริมาณการทรุดตัว ณ กึ่งกลางคันดิน ในช่วงการก่อสร้าง Line C.....	86
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับคันดิน กับ ปริมาณการทรุดตัวในช่วงการก่อสร้าง Line C...	86
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงคันดิน และ ปริมาณการทรุดตัว กับระยะเวลา ของการก่อสร้าง Line C.....	87
4.8	ลักษณะ Profile ของผิวดินเดิม ณ จุดทดสอบก่อสร้างคันดิน.....	87
4.9	ลักษณะ Profile ของคันดินเมื่อถมคันดินถึงระดับต่างๆของ Test Section Line B .....	88
4.10	ลักษณะ Profile ของคันดินเมื่อถมคันดินถึงระดับต่างๆของ Test Section Line C .....	89
4.11	ลักษณะการเคลื่อนตัวและการเกิด Heave ภายหลังการถมคันดินถึงระดับ 1.00 เมตร. ของ Test Section Line B .....	91
4.12	ลักษณะการเกิด Heave ภายหลังการถมคันดินถึงระดับ +2.00 เมตร ของ Test Section Line B.....	92
4.13	ลักษณะการเกิด Heave และ พฤติกรรมของเสาเข็มภายหลังการถมคันดิน ถึงระดับ +3.00 เมตรของ Test Section Line B.....	93
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการทรุดตัวทั้งหมด กับเวลา ของคันดินทดสอบ Line B ...	96
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการทรุดตัวทั้งหมด กับเวลา ของคันดินทดสอบ Line C ...	97
4.16	ลักษณะของรอยแยกภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ 30 วัน ของ Test Section Line B .....	99
4.17	ลักษณะของรอยแยกภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ 555 วัน ของ Test Section Line B ..	100
4.18	ลักษณะของคันดินภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ 457 วันของ Test Section Line C .....	101
4.19	ลักษณะของการแทนที่ของดินถม.....	102
ก1	รูปตัดตามขวางของคันดินทดสอบ Line B เมื่อถมคันดินระดับ 1.00 ,2.00และ 3.00 เมตร ณ. Station ต่างๆ.....	123
ก2	รูปตัดตามขวางของคันดินทดสอบ Line C เมื่อถมคันดินระดับ 1.00 ,2.00และ Station ต่างๆ.....	126
ข1	ข้อมูลสมบัติของดินจากหลุมเจาะ BH – 1.....	135
ข2	ข้อมูลสมบัติของดินจากหลุมเจาะ BH – 2.....	136
ข3	ข้อมูลสมบัติของดินจากหลุมเจาะ BH – 3.....	137
ข4	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำหลุมเจาะ BH-1 ความลึก 3.00 – 3.50 เมตร.....	138
ข5	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำหลุมเจาะ BH-1/1 ความลึก 1.50 – 2.50 เมตร.....	139



## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ข6	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำหลุมเจาะ BH-1/1 ความลึก 4.50 – 5.00 เมตร.....	140
ข7	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำหลุมเจาะ BH-2/1 ความลึก 3.00 – 4.00 เมตร.....	141
ข8	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำหลุมเจาะ BH-2/1 ความลึก 9.00 – 10.50 เมตร.....	142
ข9	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำหลุมเจาะ BH-3 ความลึก 4.50 – 5.00 เมตร.....	143
ข10	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำหลุมเจาะ BH-3 ความลึก 7.50 – 8.50 เมตร.....	144
ค1	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินเมื่อถมถึงระดับ +1.00 เมตร.....	145
ค2	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินเมื่อถมถึงระดับ +2.00 เมตร.....	146
ค3	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินเมื่อถมถึงระดับ +3.00 เมตร.....	147
ค4	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินภายหลังจากที่ถมถึงระดับ +1.00 เมตร.....	148
ค5	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินภายหลังจากที่ถมถึงระดับ +2.00 เมตร.....	149
ค6	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินภายหลังจากที่ถมถึงระดับ +3.00 เมตร.....	150
ค7	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินภายหลังจากที่ถมดินเพิ่มจากระดับ +1.00 เมตร เป็นระดับ +2.00 เมตร.....	151
ค8	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินภายหลังจากที่ถมดินเพิ่มจากระดับ +2.00 เมตร เป็นระดับ +3.00 เมตร.....	152
ค9	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินเมื่อพิจารณาจากลักษณะของรอยแยก ที่ปรากฏบนคันดินกรณีที่ไม่มีการเสริมแรง.....	153
ค10	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินเมื่อพิจารณาภายหลังจากที่ถมดินถึง ระดับ +3.00 เมตร และตัดส่วน Heave ออก.....	154

## สัญลักษณ์

$\sigma'_{vo}, \sigma'_{ho}$	=	Effective Overburden Pressure
$\sigma'_{vm}$	=	Maximum Effective Past Pressure
$\Delta\sigma_{zz}$	=	หน่วยแรงในแนวตั้งเนื่องจากแรงกระทำภายนอก
$\Delta\sigma_{xx}$	=	หน่วยแรงในแนวราบเนื่องจากแรงกระทำภายนอก
$\Delta\tau_{xz}$	=	หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากแรงกระทำภายนอก
$\Delta\theta$	=	การเปลี่ยนแปลงของ Bulk Stress
$\Delta u$	=	แรงดันน้ำส่วนเกิน
$\nu$	=	ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson Ratio)
$\mu$	=	ตัวคูณปรับแก้ค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบไบเลี่ยน
$\phi$	=	ค่ามุมเสียดทานภายใน
$\rho_i$	=	ปริมาณการทรุดตัวในแนวตั้งชนิดที่เกิดขึ้นทันที
$\rho_e, \rho_{ez}$	=	ปริมาณการทรุดตัวในแนวตั้ง ช่วงอีลาสติก
$\rho_{ex}$	=	ปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้าง
$\rho_{cf}$	=	ปริมาณการทรุดตัวชนิดที่เป็นฟังก์ชันของเวลา
$\rho_{ct}$	=	ปริมาณการทรุดตัวชนิดที่เป็นฟังก์ชันของเวลา ณ เวลาใดๆ
$\rho_s$	=	ปริมาณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวครั้งที่สอง
$\rho_T$	=	ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมด
$\epsilon_{vi}$	=	ความเครียดในแนวตั้ง
$\Delta t$	=	ช่วงระยะเวลาของการเก็บข้อมูลการทรุดตัว
$\beta_0$	=	ค่าปริมาณการทรุดตัวที่เส้นกราฟตัดกับแกน $\rho_k$
$\beta_1$	=	ค่าความลาดชันของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดข้อมูลการทรุดตัว
$B, D$	=	ขนาดความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม
$CR$	=	Compression Ratio
$C_N$	=	ตัวคูณปรับแก้ค่า SPT (N)
$C_v$	=	สัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวคายน้ำ
$C_\alpha$	=	สัมประสิทธิ์การอัดตัวครั้งที่สอง
$c_u$	=	ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
$D_1$	=	ระยะห่างจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางเสาเข็ม
$D_2$	=	ระยะห่างจากขอบถึงขอบเสาเข็ม
$E_u$	=	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ
$FS$	=	อัตราส่วนความปลอดภัย
$FS_R$	=	อัตราส่วนความปลอดภัยที่มีการเสริมแรงด้วย Geotextile

สัญลักษณ์ (ต่อ)

$FS_P$	=	อัตราส่วนความปลอดภัยกรณีที่มีการเสริมแรงด้วยเสาเข็ม
$f$	=	อัตราส่วนหน่วยแรงเริ่มต้น
$H_d$	=	Drain Path
$H_u, P_{ult}$	=	แรงกระทำด้านข้างสูงสุด
$I$	=	ค่าแฟกเตอร์สำหรับหาค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในมวลดินจากแรงกระทำแบบคันดินถม
$I_p$	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของฐานราก สำหรับการประมาณการทรุดตัว
$I_{st1}, I_{st2}$	=	ค่าแฟกเตอร์สำหรับหาค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในมวลดินจากแรงกระทำแบบแผ่สม้าเสมอ (Poulos, 1967)
$K_o$	=	Coefficient of earth pressure at rest
$k_h, k_v$	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน
$k_1$	=	ค่า Subgrade Reaction
$L$	=	ระยะความยาวฝังจมของเสาเข็ม
$M_R$	=	โมเมนต์ของแรงต้านทาน
$M_G$	=	โมเมนต์ของแรงต้านทานเนื่องจาก แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile)
$M_B$	=	โมเมนต์ของแรงต้านทานเนื่องจาก ไม้ไผ่ (Bamboo)
$M_P$	=	โมเมนต์ของแรงต้านทานเนื่องจาก เสาเข็มไม้
$M_D$	=	โมเมนต์ของแรงกระทำ
$M_T$	=	โมเมนต์ต้านทานเนื่องจากการเสริมแรง
$m_v$	=	สัมประสิทธิ์การอัดตัวเชิงปริมาตร
$N_C$	=	Bearing Capacity Factor
$N_\phi$	=	สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง $= \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$
$q$	=	ขนาดหน่วยแรงกระทำภายนอก
$q_{ult}$	=	หน่วยแรงต้านทานสูงสุดของมวลดิน
$RR$	=	Recompression Ratio
$S_{uFV}$	=	ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบใบเนียน
$SR$	=	ค่าปรับแก้ผลของการเกิดการวิบัติเป็นจุดๆ
$S_B$	=	ระยะห่างของไม้ไผ่ระหว่างศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง
$T$	=	แรงต้านเนื่องจากเสาเข็ม
$T_i$	=	หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของแผ่นใยสังเคราะห์