

การศึกษาการใช้เสาเข็มหิน ในการปรับปรุงเสถียรภาพ
และการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อน

นาย วีรศักดิ์ พันเสวีวงศ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-636-119-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A STUDY OF USING GRANULAR PILES FOR
IMPROVING THE STABILITY AND SETTLEMENT OF SOFT CLAY**

MR. WEERASAK PANSAREEWONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

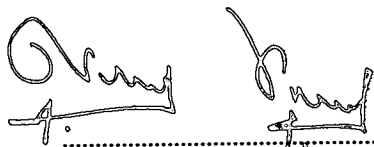
Chulalongkorn University

Academic Year 1996

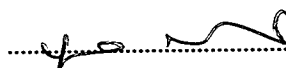
ISBN 974-636-119-8

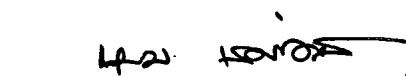
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการใช้เสาเข็มหิน ในการปรับปรุงเสถียรภาพและการทรุดตัว
 ของดินเหนียวอ่อน
โดย นายวีรศักดิ์ พันเสวีวงศ์
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงค์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์

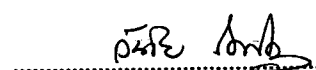
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

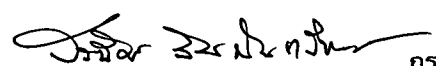

..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นพ. สุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพล จิวาลักษณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงค์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์)

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิจัยวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

วีรศักดิ์ พันเสวีวงศ์ : การศึกษาการใช้เสาเข็มหินในการปรับปรุงเสถียรภาพและการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อน (A Study of Using Granular Piles for Improving the Stability and Settlement of Soft Clay) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.วันชัย เทพรักษ์, 96 หน้า. ISBN 974-636-119-8

การวิจัยนี้ มีจุดประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้เสาเข็มหิน (Stone Columns) ปรับปรุงเสถียรภาพและการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อน ในการก่อสร้างคันดินป้องกันน้ำท่วมบริเวณ จังหวัดสมุทรปราการฝั่งตะวันออก (บางปู) ขั้นตอนการก่อสร้างในชั้นแรก ได้ทำการถมดินรองพื้นลูกรัง (Plat Form) ลึกประมาณ 5.5 เมตร เพื่อให้รถบรรทุกและเครื่องจักรที่ก่อสร้างเสาเข็มหินสามารถเข้าไปทำงานได้ แล้วจึงทำการก่อสร้างคันดินด้วยดินลูกรัง จนถึงระดับ +1.50 เมตร จากนั้นจึงทำการติดตั้งเสาเข็มหินจนถึงระดับความลึก -10.00 เมตร และทำการถมดินคันทางหนา 60 เซนติเมตร (ชั้นละ 20 เซนติเมตร) ชั้นรองพื้นทางหนา 20 เซนติเมตร และผิวทางลูกรังหนา 20 เซนติเมตร ตามลำดับ จนถึงระดับ +2.50 เมตร

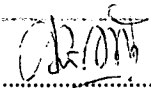
การวิเคราะห์การทรุดตัวกรณีก่อสร้างคันดินดังกล่าว พบว่าการทรุดตัวแบบอันเดรน มีค่าเท่ากับ 33.6 เซนติเมตร และการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำรวมมีค่าเท่ากับ 52 เซนติเมตร ในขณะที่การวิเคราะห์ค่าเสถียรภาพความปลอดภัย พบว่ากรณีก่อสร้างคันดินบนดินเดิม จะได้ค่าเสถียรภาพความปลอดภัยต่ำสุดเท่ากับ 0.92 และมีค่าเท่ากับ 1.50 เมื่อทำการก่อสร้างคันดินบนฐานรากดินถมรองพื้นลูกรัง (Plat Form) และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.71 เมื่อมีการติดตั้งเสาเข็มหิน ส่วนการคาดคะเนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเหนียวอ่อน กรณีพิจารณาจากค่าอัตราส่วนสูงสุดระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในมวลดิน ต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรน (f_{max}) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง เท่ากับ 0.87 เมตร ในขณะที่พิจารณาจากความสูงคันดิน (ΔH) และค่าเสถียรภาพความปลอดภัยต่ำสุด (F_{Smin}) จะได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง เท่ากับ 0.90 เมตร และ 0.73 เมตร ตามลำดับ


จากข้อมูลในสนามที่ค่อนข้างจำกัด พบว่าการประยุกต์ใช้เสาเข็มหิน (Stone Columns) ในการปรับปรุงเสถียรภาพและการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนไม่เหมาะสม ทั้งนี้เป็นเพราะไม่สามารถก่อสร้างเสาเข็มหินให้มีขนาดและรูปแบบตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่าเสถียรภาพความปลอดภัยของคันดินจะเป็นผลมาจากการถมดินรองพื้นคันดิน (Plat Form) มากกว่าการใช้เสาเข็มหิน ในขณะที่การติดตั้งเสาเข็มหินจะทำให้เสถียรภาพความปลอดภัยของคันดินเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย


ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิสิต 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

C615401 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : STABILITY / SETTLEMENT / LATERAL DEFORMATION / SOFT CLAY / STONE COLUMN / EMBANKMENT LOADING

WEERASAK PANSAREEWONG : A STUDY OF USING GRANULAR PILES FOR IMPROVING THE STABILITY AND SETTLEMENT OF SOFT CLAY. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. BOONSOM LERDHIRUNWONG, Dr.Ing., THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. WANCHAI TEPARAKSA, D.Eng. 96 pp. ISBN 974-636-119-8

This study was conducted to evaluate the suitability of stone columns in improving stability and settlement of the embankment constructed on soft clay. The embankment for flood protection propose was located in the east of Samutprakarn province (Bangpu). The first step was the construction of a 5.5 m. thick plat form (lateritic soils) over the existing ground, allowing trucks and machines to be moved into the working area. The lateritic embankment was then constructed on the plat form to 1.5 m. in height followed by the execution of stone columns which were construction down to -10.00 m. The 60 cm. subbase course (20 cm. in each layer), 20 cm. base course and 20 cm. lateritic surface were consequently constructed until the embankment reached a total height of 2.5 m.

The analysis revealed that undrained settlement was 33.6 cm. and consolidation settlement was 52 cm. It is found that the embankment constructed on the existing ground had the lowest factor of safety, equal to 0.92. This value will become 1.5 and 1.71 in case of constructing the embankment on the plat form, and plat form with stone columns, respectively. Considering the highest ratio of shear strength incurred in soil mass to undrained shear strength, the lateral movement was estimated at 0.87 m. This value will be 0.90 m. and 0.73 m. if estimated based on the embankment height and lowest slope stability safety factor value, respectively.


Due to limited information obtained from field experiment, the study revealed that stone columns are not suitable to improve the stability and settlement of soft clay under embankment loading. Since it is difficult to construct stone columns to conform with the desired size and shape. It was concluded that slope stability of the embankment is mainly due to the plat form construction while the provision of stone columns will have a secondary impact by further increasingly the stability.

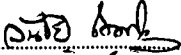
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิสิต 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 



กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำ ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพักษ์ ที่ได้แนะนำให้คำปรึกษาสำหรับการเตรียมการเสนอวิทยานิพนธ์และตรวจแก้วิทยานิพนธ์ตลอดจนคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเป็นรูปเล่ม รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่เคยอบรมสั่งสอนให้ความรู้มาจนถึงทุกวันนี้

ในการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ทั้งทางด้านคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินและผลการทดสอบที่บันทึกได้จากการทดสอบภาคสนาม ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมโยธาธิการ กระทรวงมหาดไทย ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย และวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วยความช่วยเหลือของ คุณพรยศ เทียนทอง คุณพวงนา สืบจากสิงห์ และคุณวรลักษณ์ วิศวะชัยวัฒน์ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุด ผู้เขียนปรารถนาที่จะขอแสดงความรำลึกถึงพระคุณของบิดาและมารดา ที่ได้ให้ความสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้เขียนมาตลอด พร้อมทั้ง พี่ ๆ น้อง ๆ และเพื่อนๆ จนสำเร็จการศึกษาในระดับนี้

วิรัชศักดิ์ พันเสวีวงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
รายการตารางประกอบ.....	ฎ
รายการรูปประกอบ.....	ฏ
สัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำเรื่องทั่วไป.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและทบทวนงานในอดีต.....	3
2.1 ทั่วไป.....	3
2.2 กลไกการพังทลาย (Failure Mechanisms).....	4
2.2.1 กลไกการพังทลายของเสาเข็มเดี่ยว.....	4
2.2.2 กลไกการพังทลายของเสาเข็มกลุ่ม.....	4
2.3 ระยะห่าง, ขนาด, การจัดเตรียมเสาเข็ม.....	5
2.4 ความสัมพันธ์เบื้องต้น.....	5
2.4.1 Unit Cell Concept.....	5
2.4.2 อัตราการแทนที่พื้นที่ (Area Replacement Ratio).....	6
2.4.3 การขยายตัวของ Unit Cell (Extended Unit Cell).....	7

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4 Stress Concentration	7
2.5 การวิเคราะห์การทรุดตัวของชั้นดิน.....	8
2.5.1 ทั่วไป.....	8
2.5.2 การประมาณการทรุดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัว.....	11
2.5.2.1 การทรุดตัวแบบทันทีทันใดหรือแบบอันเดรน.....	12
2.5.2.2 การยุบอัดตัวครั้งแรก (Primary Consolidation).....	13
2.5.2.3 การยุบตัวครั้งที่สอง (Secondary Consolidation).....	14
2.6 อัตราการทรุดตัวแบบ Consolidation เบื้องต้น.....	15
2.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินกรณีที่มีและไม่มีเสาเข็ม.....	16
2.7.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินกรณีที่มีเสาเข็มหิน.....	16
2.7.1.1 วิธี Profile	17
2.7.1.2 วิธีค่าเฉลี่ย Shear Strength.....	17
2.7.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินกรณีที่ไม่มีเสาเข็มหิน.....	19
2.7.2.1 โดยใช้โปรแกรม Stable.....	19
2.7.2.2 วิธี Swedish หรือ วิธี Fellenius.....	20
2.7.2.3 วิธีของ Bishop.....	21
2.8 การคาดคะเนการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินเหนียวอ่อนเนื่องจากน้ำหนัก คันดิน	22
2.8.1 การเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์กับการทรุดตัว (Rhv).....	22
2.8.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rhv กับ f_{max}	22
2.8.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rhv กับความสูงของคันทาง.....	22
2.8.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rhv กับเสถียรภาพความลาดชัน ของคันทาง.....	23
2.9 การกระจายของหน่วยแรงในมวลดิน (Stress Distribution in the Soil Mass)	23
2.10 กำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรน (Undrained Shear Strength).....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3	
การทดสอบการวิจัย.....	25
3.1 การเจาะสำรวจชั้นดินและการทดสอบหาคคุณสมบัติของชั้นดิน.....	25
3.1.1 การเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ.....	25
3.1.2 การทดสอบ Field Vane Shear.....	26
3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติดัชนีโดยทั่วไป (General Index Properties Tests).....	26
3.1.4 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test).....	26
3.2 การทดสอบวัสดุที่ใช้ในการทำเสาเข็มหินและก่อสร้างคันดิน.....	27
3.2.1 การทดสอบการวิเคราะห์ Grain Size ของวัสดุที่ใช้ทำ เสาเข็มหินและก่อสร้างคันดิน	27
3.2.2 การทดสอบ Direct Shear Tests ของวัสดุที่ใช้ทำคันดิน	27
3.3 รายละเอียดสำหรับการทำเสาเข็มหิน (Stone Column)	27
3.3.1 ผังแสดงการติดตั้งเสาเข็มหิน.....	27
3.3.2 วัสดุที่ใช้ทำเสาเข็มหิน	27
3.4 การจัดเตรียมคันดินก่อนและหลังการติดตั้งเสาเข็มหิน	28
3.5 เครื่องมือและวิธีการก่อสร้าง.....	28
3.6 ปัญหาและอุปสรรคในการก่อสร้าง.....	29
3.7 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบในระหว่างการก่อสร้างคันดิน.....	29
3.8 การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มหินและการวัดการทรุดตัว.....	30
3.8.1 การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มหิน.....	30
3.8.2 การวัดการทรุดตัว.....	31
บทที่ 4	
ผลของการทดสอบและวิเคราะห์	33
4.1 ผลของการเจาะสำรวจชั้นดินและคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน.....	33
4.1.1 ชั้นดินบริเวณจังหวัดสมุทรปราการฝั่งตะวันออก.....	33
4.1.2 คุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มหิน.....	34
4.3 ผลการทดสอบ Field Vane Shear.....	34
4.4 การคาดคะเนความลึกของดินถมใต้คันดิน.....	35
4.5 การคาดคะเนการทรุดตัว.....	36
4.6 อัตราการทรุดตัว.....	36
4.7 ผลจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดิน.....	37
4.7.1 กรณีก่อสร้างคันดินบนดินเดิม.....	37
4.7.2 กรณีก่อสร้างคันดินบนดินถมโดยไม่มีเสาเข็มหิน.....	37
4.7.3 กรณีก่อสร้างคันดินบนดินถมที่มีเสาเข็มหิน.....	37
4.8 การคาดคะเนการเคลื่อนตัวด้านข้าง.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	39
5.1 บทสรุป.....	39
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยขั้นต่อไป.....	40
เอกสารอ้างอิง.....	41
ประวัติผู้เขียน.....	96

รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่า E_u/S_u (2) สำหรับดินเหนียว (DM-7)	43
3.1	แสดงขนาดผลของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็มหิน	44
3.2	แสดงค่าระดับดินเดิมเฉลี่ยของแนวคันดินที่ระยะทางต่าง ๆ	45
3.3	แสดงค่าการทรุดตัวจากการทดสอบที่ตำแหน่งของคันดินต่าง ๆ	46
4.1	คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของชั้นดินบริเวณสมุทรปราการฝั่งตะวันออก	48
4.2	การคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธีปฏิรูปกลศาสตร์พื้นฐาน	49
4.3	แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ	50
4.4	แสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพความปลอดภัยของคันดิน	51
4.5	แสดงการคำนวณหาค่าอัตราส่วนสูงสุดระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในมวลดิน ต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรน (f_{max}) ที่ระดับความลึกต่าง ๆ	51
4.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (R_{hv}) และพารามิเตอร์ต่าง ๆ	52

รายการประกอบ

รูปที่	หน้า	
1.1	พื้นที่จังหวัดสมุทรปราการฝั่งตะวันออก	53
1.2	พื้นที่บรรเทา	54
1.3	แสดงแนวดินกั้นน้ำที่ใช้เสาเข็มหิน	55
2.1	Failure Mechanisms of a Single Granular Pile (After HUGHES, 1974)	56
2.2	Different Type Loadings Applied to Granular Pile (After BARKSDALE and BACHUS, 1983)	56
2.3	Displacement Vectors for Single Granular Pile Loaded by Rigid Square Plate (After BARKSDALE and BACHUS, 1983)	57
2.4	Failure Modes of Granular Pile Groups (After VAUTRAIN, 1977)	57
2.5	Pile Arrangement Showing the Domain of Influence of Column (After BALAAM, 1976)	58
2.6	Unit Cell Idealization (After BARKSDALE and BACHUS, 1983)	58
2.7	แสดงการหาค่า Influence Factor สำหรับการคาดคะเนการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวด้านข้างของขอบของ Load Area (POULOS, 1967 B)	59
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง Settlement Ratio กับ Applied Stress Ratio สำหรับ Strip Load กระทบบน Isotropic Homogeneous Foundation (จาก D'APPOLONIA ET AL., 1971)	60
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Shear Stress กับ Overconsolidation Ratio (จาก D'APPOLONIA ET AL., 1971)	61
2.10	แสดงวิธี 2:1 โดยประมาณในการหาค่า Stress ที่เพิ่มขึ้นใต้คันดิน	62
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta u / \Delta \sigma_v$ และ OCR จาก LEE (1983)	63
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง Settlement Ratio กับ OCR (LEONARDS, 1976)	63
2.13	องค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการทรุดตัวครั้งที่สอง (Secondary Compression), (LADD, 1975)	64
2.14	วิธีการคำนวณการทรุดตัวครั้งที่สอง (Secondary compression)	65

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15 อัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ (Consolidation) สำหรับการระบายน้ำในแนวตั้ง (Vertical Drainage)	66
2.16 ตัวประกอบของเวลา (T_{2D}) กับเปอร์เซ็นต์การอัดตัวคายน้ (U) สำหรับการอัดตัวคายน้ในลักษณะ 2 มิติ (Plane Strain Consolidation) โดยมีทางระบายน้ำ 2 ทิศทาง และความความซึมน้ำได้ (k) มีค่าเท่ากันทุกทิศทาง (LACASSE ET AL., 1975)	66
2.17 ตัวประกอบ α กับอัตราส่วนของค่าความซึมน้ำได้ (Permeability Ratio) สำหรับการอัดตัวคายน้ 2 มิติ ที่ U = 10% และ 30% (LACASSE ET AL., 1975)	67
2.18 ตัวประกอบ α กับอัตราส่วนของค่าความซึมน้ำได้ (Permeability Ratio) สำหรับการอัดตัวคายน้ 2 มิติ ที่ U = 50% และ 70% และ 80% (LACASSE ET AL., 1975)	68
2.19 Slope Stability Analysis Stone Column Strip Idealization and Fictitious Soil Layer (After BARKSDALE and BACHUS, 1983)	69
2.20 Notation Used in Average Stress Method Stability Analysis (After BARKSDALE and BACHUS, 1983)	69
2.21 แสดงการแบ่งชั้นมวลดิน และระบบของแรงที่กระทำต่อแต่ละชั้นมวลดิน	70
2.22 แสดงการหาค่า Stress Influence Factor (POULOS, 1967 B)	71
2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bjerrum's Correction Factor กับค่า Plasticity Index ได้มาจากการทำ Embankment Failures (LADD, 1975)	72
3.1 แสดงตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจดินบริเวณที่จะทำการก่อสร้างเสาเข็มหิน	73
3.2 แสดงผังการติดตั้งเสาเข็มหิน	74
3.3 ภาพตัด (A-A) แสดงภาพตัดตามขวางการติดตั้งเสาเข็มหิน	75
3.4 ภาพตัด (B-B) แสดงภาพตัดตามยาวการติดตั้งเสาเข็มหิน	76
3.5 แสดงการบันทึกการติดตั้งเสาเข็มหิน	77

รายการประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.6	แสดงขั้นตอนการติดตั้งเสาเข็มหิน	78
3.7	แสดงรูปแบบ Typical Section โดยทั่วไปของคันดินถมและ Plat Form	79
3.8	แสดงการติดตั้ง Settlement Plate และลักษณะการทรุดตัวของคันดิน	80
3.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load vs Settlement จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม	81
3.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load vs Time จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม	82
3.11	แสดงการถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกบนคันดิน	83
4.1	แสดงภาพตัดขวางของชั้นดินบริเวณที่จะทำการก่อสร้างเสาเข็มหิน	84
4.2	แสดงผลการวิเคราะห์โดยการร่อนผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve Analysis)	85
4.3 ก.	แสดงค่าเฉลี่ยคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนบริเวณจังหวัดสมุทรปราการฝั่งตะวันออก (บางปู) จากการทดสอบ 13 หลุม	86
4.3 ข.	แสดงค่าเฉลี่ยคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนบริเวณจังหวัดสมุทรปราการฝั่งตะวันออก (บางปู) จากการทดสอบ 13 หลุม	87
4.4	แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ที่เกิดจากคันดินถมกับ Shear Strength ของดินเดิม	88
4.5	แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ที่เกิดจากคันดินถมบวกน้ำหนักที่เกิดจากรถบรรทุก กับ Shear Strength ของดินเดิม	89
4.6	แสดง Typical Section ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์การทรุดตัวและเสถียรภาพของคันดิน	90
4.7	การคาดคะเนอัตราการทรุดตัว	91
4.8	แสดงค่าพารามิเตอร์และหาค่า FS min. ของดินเดิม	92
4.9	แสดงค่าพารามิเตอร์และค่า FS min. ของดินก่อนติดตั้งเสาเข็มหิน	93
4.10	แสดงค่าพารามิเตอร์และค่า FS min. โดยวิธี Profile	94
4.11	แสดงค่าพารามิเตอร์และค่า FS min. โดยวิธีค่าเฉลี่ย Shear Strength	95

สัญลักษณ์

a_s	= อัตราการแทนที่พื้นที่ (Area Replacement Ratio)
A	= พารามิเตอร์สำหรับความดันน้ำในโพรง (Pore Water Pressure Parameter)
A_s	= พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มหลังการบดอัด
A_c	= พื้นที่ของดินรอบ ๆ เสาเข็ม
C_c	= Compression Index
C_v	= สัมประสิทธิ์การยุบตัวในแนวดิ่ง เนื่องจากการไหลของน้ำในแนวดิ่ง
C_r	= สัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวในแนวดิ่ง เนื่องจากการไหลของน้ำในแนวรัศมี
D_o	= เส้นผ่าศูนย์กลางประสิทธิผล (Effective Diameter)
e	= อัตราส่วนของช่องว่างในมวลดิน (Void Ratio)
e_o	= อัตราส่วนของช่องว่างในมวลดิน เมื่อเริ่มต้น (Initial Void Ratio)
Δe_i	= อัตราส่วนของช่องว่างของมวลดินที่เปลี่ยนไปของแต่ละชั้น
<hr/>	
H	= ความหนาของชั้นดินที่พิจารณา
H_c	= ความหนาของชั้นดินที่พิจารณาว่าเกิดการยุบอัดตัว
ΔH_i	= ความหนาของชั้นดินแต่ละชั้น
k	= สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Coefficient of Permeability)
k_h	= สัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในมวลดินตามแนวราบ
k_v	= สัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในมวลดินตามแนวดิ่ง
k_s	= สัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำ ของเขต Smear
k_o	= สัมประสิทธิ์ของแรงดันด้านข้าง ณ สภาวะสมดุลย์ (Coefficient of Earth Pressure at Rest)
n	= Stress Concentration Factor
OCR	= Over Consolidation Ratio
S	= ระยะห่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มหิน
t	= เวลาที่เกิดขึ้นในขบวนการยุบอัดตัว ในแต่ละขณะช่วงเวลา
T_v	= ตัวประกอบเวลา เป็นตัวประกอบอิสระไม่มีหน่วย
T_h, T_r	= Time Factor ของการยุบอัดตัวเนื่องจากการไหล

u	= ความดันโพรง (Pore Pressure)
u_0	= ความดันโพรงเมื่อเริ่มต้น (Initial Pore Pressure)
Δu	= ความดันโพรงเพิ่ม (Excess Pore Pressure)
U	= ดัชนีการยุบอัดตัวโดยเฉลี่ยที่รวมผลของการไหลของน้ำตามแนวตั้งและแนวราบ
U_r	= ดัชนีการยุบอัดตัวโดยเฉลี่ยที่เกิดจากการไหลของน้ำตามแนวราบ (รัศมี)
U_z	= ดัชนีการยุบอัดตัวโดยเฉลี่ยที่เกิดจากการไหลของน้ำตามแนวตั้ง
x	= มิติในแกนราบ x
y	= มิติในแกนราบ y
z	= มิติในแกนตั้ง z
γ	= หน่วยน้ำหนักของน้ำ (Unit Weight)
ϵ_v	= ความเครียดตามแนวตั้ง
ρ_i	= การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีเมื่อดินรับน้ำหนัก (Immediate Settlement)
ρ_t	= การทรุดตัวที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา (Time Dependent Settlement)
ρ_u	= การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในลักษณะ Undrained Local Yield
ρ_c	= การทรุดตัวเนื่องจากขบวนการยุบอัดตัว (Consolidation Settlement)
$\Delta\rho_c$	= การทรุดตัวเนื่องจากขบวนการยุบอัดตัวในแต่ละชั้นดิน
ρ_s	= การทรุดตัวเนื่องจากผลของ Secondary Compression
ρ_T	= การทรุดตัวรวมทั้งหมด (Total Settlement)
ρ_{strip}	= อัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกเป็นพื้นที่แถบยาว
ρ_{circle}	= อัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกเป็นพื้นที่วงกลม
σ'_v	= ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical Effective Stress)
σ'_c	= ความเค้นประสิทธิผลก่อนเกิดการยุบอัดตัว (Preconsolidation Stress)
$\Delta\sigma'_i$	= ความเค้นที่เพิ่มขึ้นที่กึ่งกลางของแต่ละชั้นดิน เนื่องจากมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำ
$\Delta\sigma'_v$	= ความเค้นตามแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น
$\Delta\sigma'_3$	= ความเค้นตามแนวแกนรองที่เพิ่มขึ้น

- σ_s = Stress ในเสาเข็มหิน
- σ_c = Stress ในดินบริเวณรอบ ๆ
- μ_c = Stress ในดินเหนียว
- μ_s = Stress ในเสาเข็มหิน