

การวิเคราะห์เสถียรภาพและการคาดคะเนการทรุดตัวของถนนต่อเติมใหม่
บนชั้นดินเหนียวอ่อนมาก



นาย พิณล ธรรมธรรสิริ

ศูนย์วิทยพัทธยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

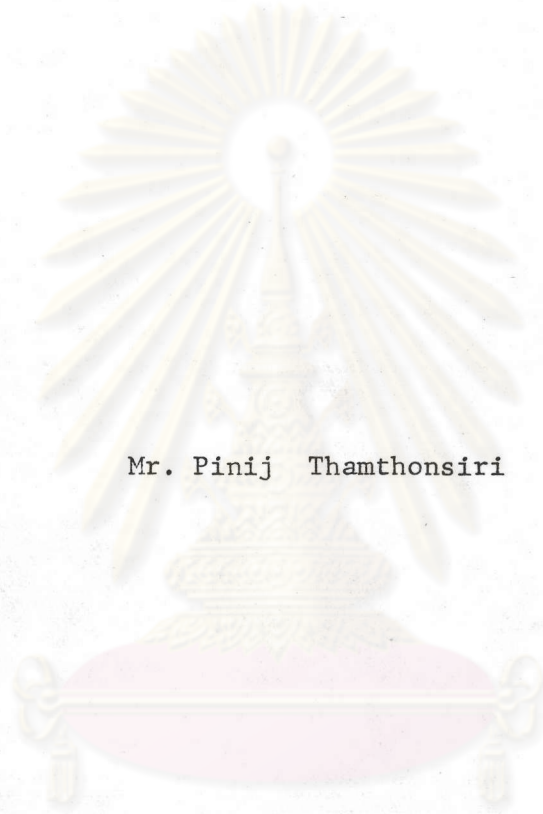
พ.ศ. 2528

ISBN 974-564-815-9

009350

116624595.

STABILITY ANALYSIS AND SETTLEMENT PREDICTION
OF THE RECONSTRUCTION ROAD ON THE VERY SOFT CLAY



Mr. Piniij Thamthonsiri

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1985

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการคาดคะเนการทรุดตัวของถนนต่อ
เดือใหม่ บนชั้นดินเหนียวอ่อนมาก

โดย

นาย พินิจ ธรรมธรรสิริ

ภาควิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้มหาวิทยาลัย อนุมัติให้มหาวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

[Signature]
.....คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

[Signature]
.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วิเชียร เต็งอำนวย)

[Signature]
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญส่ง เลิศศิริวงศ์)

[Signature]
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์)

[Signature]
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวี ธนะเจริญกิจ)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เสถียรภาพและการคาดคะเนการทรุดตัวของถนนต่อ เดิมนใหม่ บนชั้นดินเหนียวอ่อนมาก
ชื่อผู้ผลิต	นาย พินิจ ธรรมธรรลริ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยค้ำสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์ราษฎร์
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2528

บทคัดย่อ



ปัญหาทางด้านเสถียรภาพ และการทรุดตัวที่มากเกินไป เป็นสิ่งพึงระวังสำหรับการ
ออกแบบ และการก่อสร้างคันทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสิ่งก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนมาก
การวิจัยครั้งนี้มีเพื่อศึกษาเกี่ยวกับ การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการคาดคะเนการทรุดตัวของ
ถนนต่อเดิมนใหม่ ที่ก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนมาก บริเวณ กม.30 บางนา-บางปะกง และถูก
ออกแบบด้วยพิภพความปลอดภัยค่อนข้างต่ำ การศึกษายังครอบคลุมไปถึงการคาดคะเนค่าความ-
ดันน้ำโพรงเพิ่ม ที่ได้กึ่งกลางของคันทาง

ในการวิจัยนี้ปัญหาแรกที่น่าสนใจก็คือ ปัญหาทางด้านเสถียรภาพ ผู้วิจัยได้ทำการทด-
สอบ field vane shear ในสนาม เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอน ส่วน
Bjerrum's correction factor ได้อาศัยค่าจากข้อมูลเก่าที่ได้ทำการวิเคราะห์แล้วของ
Eide & Holmberg (1972) โดยวิธีการของ Bjerrum ทำให้สามารถที่จะปรับแก้ค่ากำลัง
รับแรงเฉือนจากการทดสอบ field vane shear และการวิจัยพบว่าการวิเคราะห์เสถียร-
ภาพแบบนี้สามารถนำมาใช้กับถนนต่อเดิมนใหม่ได้

ปัญหาที่สองของการออกแบบคันทางที่วางบนชั้นดินเหนียวอ่อนมาก คือ การทรุดตัวที่กึ่ง
กลางของถนนต่อเดิมนใหม่ ได้ทำการคาดคะเนโดยวิธี stress path โดยใช้การทดลองไตร-
แอกเซียล วิธีปฏิสัมพันธ์ค่าสเตรพื้นฐาน (D' Appolonia et al., 1971; Skempton &
Bjerrum, 1957) และวิธีไฟไนท์เอลลิเมนต์ เพื่อหาค่าการทรุดตัวทั้งในสภาพอันเดรอน และ
การอัดตัวคายน้ำ ข้อมูลการทรุดตัว และความดันน้ำโพรงเพิ่มที่วัดได้ในสนามได้ถูกนำมาใช้
ในการวิเคราะห์การทรุดตัว โดยอาศัยวิธีการของ Asaoka และวิธีการของ Skempton &

Bjerrum ตามลำดับ

ผลของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนความปลอดภัยของถนนต่อเดมิใหม่ในสภาพอันเดรน มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน (1.3) แต่ยังคงมากกว่า 1.0 ผลจากการปล่อยให้ฐานรากเกิดการอัดตัวคายน้ำ หลังจากแต่ละชั้นตอนของการก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนในสภาพ normally consolidated จะทำให้กำลังรับแรงเสียดทานของดินเหนียวอ่อนมาก มีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรง-ประสิทธิผลในดินอ่อน และอาศัยข้อมูลความดันน้ำโพรงเพิ่มที่วัดได้ เชื่อว่าเสถียรภาพของถนนต่อเดมิใหม่ ยังคงอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย

จากการทดสอบ Stress-path พบว่า ผลของการเกิดอันเดรนครีฟ และ yield ในระหว่างการทดลอง จะทำให้ค่าการทรุดตัวแบบอันเดรนที่คำนวณได้มีค่ามากเกินไป อันที่จริงขณะที่การก่อสร้างถนนต่อเดมิใหม่กระทำเป็นชั้น ๆ ได้ปล่อยให้เกิดขบวนการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนมาก หลังจากการถมถนนแต่ละครั้ง แต่ค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มไม่ได้แสดงพฤติกรรมดังกล่าว ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ผลที่เกิดขึ้นจริงต่างจากค่าที่คาดคะเนไว้ ด้วยขั้นตอนการก่อสร้างดังกล่าวจะทำให้สลิปเฟนส์ และกำลังรับแรงเสียดทานของดินเหนียวอ่อนมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น การทรุดตัวที่สำรวจได้ในสภาพอันเดรน จึงมีค่าไม่มาก แม้ว่าจากข้อมูลสำรวจในภาคสนามไม่ได้แสดงให้เห็นว่าความดันน้ำโพรงเพิ่มมีค่าลดลงเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำ การคงที่ของค่าความดันน้ำ แสดงว่ามีการทดแทนกันระหว่างการลดลงของความดันน้ำโพรงเพิ่มเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ และการเกิดความดันน้ำโพรงเพิ่มเนื่องจากการอันเดรนครีฟ ค่าการทรุดตัวในสภาพอันเดรนวิเคราะห์ โดยวิธีไฟไนท์เอลลิเมนต์ได้ค่าต่ำ แต่วิธีปฏิสัมพันธ์ค่าลัทธิพื้นฐานจะให้ค่าที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับข้อมูลที่วัดได้ในสนาม

เนื่องจากข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้ในสนามไม่เพียงพอ ฉะนั้นการคาดคะเนการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำโดยวิธีของ Asaoka เป็นวิธีที่ให้ค่าต่อน้ำเชื่อถือที่สุด การคาดคะเนการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ โดยวิธี Stress-path วิธีปฏิสัมพันธ์ค่าลัทธิพื้นฐาน และวิธีไฟไนท์เอลลิเมนต์ จะให้ค่ามากกว่าวิธีของ Asaoka ประมาณ 5-7% ส่วนวิธีของ Skempton & Bjerrum โดยการใช้ค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มที่วัดได้ในสนาม จะให้ค่าการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ น้อยกว่าวิธีของ Asaoka ประมาณ 30%

สำหรับค่าการคาดคะเนที่นำเชื่อถือ ประหยัดค่าใช้จ่าย และด้วยวิธีการแบบง่าย ๆ
การคาดคะเนการทรุดตัว โดยวิธีปฏิรูปกลค่าลัทรันพื้นฐาน (D' Appolonia et al., 1971;
Skempton & Bjerrum, 1957) น่าจะเหมาะสมที่สุด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title Stability Analysis and Settlement Prediction of The
 Reconstruction Road on The Very Soft Clay

Name Mr. Piniij Thamthonsiri

Thesis Advisor Assistant Professor Surachat Samphandharaksa, Sc.D.

Department Civil Engineering

Academic Year 1985

ABSTRACT

The problems of stability and excessive settlement are very important for design and construction of embankment especially when the foundation soil is the very soft clay. The study in this thesis was conducted on the stability analysis and settlement prediction of the reconstruction road, designed with low safety factor, built on the very soft clay located at km. 30 Bang Na-Bang Pakong. Study was also extended to predict the excess pore water pressure under the center line of the embankment.

The first problem to be considered in this research is the stability problem. Field vane shear tests and data obtained from well documented case histories (Eide & Holmberg, 1972) were employed for finding the undrained shear strength and Bjerrum's correction factor respectively. Using Bjerrum's method, as illustrated by numerous unexpected failures, it was possible to adopt FV strength for stability analysis of the reconstruction road.

The second problem of embankment design on the very soft clay is settlement. The settlements at the center line of the reconstruction road were predicted by stress path method using triaxial test, conventional method (D' Appolonia et al., 1971; Skempton and Bjerrum,

1957) and finite element method for undrained and consolidation settlement. The available settlement record and field excess pore water pressure were also analysed by Asaoka's and Skempton & Bjerrum's method respectively.

The result of stability analysis indicated that the safety factor of the reconstruction road in undrained condition was smaller than the standard value (1.3) but still greater than 1.0. Due to allowing a sufficient consolidation of the foundation after each stage of construction on this normally consolidated clay deposit, in this way the shear strength of the very soft clay is progressively increased as a result of the increasing effective stress in the soft clay due to consolidation. And based on available record of the excess pore water pressure, it is thought that the reconstruction road is still safe.

Undrained creep and yielding occurred during the stress path tests yielded the excessive computation of undrained settlement. Actually, while the reconstructed road was proceeded in stages, the consolidation of the very soft clay was allowed to take place after each stage of construction but excess pore pressure does not show that behaviour. This may cause some difference to the predicted results. Based on the stage of construction as described above, the increase in the stiffness and shear strength of the very soft clay, the less in-situ undrained settlement was observed. Although field observation does not indicate the dissipation of pore pressure due to consolidation process, the constant pore pressure value shows the compensation between the dissipation of pore pressure due to consolidation and the development of excess pore pressure from undrained creep

process. The undrained settlement obtained by finite element method was low but the conventional method gave the higher value with respect to the field record.

Because of insufficient settlement records, the consolidation settlement predicted by Asaoka's method is considered to be the most reasonable value. The methods by stress-path, conventional and finite element gave 5-7% higher than Asaoka's. The Skempton & Bjerrum's method, using the field excess pore water pressures was about 30% lower than Asaoka's.

For the reliable predicted value, economic and simplicity procedure, the prediction of settlement by conventional method (D' Appolonia et al., 1971; Skempton & Bjerrum, 1957) would be the most appropriate.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ



การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ สัมพันธ์ราษฎร์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง ตรวจสอบ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงศ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องวิจัย ตลอดจนคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้ความกรุณาตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จด้วยดี

อนึ่ง การวิจัยนี้สัมฤทธิ์ผลได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือของการปิโตรเลียม แห่งประเทศไทย ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุน แก่ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการทำการศึกษา เรื่อง "ผลกระทบอันจะมีต่อแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติดิบบนบก" ผู้เขียนขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ มุลนิธินิสิตเก่าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์ทุนเพื่อการวิจัย

ผู้เขียนระลึกถึงพระคุณของบิดา และมารดา ครู และอาจารย์ ท่านผู้มีพระคุณเหล่านี้ ได้ช่วยให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในการศึกษาจนถึงปัจจุบัน

ท้ายสุดนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อน ๆ ทุกท่าน ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องวิจัย ปฏิบัติการศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความร่วมมือ และช่วยเหลือเป็นอย่างดี จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

นาย พิณล ธรรมธรรสิริ

สารบัญ



	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ญ
สารบัญ.....	ฉ
รายการตารางประกอบ.....	ด
รายการรูปประกอบ.....	ต
สัญลักษณ์.....	น
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 คำนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ของการวิจัย.....	4
2. ทฤษฎี และผลงานในอดีต.....	5
2.1 แนวความคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการทรุดตัวของชั้นดิน.....	5
2.2 การคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธีปฏิสัมพันธ์ค่าลึกรพื้นฐาน (Conventional Method).....	6
2.2.1 การทรุดตัวแบบทันทีทันใดหรือแบบอันเดรน (Immediate or Undrained Settlement, ρ_i).....	6
2.2.2 การยุบอัดตัวครั้งแรก (Primary Consolidation, ρ_c).....	8
2.2.3 การยุบตัวครั้งที่สอง (Secundary Consolidation, ρ_s).....	12
2.2.4 อัตราการทรุดตัว (Rate of Consolidation).....	16
2.3 การคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธี stress path.....	23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

2.3.1	แนวความคิดเกี่ยวกับ stress path (Stress Path Concept).....	23
2.3.2	การคาดคะเนการทรุดตัว โดยใช้การทดลองจำลอง ระบบของหน่วยแรงรวมในสนาม (Procedure using Laboratory Tests to Duplicate Field Total Stress Path).....	28
2.4	การคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธีไฟไนท์เอลลิเมนต์ (Finite Element).....	29
2.5	สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง ณ สภาวะสัมมูลย์ (Coefficient of Earth Pressure at Rest, K_0)	31
2.6	การกระจายของหน่วยแรงในมวลดิน (Stress Distribution in the Soil Mass)....	33
2.7	แรงดันน้ำโพรงเพิ่ม (Excess Pore Water Pressure, Δu).....	35
2.7.1	การคาดคะเนค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มโดยวิธีปฏิ- กัลค่าสูตรพื้นฐาน (Conventional Method).	35
2.7.2	การคาดคะเนความดันน้ำโพรงเพิ่มโดยวิธีของ Tavenas (1979).....	37
2.8	การวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทาง.....	40
2.8.1	กำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรน (Undrained Shear Strength, S_u).....	40
2.8.1.1	วิธีการของ Bjerrum.....	40
2.8.1.2	วิธีการแบบ SHANSEP.....	42
2.8.1.3	วิธีการแบบ USALS (Undrained Strength at Large Strain Method).....	42

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

2.8.2	วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทาง.....	43
2.8.2.1	วิธี Swedish หรือวิธี Fellenius	43
2.8.2.2	วิธีของ Bishop.....	45
3.	การทดลองการวิจัย.....	46
3.1	สถานที่ และวิธีการเก็บตัวอย่าง.....	47
3.1.1	สถานที่ทำการเก็บตัวอย่าง.....	47
3.1.2	วิธีการเก็บตัวอย่าง.....	47
3.2	การทดสอบ และการเก็บข้อมูลในสนาม.....	49
3.2.1	การทดสอบ field vane shear.....	49
3.2.2	การวัดความดันน้ำในโพรงดิน.....	52
3.2.3	การวัดการทรุดตัวของถนนในระหว่างการก่อสร้าง	52
3.3	การทดลองหาสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินที่เก็บมา.....	52
3.4	การทดลอง การอัดตัวคายน้ำ 1 มิติ (One-Dimension Consolidation Tests).....	58
3.4.1	การทดลองการอัดตัวคายน้ำ โดยการเพิ่มน้ำหนัก ที่เวลาที่จุดสิ้นสุดการยุบตัวครั้งแรก ซึ่งค่า t_{100} จะหาโดยวิธี Taylor.....	58
3.4.2	การทดลองการอัดตัวคายน้ำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 2435-65 T.....	58
3.5	การทดลองไตรแอกเซียล (Triaxial) จำลองระบบ ของหน่วยแรงในสนาม.....	58
3.6	การทดลองหาค่ารับแรงกดของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำแบบ Ko ด้วยเครื่องไตรแอกเซียลในสภาพไม่ระบายน้ำพร้อม ทั้งวัดค่าความดันน้ำในโพรงดิน (Ko-Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with Pore Pressure Measurement, \overline{CKoU} -TC Test)..	67

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

3.7	การทดลองหาค่ารับแรงกดของดิน ที่ไม่ถูกอัดตัวคายน้ำ ด้วยเครื่องไตรแอกเซียลในสภาพไม่ระบายน้ำ (Unconsolidated Undrained Triaxial Com- pression Test, UU Test).....	67
4.	ผลการทดลอง และการวิเคราะห์.....	69
4.1	ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม	69
4.1.1	ผลการทดลองหาลมดับพื้นฐานของดินอ่อน.....	69
4.1.2	ผลการทดลองการอัดตัวคายน้ำ 1 มิติ (1-Dimension Consolidation Tests).	76
4.1.2.1	การทดลองการอัดตัวคายน้ำ 1 มิติ ระยะเวลาการเพิ่มน้ำหนักเท่ากับ t_{100}	76
4.1.2.2	การทดลองการอัดตัวคายน้ำ 1 มิติ ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D2435-65T	78
4.1.3	ผลการทดลองไตรแอกเซียล (Triaxial Test Results).....	78
4.1.3.1	การทดลองหาค่ารับแรงกดของดิน ที่ไม่ถูกอัดตัวคายน้ำในสภาพไม่ระบาย น้ำ (UU Test).....	78
4.1.3.2	การทดลองหาค่ารับแรงกดของดินที่ ถูกอัดตัวคายน้ำ แบบ K_0 ในสภาพ อันตรน (Ko-Consolidated Undrained Triaxial Compres- sion Test with Pore Pressure Measurement, $\overline{CKoU-TC}$ Test)	81
4.1.3.3	การทดลองไตรแอกเซียล (Triaxial) จำลองระบบของหน่วยแรงในสนาม	86

ลํารับัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

4.1.4	ผลการทดสอบ field vane shear.....	97
4.2	เล็ถึยรภาพของคัันทาง.....	98
4.2.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เล็ถึยรภาพ..	98
4.2.2	การวิเคราะห์เล็ถึยรภาพของคัันทาง.....	99
4.3	ความดันน้ำโพรงเพิ่ม (Excess Pore Water Pressure, Δu).....	103
4.3.1	การคาดคะเนค่าความดันน้ำโพรงเพิ่ม.....	103
4.3.2	การเปรียบเทียบค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มที่คาด คะเนกับข้อมูลที่วัดได้ในสนาม.....	104
4.3.3	พารามิเตอร์ของความดันน้ำโพรงเพิ่ม (Pore Pressure Parameter).....	107
4.3.3.1	พารามิเตอร์ A ของ Skempton.	107
4.3.3.2	พารามิเตอร์ μ (Lee, 1983)..	107
4.4	การคาดคะเนการทรุดตัวของถนนต่อเติมใหม่.....	109
4.4.1	วิธีปลูฟักลค่าลัศตวรรษฐาน (Conventional Method).....	109
4.4.2	วิธี Stress path.....	111
4.4.3	วิธีไฟไนท์เอลลิเมนต์.....	113
4.4.4	วิธี Asaoka.....	113
4.4.5	วิธีการของ Skempton และ Bjerrum โดยใช้ ค่า Δu ที่วัดได้ในสนาม.....	116
4.4.6	การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่คาดคะเนได้...	116
4.5	อัตราการทรุดตัวของถนนต่อเติมใหม่.....	118
4.5.1	สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation, C_v).....	118
4.5.2	อัตราการทรุดตัวของถนนต่อเติมใหม่.....	120

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.5.3 การทรุดตัวครั้งที่สอง.....	120
5. สรุปผลการวิจัย และข้อ เสนอแนะ.....	125
5.1 เล็กีรภาพของถนนต่อเติมใหม่.....	125
5.1.1 กำลังรับแรงเสี้ยนแบบอันเดรน.....	125
5.1.2 เล็กีรภาพ และอัตราส่วนความปลอดภัยของถนน ต่อเติมใหม่.....	125
5.2 การคาดคะเนการทรุดตัวของถนนต่อเติมใหม่.....	126
5.2.1 พารามิเตอร์ของดินเหนียวอ่อน.....	126
5.2.2 การทรุดตัวแบบอันเดรน (Undrained Settlement, ρ_u).....	126
5.2.3 การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Settlement, ρ_c).....	127
5.2.4 การคาดคะเนอัตราการทรุดตัวของถนนต่อเติมใหม่	128
5.2.5 การยุบอัดตัวครั้งที่สอง.....	128
5.3 การคาดคะเนค่าความดันน้ำโพรงเพิ่ม.....	128
5.4 ข้อ เสนอแนะ.....	129
เอกสารอ้างอิง.....	130
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองของการทดสอบ consolidation.....	134
ประวัติผู้เขียน.....	148

รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
2.1	การคำนวณหาค่า Δu โดยวิธีปฏิสัมพันธ์ค่าลัตกรพื้นฐาน.....	37
3.1	แสดงปริมาณการเจาะสำรวจและการทดสอบดิน.....	68
4.1	สรุปผลการทดลองของดินอ่อนจากหลุม DB-1	70
4.2	สรุปผลการทดลองของดินอ่อนจากหลุม DB-2	71
4.3	แสดงผลการทดลองและการคาดคะเนการทรุดตัวจากการทดลองไตร - แอกเซียลจำลองหน่วยแรงในสนามในสภาพอันเดรน.....	87
4.4	แสดงผลการทดลอง และการคาดคะเนการทรุดตัวจากการทดลองไตร - แอกเซียลจำลองหน่วยแรงในสนามในสภาพอัดตัวคายน้ำ.....	88
4.5	แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในสภาพต่าง ๆ.....	102
4.6	แสดงผลการคาดคะเนค่าความดันน้ำโพรงเพิ่ม (Excess Pore Water Pressure) ใต้กึ่งกลางถนน.....	105
4.7	การคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธีปฏิสัมพันธ์ค่าลัตกรพื้นฐาน (Conventional Method).....	110
4.8	แสดงการเปรียบเทียบผลการคาดคะเนการทรุดตัวในสภาพอันเดรนกับ ข้อมูลที่วัดได้ในสนาม (ข้อมูลจาก Settlement Plate รูปที่ 3.7)	117
4.9	การเปรียบเทียบผลการคาดคะเนการทรุดตัวของถนนต่อเติมใหม่.....	119
4.10	แสดงค่า C_v เกลี่ยตลอดชั้นดินอ่อน.....	121
4.11	การคาดคะเนค่าการยุบตัวครั้งที่สอง โดยใช้ $t/t_{100} = 2$	123

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	แผนที่แสดงบริเวณถนนปรับปรุงใหม่ ล้ายบางนา-บางปะกง.....	2
2.1	แสดงการหาค่า Influence Factor สำหรับการคาดคะเนการทรุดตัว และการเคลื่อนตัวด้านข้างของขอบของ Load Area (Poulos, 1967 b).....	7
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Settlement Ratio กับ Applied Stress Ratio สำหรับ Strip Load กระทำบน Isotropic Homogeneous Foundation (จาก D' Appolonia et al., 1971).....	9
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Shear Stress กับ Overconsolidation Ratio (จาก D' Appolonia et al., 1971).....	10
2.4	หลักการในการคำนวณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Process).....	11
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Settlement Coefficient กับพารามิเตอร์ A (Skempton และ Bjerrum, 1957).....	11
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta u/\Delta \sigma_v$ และ OCR จาก Lee (1983).....	13
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง Settlement Ratio กับ OCR (Leonards, 1976).....	13
2.8	องค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการทรุดตัวครั้งที่สอง (Secondary Compression).....	14
2.9	วิธีการคำนวณการทรุดตัวครั้งที่สอง (Secondary Compression).....	15
2.10	อัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) สำหรับการระบายน้ำในทิศทางแนวตั้ง (Vertical Drainage) เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกพื้นที่ (DM-7).....	17
2.11	ตัวประกอบเวลา (T_{2D}) กับเปอร์เซ็นต์การอัดตัวคายน้ำ (\bar{U}) สำหรับการอัดตัวคายน้ำในลักษณะ 2 มิติ (Plane Strain Consolidation) โดยมีทางระบายน้ำ 2 ทิศทาง และค่าความซึมน้ำได้ (k) มีค่าเท่ากันทุกทิศทาง (จาก Lacasse et al., 1975).....	17

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12	18
ค่าตัวประกอบ α กับอัตราส่วนของค่าความซึมน้ำได้ (Permeability Ratio) สำหรับการอัดตัวคายน้ำ 2 มิติ ที่ $\bar{U} = 10\%$ และ 30% (จาก Lacasse et al., 1975).....	
2.13	19
ค่าตัวประกอบ α กับอัตราส่วนของค่าความซึมน้ำได้ (Permeability Ratio) สำหรับการอัดตัวคายน้ำ 2 มิติ ที่ $\bar{U} = 50\%$, 70% และ 85% (จาก Lacasse et al., 1975).....	
2.14	21
แสดงการหาค่า t_{90} โดยวิธีกราฟที่ล่องของเวลา.....	
2.15	22
แสดงการหาค่า t_{50} โดยวิธีลอกการทิมของเวลา.....	
2.16	24
ความสัมพันธ์ระหว่าง \bar{U} , T_v และ Z/H	
2.17	25
ตัวอย่างการคำนวณหาค่า C_v ในสนาม.....	
2.18	26
แสดงการหาค่าการทรุดตัว (ρ_c) โดยวิธีของ Asaoka.....	
2.19	26
แสดงหลักการของ stress path.....	
2.20	30
ทฤษฎีอัตราการอัดตัวคายน้ำ 3 มิติ สำหรับทางระบายน้ำที่มีรูปแบบต่าง ๆ	
2.21	32
การแบ่งหน้าตัดชั้นดินเป็นไฟไนท์เอลลิเมนต์ และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	
2.22	34
ความสัมพันธ์ของ K_o กับ OCR ของ Haney sensitive clay ระหว่างการ unloading และ reloading (Companella และ Vaid, 1972).....	
2.23	34
ค่าสัมประสิทธิ์ m ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่า K_o และ OCR กับ plasticity index (Ladd, 1977).....	
2.24	36
แสดงการหาค่า Stress Influence Factor (Poulos, 1967 b)	
2.25	39
แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Δu กับ $f(\Delta\sigma_v)$ (Leroueil et al., 1978 b).....	
2.26	41
แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bjerrum's Correction Factor กับค่า Plasticity Index ได้มาจากการทำ Embankment Failures (Ladd, 1975).....	

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.27	แสดงการแบ่งชั้นมวลดิน และระบบของแรงที่กระทำต่อแต่ละชั้นมวลดิน	44
3.1	แสดงตำแหน่งของหลุมเจาะ, การทดสอบ field vane และการติดตั้ง piezometer	48
3.2	แสดงการเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนมากแบบ fixed piston.....	50
3.3	แสดงอัตราการทรุดถนน และค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มที่ใต้กึ่งกลางถนนต่อเดิมนใหม่.....	53
3.4	แสดงตำแหน่งที่ติดตั้ง piezometer ที่ขอบ berm รูปแบบหน้าตัดของถนนและการแบ่งชั้นดิน.....	54
3.5	แสดงค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มที่ใต้ขอบ berm.....	55
3.6	กราฟแสดงการทรุดตัวของถนนเก่า (1969) ที่ กม.30 สายบางนา-บางปะกง.....	56
3.7	แสดงอัตราการทรุดถนน และค่าการทรุดตัวของถนนต่อเดิมนใหม่ (1983) ที่ กม.30 สายบางนา-บางปะกง.....	57
3.8	แสดงการเปลี่ยนแปลงระบบของหน่วยแรงเนื่องจาก การก่อสร้างถนนเก่า (1969) และการปรับปรุงถนนใหม่ (1983).....	60
3.9	แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความดันเซลล์ และน้ำหนักรวม.....	62
3.10	แสดง stress path ของดินที่ไม่เกิดการพืด และเกิดการพืด...	65
4.1.ก	Boring log ของดินจากหลุม DB-1.....	72
4.1.ข	ประวัติของหน่วยแรงของดินจากหลุม DB-1.....	73
4.2.ก.	Boring log ของดินจากหลุม DB-2.....	74
4.2.ข	ประวัติของหน่วยแรง ของดินจากหลุม DB-2.....	75
4.3	แสดงการตรวจสอบคุณภาพการทดสอบคอนโซลเดชั่น	77
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง C_α และ Stress Ratio.....	79
4.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CR และ C_α สำหรับ Normally Consolidated Clay.....	80
4.6	แสดงผลการทดลอง $\overline{CKoU-TC}$ ที่ OCR ต่าง ๆ โดยใช้ตัวอย่างดินจากหลุม DB-1.....	82

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.7	Normalized Effective Stress Envelope จากการทดสอบ CKoU-TC.....	83
4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง A-Parameter กับระดับของหน่วยแรงเฉือน ($\Delta q/\Delta q_f$) ที่ OCR ต่าง ๆ จากการทดสอบ CKoU-TC (PI 67-81%)	84
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง $Eu_{80}/\bar{\sigma}_{vc}$ กับค่า OCR.....	85
4.10	แสดง stress path ที่ระดับความลึก -3.50 ม.	89
4.11	แสดง stress path ที่ระดับความลึก -5.70 ม.....	90
4.12	แสดง stress path ที่ระดับความลึก -9.25 ม.	91
4.13	แสดง stress path ที่ระดับความลึก -13.25 ม.	92
4.14	แสดง stress path ที่ระดับความลึก -16.75 ม.	93
4.15	แสดง stress path ที่ระดับความลึก -20.20 ม.	94
4.16	หน่วยแรงเฉือนเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนจาก field vane shear บริเวณ กม.30 บางนา-บางปะกง.....	95
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่าง $Su/\bar{\sigma}_{vc}$ กับ OCR.....	96
4.18	แสดงการแบ่งชั้นดิน และผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยวิธี Fellenius	100
4.19	แสดงการแบ่งชั้นดิน และผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยวิธีของ Bishop	101
4.20	ค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มใต้ที่กลางถนนที่ระดับความลึกต่าง ๆ.....	106
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่าง พารามิเตอร์ A กับค่า OCR... ..	108
4.22	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในสภาพอิ่มตัว และสภาพอัดตัวคายน้ำที่ระดับความลึก ต่าง ๆ.....	114
4.23	การคาดคะเนการทรุดตัวของถนนต่อเติมใหม่ โดยวิธี Asaoka.....	115
4.24	แสดงการคาดคะเนอัตราการทรุดตัวของถนนต่อเติมใหม่ กม.30 ถนนสายบางนา - บางปะกง.....	122

สัญลักษณ์



A, B	=	พารามิเตอร์ของความดันน้ำในโพรงของ Skempton
A_f	=	พารามิเตอร์ของความดันน้ำในโพรง ณ จุดพิบัติ
B	=	ความกว้างน้อยที่สุดของหน่วยแรงกระทำ
B_1, B_f	=	อัตราส่วนของความดันน้ำโพรงเพิ่มต่อหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้ง ($\Delta u / \Delta \sigma_v$)
c, \bar{c}	=	หน่วยแรงยึดเหนี่ยวรวมและประสิทธิภาพตามลำดับ
CR	=	Compression Ratio
C_v	=	สัมประสิทธิ์ของการยุบอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation)
C_α	=	Rate of Secondary Compression
D	=	ความหนาของชั้นดิน (Compressible Layer)
DB	=	Deep Boring
DV	=	Deep Vane
d_f	=	ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัด (Dial Gauge) ที่จุดสุดท้าย
d_o	=	ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัด (Dial Gauge) เมื่อ $t = 0$
d_s	=	Corrected Zero Point
d_{50}	=	ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัด (Dial Gauge) ที่ 50% ของการอัดตัวคายน้ำ
d_{90}	=	ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัด (Dial Gauge) ที่ 90% ของการอัดตัวคายน้ำ
d_{100}	=	ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัด (Dial Gauge) ที่ 100% ของการอัดตัวคายน้ำ
E_u	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของดินแบบอเนกตรน (Undrained Modulus)
E_{u50}, E_{u80}	=	โมดูลัสยืดหยุ่นแบบอเนกตรน ที่ระดับของหน่วยแรงเฉือนเท่ากับ 50% และ 80% ตามลำดับ
\bar{E}	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของดินแบบเตรน (Drained Modulus)
e	=	อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio)
e_o	=	อัตราส่วนช่องว่างของดินเริ่มแรก (Initial Void Ratio)
F	=	แรงที่กระทำที่ node (Vector of applied Nodal Forces)
F.S.	=	อัตราส่วนความปลอดภัย (Safety Factor)
F.V.	=	Field Vane

สัญลักษณ์ (ต่อ)

- f = Initial Shear Stress Ratio
- H, h = ความหนาของชั้นดิน (Compressible Layer)
- H_d, H = ระยะทางระบายน้ำ (Length of Drainage Path)
- I_{st} = Influence factor จาก elastic solution, Poulos (1967 b)
- k = ลดติฟเนสส์ (Stiffness)
- k_h, k_v = สัมประสิทธิ์ความซึมน้ำในแนวราบและแนวตั้งตามลำดับ
(Coefficient of Permeability in Horizontal and Vertical Direction)
- K_0 = สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง ณ สภาวะล้นดุลย์ (Coefficient of Earth Pressure at Rest)
- l = ความยาวของส่วนโค้งที่ฐานของ slice
- LI = ดัชนีความเหลว (Liquidity Index)
- LIR = Load Increment Ratio
- LID = Load Increment Duration
- LL = พิกัดความเหลว (Liquid Limit)
- m_v = สัมประสิทธิ์ของการยุบอัดตัว (Coefficient of Compressibility)
- \bar{N} = แรงในแนวตั้งฉาก (Normal Force)
- N = SPT-N Value
- NC. = Normally Consolidated
- OC = Overconsolidated
- OCR = Over Consolidation Ratio
- P = Piezometer
- p = หน่วยแรงกระทำที่ผิวดิน
- p, \bar{p} = $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ และ $\frac{\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3}{2}$
- PI = Plasticity Index
- q, \bar{q} = $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ และ $\frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3}{2}$

สัญลักษณ์ (ต่อ)

q_u	=	Ultimate bearing capacity
RR	=	Recompression Ratio
SR	=	Settlement Ratio
S_u	=	กำลังรับแรงเฉือนแบบอั้นเดรน (Undrained Shear Strength)
T	=	แรงในแนวสัมผัส (Tangential Force)
T_v	=	ตัวประกอบเวลา (Time Factor) จากทฤษฎีของ Terzaghi
T_{2D}	=	ตัวประกอบเวลาจากทฤษฎีที่พิจารณาให้น้ำไหลออกจากดินได้ในลักษณะ 2 มิติ
T_{50}	=	ตัวประกอบเวลาที่ 50% ของการอัดตัวคายน้ำ
T_{90}	=	ตัวประกอบเวลาที่ 90% ของการอัดตัวคายน้ำ
t, t_v	=	เวลา
t_{50}	=	เวลาที่ 50% การอัดตัวคายน้ำ
t_{90}	=	เวลาที่ 90% การอัดตัวคายน้ำ
t_{100}	=	เวลาที่ 100% การอัดตัวคายน้ำ
TSP	=	Total Stress Path
\bar{U}	=	ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การอัดตัวคายน้ำ (Average Degree of Consolidation)
u	=	ค่าความดันน้ำในโพรงดินที่วัดได้จาก piezometer ที่จุดที่สนใจ
u_o	=	ค่าความดันน้ำในโพรงดินที่วัดได้จาก dummy piezometer ที่ระดับเดียวกับจุดที่สนใจ
Δu	=	ค่าความดันน้ำโพรงเพิ่ม (Excess Pore Water Pressure)
W	=	น้ำหนักของมวลดิน
Z	=	ระยะในแนวตั้ง
$\Delta \sigma$	=	ส่วนเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรง
$\bar{\phi}$	=	มุมเสียดทานประสิทธิผล (Effective Angle of Shearing Resistance)
γ_T	=	หน่วยน้ำหนักของมวลดิน
σ	=	หน่วยแรงรวม (Total Stress)
$\bar{\sigma}_{ho}$	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบตามธรรมชาติ (Insitu Horizontal Effective Stress)

สัญลักษณ์ (ต่อ)

$\bar{\sigma}_{vc}$	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress)
$\bar{\sigma}_{vm}$	=	หน่วยแรงที่บวมสูงสุดในอดีต (Maximum Past Pressure)
$\bar{\sigma}_{vo}$	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งตามธรรมชาติ (Insitu Vertical Effective Stress)
σ_{1f}	=	หน่วยแรงหลัก ณ จุดพิบัติ (Major Principal Stress)
σ_{3f}	=	หน่วยแรงรอง ณ จุดพิบัติ (Minor Principal Stress)
$\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y, \Delta\sigma_z$	=	การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในทิศทาง x, y และ z
$\Delta\sigma_{oct}$	=	Change in octahedral normal stress
$\Delta\tau_{oct}$	=	Change in octahedral shear stress
ϵ_v	=	ความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric Strain)
ϵ_1	=	ความเครียดในแนวตั้ง (Axial Strain)
ϵ_3	=	ความเครียดในแนวรัศมี (Radius Strain)
ϵ_{lu}	=	ความเครียดในแนวตั้งในสภาพอันเดรน
ϵ_{lc}	=	ความเครียดในแนวตั้งในสภาพอัดตัวคายน้ำ
θ	=	Bulk stress
α	=	Alpha factor
δ	=	Unknown nodal displacement vector
τ	=	หน่วยแรงเฉือน
$\Delta\tau$	=	ส่วนเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงเฉือน
μ	=	สัมประสิทธิ์การทรุดตัว (Settlement Coefficient)
μ	=	Bjerrum's correction factor
ρ_i	=	การทรุดตัวแบบอันเดรน (Undrained Settlement)
ρ_c	=	การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Primary Consolidation)
ρ_s	=	การยุบอัดตัวครั้งที่สอง (Secondary Consolidation)
ν	=	อัตราส่วนบัวซอง (Poisson's Ratio)

ชนิดของการทดลอง

- CKoU-TC = การหาค่ารับแรงเฉือนของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำแบบแอนไอโซทรอปิกมาก่อนด้วยเครื่อง Triaxial ในสภาพอันเดรนพร้อมวัดค่าความดันน้ำในโพรง (Ko-Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with Pore Pressure Measurement)
- CIU = การหาค่ารับแรงเฉือนของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทรอปิกมาก่อนด้วยเครื่อง Triaxial ในสภาพอันเดรนพร้อมวัดค่าความดันน้ำในโพรง (Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with Pore Pressure Measurement)
- UU = การหาค่ารับแรงเฉือนของดินที่ไม่ถูกอัดตัวคายน้ำมาก่อนในสภาพอันเดรน (Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย