

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงประสิทธิผลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของดินเหนียว



นายเจษฎา บุญอาจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2460-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

120831353

EFFECT OF THE EFFECTIVE STRESS ALTERATION ON THE PERMEABILITY OF CLAY



Mr. Jessada Boonard

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 974-17-2460-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงประสิทธิผลที่มีต่อค่า  
สัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของดินเหนียว

โดย

นายเจษฎา บุญอาจ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

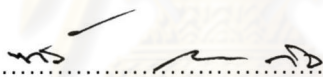
อาจารย์ที่ปรึกษา

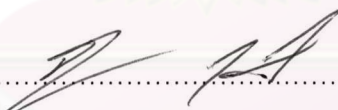
อาจารย์ ดร.สิริวัตร บุญญะฐิติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ธนะเจริญกิจ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.สิริวัตร บุญญะฐิติ)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เจษฎา บุญอาจ : ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงประสิทธิผลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินเหนียว. (EFFECT OF THE EFFECTIVE STRESS ALTERATION ON THE PERMEABILITY OF CLAY) อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ, 170 หน้า. ISBN 974-17-2460-8.

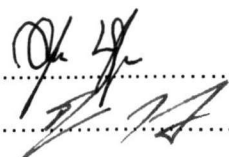
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลง หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย, หน่วยแรงเบี่ยงเบน, ความเครียดเชิงปริมาตร และความเครียดเฉือน ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินเหนียวอ่อน งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนคงสภาพจากบริเวณถนนบางนา-ตราด กม.ที่ 29+800 อ.บางบ่อ จ.สมุทรปราการ ระดับความลึกเดียวกันทุกการทดสอบคือ 7.50-8.50 ม. โดยเก็บตัวอย่างด้วยวิธี Fix piston sampling ขนาด 3 นิ้ว

การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ในงานวิจัยนี้ จะทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน โดยให้หน่วยแรงกระทำในแนวตั้งด้วยวิธีควบคุมหน่วยแรง ในทุกการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวอ่อนคงสภาพจะถูกอัดตัวคายน้ำในสภาพ  $K_0$  จนกระทั่งอยู่ภายใต้หน่วยแรงเดียวกับหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ จากนั้นจะทำการอัดตัวอย่างดินโดยการเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งและแนวราบอีกทั้งสิ้น 4 ระดับ โดยใช้สัดส่วนของ  $\Delta\sigma'_h/\Delta\sigma'_v$  แตกต่างกันในแต่ละการทดสอบ การทดสอบทั้งหมดจะอยู่ในช่วงที่ดินเหนียวอยู่ในสภาวะอัดแน่นปกติ และมีความเครียดเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำวัดจากสภาวะหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติไม่เกิน 20% โดยเมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำในแต่ละระดับจะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ทุกครั้ง (รวมทั้งสิ้น 5 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง) ด้วยวิธีการทดสอบแบบเสดคงที่ โดยใช้ความลาดชันทางชลศาสตร์เท่ากับ 80

จากผลการทดสอบ ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $k$  กับ  $p'$  และ  $q$  โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรมากกว่า 2 ตัว พบว่า ค่า  $k$  มีความสัมพันธ์ทั้งกับค่า  $p'$  และ  $q$  โดยที่ การเพิ่มขึ้นของค่า  $p'$  ทำให้ค่า  $k$  ลดลงมากกว่า การเพิ่มขึ้นของค่า  $q$  ในปริมาณเท่ากัน ถึงประมาณ 4 เท่า แต่อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถแยกผลต่อค่า  $k$  เนื่องจากค่า  $p'$  หรือ  $q$  ออกจากกันได้ สาเหตุเพราะ การเพิ่มขึ้นของทั้งค่า  $p'$  และ  $q$  ทำให้เกิดทั้งค่า  $\varepsilon_v$  และ  $\varepsilon_q$  ซึ่งทั้งสองค่านี้จะส่งผลกระทบต่อค่า  $k$  แตกต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $k$  กับ  $\varepsilon_v$  และ  $\varepsilon_q$  โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรมากกว่า 2 ตัว พบว่า ค่า  $k$  มีความสัมพันธ์ทั้งกับค่า  $\varepsilon_v$  และ  $\varepsilon_q$  โดยที่ เมื่อค่า  $\varepsilon_v$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า  $k$  ลดลง แต่เมื่อค่า  $\varepsilon_q$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาดของการเปลี่ยนแปลงของค่า  $k$  จะพบว่า ค่า  $\varepsilon_v$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า  $k$  มากกว่าค่า  $\varepsilon_q$  ถึงประมาณ 4.8 เท่า

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2545.....



## 4370260721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: PERMEABILITY / MEAN EFFECTIVE STRESS / DEVIATOR STRESS / VOLUMETRIC STRAIN / SHEAR STRAIN

JESSADA BOONARD : EFFECT OF THE EFFECTIVE STRESS ALTERATION ON THE PERMEABILITY OF CLAY. THESIS ADVISOR: TIRAWAT BOONYATEE, D.Eng., 170 pp. ISBN974-17-2460-8.

The purpose of this research is to study the effects of mean effective stress, deviator stress, volumetric strain and shear strain alteration to the coefficient of permeability of soft clay. In this research, the undisturbed soft clay samples were taken by 3"  $\phi$  fix piston sampling from Bangna-Trad Highway at KM. 29+800 Bangbo Samutprakan. Only samples from depth 7.50-8.50 m. were used in this research.

The anisotropic consolidation stress controlled triaxial test was used in this research to determine the coefficient of permeability of soft clay. The undisturbed soft clay samples have been  $K_0$ -consolidated to the in-situ effective stress state before they were anisotropic consolidated to 4 stress level using different  $\Delta\sigma'_h/\Delta\sigma'_v$  ratio for each tests. The samples can be considered as the normally consolidated clay. The strain measured from all tests were not exceed 20%. At the end of consolidation of each stress level, the constant head permeability test were performed using hydraulic gradient of 80.

Based on the test results, the relationship between k, p' and q was determined by the multiple regression analysis. It was found from the relation that the increasing of both p' and q will decrease the magnitude of k. The effect of p' on k is about 4 times stronger than the effect of q on k. However, the effect of p' and q on k cannot be considered separately because both of them can induce the  $\epsilon_v$  and  $\epsilon_q$  simultaneously.

The same technique was used to determine the relationship between k,  $\epsilon_v$  and  $\epsilon_q$ . The equation reveals that k depends on both  $\epsilon_v$  and  $\epsilon_q$ . The increasing of  $\epsilon_v$  leads to the decreasing of k. On the contrary, the increasing of  $\epsilon_q$ . When only the magnitude of k is considered, the effect of  $\epsilon_v$  on k is about 4.8 times stronger than the effect of  $\epsilon_q$  on k.

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

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ฐิรวีตร บุญญะฐิ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง ตรวจสอบ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ และ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้ความกรุณาตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ ด้วยดี

ผู้เขียนขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนตลอดจนเจ้าหน้าที่วิจัยรัฐพีทิล ศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความร่วมมือ และช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนปรารถนาที่จะแสดงความรำลึกถึงพระคุณของบิดาและมารดา ที่ได้ให้ความสนับสนุน และเป็นกำลังใจแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษาในระดับนี้

เจษฎา บุญอาจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 คำนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 กำเนิดและลักษณะของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.....	6
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง ณ สภาวะสมดุล.....	7
2.3 ทางเดินของหน่วยแรง.....	12
2.3.1 วิธีการเขียนทางเดินของหน่วยแรงที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ.....	12
2.3.1.1 MIT Stress Path.....	12
2.3.1.2 Cambridge Stress Path.....	14
2.3.2 ทางเดินของหน่วยแรงระหว่างการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ.....	16
2.3.2.1 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ Isotropic.....	16
2.3.2.2 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ Anisotropic.....	16
2.3.2.3 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำในสภาพ $K_0$ .....	17
2.4 กฎของดาร์ซีและขอบเขตความเป็นจริง.....	17
2.5 ทฤษฎีของสมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.6 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของดินเหนียว.....	20
2.6.1 ผลกระทบจากสารที่ไหลซึมผ่าน.....	20
2.6.2 ผลกระทบจากคุณลักษณะของดิน.....	21
2.6.2.1 ผลกระทบจากขนาดของอนุภาคดิน.....	21
2.6.2.2 ผลกระทบจากอัตราส่วนช่องว่าง.....	21
2.6.2.3 ผลกระทบจากส่วนประกอบของดิน.....	23
2.6.2.4 ผลกระทบจากโครงสร้างของดิน.....	23
2.6.2.5 ผลกระทบจากระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	26
2.6.3 ผลกระทบจากสถานะของหน่วยแรง.....	27
2.7 งานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ และอัตราส่วนช่องว่าง.....	27
2.8 งานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ และหน่วยแรงประสิทธิผล.....	32
2.9 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ในห้องปฏิบัติการ.....	36
2.9.1 การทดสอบแบบเฮดคงที่.....	36
2.9.2 การทดสอบแบบเฮดเปลี่ยนแปลง.....	37
2.9.3 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ.....	37
2.9.4 การทดสอบคาปิลลารีในแนวนอน.....	38
2.10 เครื่องมือทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ในห้องปฏิบัติการ.....	39
2.10.1 ผนังล้อมรอบแบบแข็ง.....	39
2.10.2 ผนังล้อมรอบแบบยืดหยุ่น.....	39
2.11 การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของดินเหนียว ด้วยเครื่องทดสอบ แรงอัดสามแกน โดยวิธีการทดสอบแบบเฮดคงที่.....	41
2.11.1 หลักการของการทดสอบ.....	41
2.11.2 ข้อดีของการทดสอบ.....	42
2.11.3 ข้อเสียของการทดสอบ.....	43
2.11.4 การกระจายของความดันน้ำในโพรงระหว่างการทดสอบ.....	43
2.11.5 ผลกระทบต่อการทดสอบ.....	45



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.11.5.1 ผลกระทบจากความลาดชันทางชลศาสตร์.....	45
2.11.5.2 ผลกระทบจากความดันภายใน.....	46
2.11.5.3 ผลกระทบจากเวลาในการทดสอบ.....	47
3. วิธีการทดสอบและวิจัย .....	48
3.1 สถานที่และวิธีการเก็บตัวอย่างดิน.....	48
3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดิน.....	48
3.1.2 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน.....	50
3.2 การวัดระดับน้ำและแรงดันน้ำในสนาม.....	52
3.3 การทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ.....	53
3.4 โปรแกรมการทดสอบ .....	54
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	59
3.6 ขั้นตอนในการทดสอบ.....	61
3.6.1 การจัดเตรียมเครื่องมือทดสอบ.....	61
3.6.2 การจัดเตรียมตัวอย่างดิน.....	61
3.6.3 การจัดตัวอย่างดินในเครื่องมือทดสอบ.....	61
3.6.4 การทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	62
3.6.5 การอัดตัวคายน้ำในสภาพ $K_0$ จนกระทั่งตัวอย่างดินอยู่ภายใต้หน่วยแรง เดียวกับหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ.....	63
3.6.6 การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้.....	66
3.6.7 การอัดตัวคายน้ำโดยการเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง และแนวราบจากหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ.....	67
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล.....	68
4.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้.....	68
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k$ กับ $p'$ และ $q$ จากผลการทดสอบ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้.....	72

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $e$ กับ $p'$ และ $q$ จากผลการทดสอบ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มได้.....	77
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k$ กับ $e$ จากผลการทดสอบ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มได้.....	82
4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k$ กับ $\epsilon_v$ และ $\epsilon_q$ จากผลการทดสอบ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มได้.....	89
5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต.....	93
รายการอ้างอิง .....	95
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก.....	100
ภาคผนวก ข.....	103
ภาคผนวก ค.....	107
ภาคผนวก ง.....	132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	153

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่า $K_0$ ที่รวบรวมมาจากงานวิจัยต่างๆ.....	8
ตารางที่ 2.2 ผลกระทบจากโครงสร้างของดินเหนียวต่อค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้.....	26
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ บริเวณถนนบางนา-ตราด กม.ที่ 29+800 ที่ความลึกประมาณ 7.50 – 8.50 ม.....	53
ตารางที่ 3.2 ลำดับขั้นตอนในการอัดตัวคายนํ้าในสภาพ $K_0$ จากเริ่มต้น จนกระทั่งถึง In-situ stress สำหรับทุกการทดสอบ.....	55
ตารางที่ 3.3 ระดับของหน่วยแรงประสิทธิผลที่จะทำการทดสอบเพื่อหา ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้.....	56
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของ การทดสอบที่ 1.....	69
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของ การทดสอบที่ 2.....	69
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของ การทดสอบที่ 3.....	70
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของ การทดสอบที่ 4.....	70
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของ การทดสอบที่ 5.....	71

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ค่า $K_0$ เป็นฟังก์ชันของดัชนีพลาสติคิตี (PI) และ OCR.....	9
รูปที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ $m$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่า PI สำหรับสมการของ Schmidt (1966)....	10
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของค่า $K_0$ กับ OCR ของ Haney Sensitive Clay ระหว่างการ Reloading และ Unloading .....	10
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_0$ กับ OCR ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.....	11
รูปที่ 2.5 วิธีการเขียนทางเดินของหน่วยแรงแบบ MIT.....	13
รูปที่ 2.6 นิยามของค่า $q$ ในการเขียนทางเดินของหน่วยแรงแบบ MIT.....	14
รูปที่ 2.7 วิธีการเขียนทางเดินของหน่วยแรงแบบ Cambridge.....	15
รูปที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเขียนทางเดินของหน่วยแรงแบบ MIT กับ Cambridge.....	16
รูปที่ 2.9 ทางเดินของหน่วยแรงระหว่างการอัดตัวคาน้ำรูปแบบต่างๆ.....	17
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k$ กับ $e$ ของดินเม็ดหยาบ จากผลการทดสอบแบบ เฮดเปลี่ยนแปลง.....	22
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k$ กับ $e$ ของดินเม็ดละเอียด จากผลการทดสอบแบบ เฮดเปลี่ยนแปลง.....	22
รูปที่ 2.12 ผลกระทบจากส่วนประกอบของดินเหนียวต่อค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้.....	23
รูปที่ 2.13 ชนิดของโครงสร้างของดินเหนียวที่เกิดจากการตกตะกอน.....	24
รูปที่ 2.14 ผลกระทบจากระดับการอัดตัวด้วยน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้.....	27
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k$ กับ $e^n/(1+e)$ ของ Crushed glass clay ( $n=3.2$ ).....	28
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k$ กับ $e$ สำหรับ Batiscan clay.....	31
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k$ กับ $e$ สำหรับ Backebol clay.....	31
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k$ กับ $e$ สำหรับ Matagami clay.....	32
รูปที่ 2.19 การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ในห้องปฏิบัติการ.....	36
รูปที่ 2.20 แสดงหลักการและผลของการทดสอบคาปิลลารีในแนวนอน.....	38
รูปที่ 2.21 เครื่องมือทดสอบแบบ Rigid-wall permeameters.....	40
รูปที่ 2.22 เครื่องมือทดสอบแบบ Flexible-wall permeameters.....	40

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.23 แสดงการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินเหนียวด้วย เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน โดยวิธีการทดสอบแบบเสดคังที่.....	41
รูปที่ 2.24 แสดง (a) ตัวอย่างดินที่อยู่ระหว่างการทดสอบ (b) การกระจายของความดันน้ำในโพรงระหว่างการทดสอบ.....	44
รูปที่ 2.25 ผลกระทบจากความดันภายในต่อค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของตัวอย่างบดอัด....	47
รูปที่ 3.1 แผนที่ตำแหน่งหลุมเจาะ บริเวณถนนบางนา-ตราด กม.ที่ 29+800 อ.บางบ่อ จ.สมุทรปราการ.....	49
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการเก็บตัวอย่างด้วยวิธี Fixed Piston Sampling.....	51
รูปที่ 3.3 แรงดันน้ำในโพรงดินบริเวณ ถนนบางนา-ตราด กม.ที่ 30.....	52
รูปที่ 3.4 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (ESP) ในการอัดตัวคายน้ำในสภาพ $K_0$ จากเริ่มต้นถึง In-situ stress.....	55
รูปที่ 3.5 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (ESP) แสดงระดับของหน่วยแรงประสิทธิผล ที่จะทำการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้.....	58
รูปที่ 3.6 เครื่องมือทดสอบ Triaxial ที่ให้หน่วยแรงกระทำในแนวตั้งโดยการวางน้ำหนัก.....	60
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในเซลล์กับน้ำหนักแขวน.....	65
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย ที่หน่วยแรงเบี่ยงเบนต่างๆกัน.....	74
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ กับ หน่วยแรงเบี่ยงเบน ที่หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยต่างๆกัน.....	75
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย และ หน่วยแรงเบี่ยงเบน.....	76
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนช่องว่าง กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย ที่หน่วยแรงเบี่ยงเบนต่างๆกัน.....	79

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนช่องว่าง กับ หน่วยแรงเบี่ยงเบน ที่หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยต่างกัน.....	80
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนช่องว่าง กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย และ หน่วยแรงเบี่ยงเบน.....	81
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e จากการทดสอบที่ 1.....	83
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e จากการทดสอบที่ 2.....	83
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e จากการทดสอบที่ 3.....	84
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e จากการทดสอบที่ 4.....	84
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e จากการทดสอบที่ 5.....	84
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C_s)$ กับค่า $(\Delta q/\Delta p)$ .....	85
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดเชิงปริมาตร กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย และ หน่วยแรงเบี่ยงเบน.....	87
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดเฉือน กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย และ หน่วยแรงเบี่ยงเบน.....	88
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ กับ ความเครียดเชิงปริมาตร และ ความเครียดเฉือน.....	91

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

## ก. คำอธิบายสัญลักษณ์

$p'$	= หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย
$p$	= หน่วยแรงรวมเฉลี่ย
$q$	= หน่วยแรงเบี่ยงเบน
$p'_0$	= หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยที่สภาพเดียวกับในสนาม
$q_0$	= หน่วยแรงเบี่ยงเบนที่สภาพเดียวกับในสนาม
$\varepsilon_a$	= ความเครียดในแนวแกน (แกนตั้ง)
$\varepsilon_v$	= ความเครียดเชิงปริมาตร
$\varepsilon_q$	= ความเครียดเฉือน
$K$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง
$K_0$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง ณ สภาวะสมดุล
$K_{0(NC)}$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง ณ สภาวะสมดุล ช่วง NC
$K_{0(OC)}$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง ณ สภาวะสมดุล ช่วง OC
$\sigma'_v$	= หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง
$\sigma'_h$	= หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ
$\sigma_v$	= หน่วยแรงรวมในแนวตั้ง
$\sigma_h$	= หน่วยแรงรวมในแนวราบ
$\sigma'_{vo}$	= หน่วยแรงประสิทธิผลทับถมในแนวตั้ง
$\sigma'_{ho}$	= หน่วยแรงประสิทธิผลทับถมในแนวราบ
$\sigma'_1$	= หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวแกนหลัก
$\sigma'_2$	= หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวแกนกลาง
$\sigma'_3$	= หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวแกนรอง
$\sigma_1$	= หน่วยแรงรวมในแนวแกนหลัก
$\sigma_2$	= หน่วยแรงรวมในแนวแกนกลาง
$\sigma_3$	= หน่วยแรงรวมในแนวแกนรอง
$\sigma_c$	= หน่วยแรงรวมสำหรับการอัดตัวคายน้ำ
$\sigma'_c$	= หน่วยแรงประสิทธิผลสำหรับการอัดตัวคายน้ำ

$\sigma'$	= หน่วยแรงประสิทธิผล
$\sigma'_p$	= หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่กดทับในอดีต
$\sigma'_{av}$	= หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยที่เวลาใดๆ
$\sigma'_i$	= หน่วยแรงประสิทธิผลเริ่มต้น
$u$	= ความดันน้ำในโพรง
$\Delta$	= การเปลี่ยนแปลง
$\phi'$	= มุมเสียดทานประสิทธิผล
$\gamma$	= หน่วยน้ำหนัก
$\mu$	= ความหนืด
$\gamma_w$	= หน่วยน้ำหนักของน้ำ
$k$	= ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้
$k_0$	= ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินที่สภาพเดียวกับในสนาม
$i$	= ความลาดชันทางชลศาสตร์
$e$	= อัตราส่วนช่องว่าง
$e_0$	= อัตราส่วนช่องว่างของดินที่สภาพเดียวกับในสนาม
$e_L$	= อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่ LL
$n$	= ความพรุน
$S$	= ระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำ
$C_c$	= ค่าดัชนีการยุบอัดตัว
$C_v$	= สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ

#### ข. คำย่อ

NC	= Normally consolidated
OC	= Overconsolidated
OCR	= Overconsolidation ratio
PI	= Plasticity index
LL	= Liquid limit
TSP	= Total stress path
ESP	= Effective stress path



RWP <sub>s</sub>	= Rigid-wall permeameter
FWP <sub>s</sub>	= Flexible-wall permeameter
LVDT	= Linear vertical displacement transducer
ADU	= Autonomous Data-acquisition Unit
FEM	= Finite element method



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย