

การ เปรียบเทียบอัน เตรนครีฬและการยุดตัวของคิน เหนียวอ่อนเมื่อ  
รับแรงในแนวตั้งและแรงในแนวนอน



นายสมบัติ กิจจาลักษณ์

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2525

ISBN 974-561-607-9

007512

11769744x

Comparison of Undrained Creep and Compressibility of  
Soft Clay under Vertical and Horizontal Loading

Mr. Sombat Kitjalaksana


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering  
Department of Civil Engineering  
Graduate School

1982


หัวข้อวิทยานิพนธ์      การเปรียบเทียบอันตรรกศาสตร์และการยุบตัวของดินเหนียวอ่อน เมื่อ  
รับแรงในแนวตั้งและแรงในแนวนอน  
โดย                              นายสมบัติ กิจจาลักษณ์  
ภาควิชา                            วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา            ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์

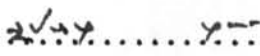
---

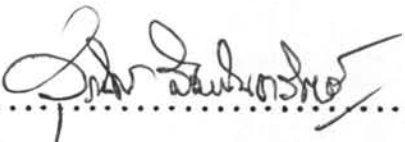
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....  ..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุประคิษฐ์ บุญนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ วิเชียร เค็งอำนวยการ)

.....  ..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุประคิษฐ์ บุญนาค)

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

.....  ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงค์)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบอิสระด้านข้าง (Unconfined Compression Test, UC) และจากการทดสอบหา กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่ถูกอัดตัวคายน้ำมาก่อนในสภาพอันแทรก (Unconsolidated Undrained Compression Test, UU) ที่  $\sigma_{vo}$  ประมาณ 18% ถึง 24%

ดินอ่อนจากจังหวัดปทุมธานีนี้มีปัญหาทางด้านครีพทั้งเมื่อรับแรงในแนวตั้งและรับแรงในแนวนอน ทั้งนี้เพราะค่าพารามิเตอร์  $m$  (ความลาดของเส้นตรงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับ Logarithm ของเวลา) มีค่าน้อยกว่า 1.0 คือมีค่า 0.70 เท่านั้น เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง และมีค่าเพียง 0.45 เมื่อดินรับแรงในแนวนอน การยุบตัวที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองอันแทรกด้วยเครื่อง Triaxial ในห้องทดลอง สามารถใช้สมการของ SEMPLE (1973) กับสมการของ SINGH และ MITCHELL (1968) ในการคาดคะเนความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา ซึ่งสมการของ SEMPLE จะให้ค่าที่ใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่ายิ่งมากจะเกิดการยุบตัว เนื่องจากอันแทรกครีพมากด้วยและอาจเกิดการพิบัติโดยอันแทรกครีพทั้งนี้เพราะ เมื่อดินรับแรงในแนวนอน จะเกิดการพิบัติโดยอันแทรกครีพเมื่อหน่วยแรงคงที่มีค่าเพียง 80% ของกำลังแรงเฉือนและเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งจะเกิดการพิบัติโดยอันแทรกครีพเมื่อหน่วยแรงคงที่มีค่าเพียง 90% ของกำลังรับแรงเฉือน

สำหรับการทดสอบการยุบตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำภายหลังจากพฤติกรรมอันแทรกครีพได้สิ้นสุดลง เมื่อดินรับแรงที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ ทั้งในแนวตั้งและในแนวนอน เมื่อใช้สมมุติฐานของทฤษฎีเส้นตรงอีลาสติก (Linear Elastic Theory) และตั้งข้อสมมุติฐานว่าดินเป็นวัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic Material) ทำให้สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์คือค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพระบายน้ำ ( $E'$ ) และค่าอัตราส่วนปริมาตรของในสภาพระบายน้ำ ( $\nu'$ ) เพื่อนำมาใช้ในการคาดคะเนการยุบตัวของดินในสภาพสามมิติได้ ค่า  $E'$  และ  $\nu'$  ที่ได้จากการทดสอบพบว่า จะขึ้นอยู่กับระดับหน่วยแรงเฉือนด้วย ที่ระดับหน่วยแรงเฉือนสูงจะเกิดการยุบตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำมีค่ามาก ค่า  $E'$  และ  $\nu'$  ที่หาได้จากการทดสอบ มีดังนี้

- ก. เมื่อคิดทั้งการยุบตัวแบบอัน เทรนและการยุบตัว เนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำ

ดินรับแรงในแนวตั้ง

$\bar{E}/\bar{\sigma}_{vc}$  มีค่าระหว่าง 38 กับ 18 และ  $\bar{v}$  มีค่าระหว่าง 0.19 กับ 0.24 เมื่อ

$\frac{\Delta q}{S_u}$  มีค่าระหว่าง 50% ถึง 90%

ดินรับแรงในแนวนอน

$\bar{E}/\bar{\sigma}_{vc}$  มีค่าระหว่าง 35 กับ 13 และ  $\bar{v}$  มีค่าระหว่าง 0.16 กับ 0.14 เมื่อ

$\frac{\Delta q}{S_u}$  มีค่าระหว่าง 50% ถึง 80%

- ข. เมื่อคิด เฉพาะการยุบตัว เนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำ

ดินรับแรงในแนวตั้ง

$E'/\bar{\sigma}_{vc}$  มีค่าระหว่าง 43 กับ 29 และ  $v'$  มีค่าระหว่าง -0.01 กับ -0.06

เมื่อ  $\frac{\Delta q}{S_u}$  มีค่าระหว่าง 50% ถึง 90%

ดินรับแรงในแนวนอน

$E'/\bar{\sigma}_{vc}$  มีค่าระหว่าง 52 กับ 28 และ  $v'$  มีค่าระหว่าง -0.10 กับ -0.54

เมื่อ  $\frac{\Delta q}{S_u}$  มีค่าระหว่าง 50% ถึง 80%

การที่ค่า  $v'$  ออกมาเป็นค่าติดลบแสดงว่าดินไม่ได้มีพฤติกรรมแบบวัสดุที่มีพฤติกรรมของหน่วยแรงกับความเครียด ( $\sigma-\epsilon$ ) แบบเส้นตรงอีลาสติกและเป็นวัสดุเอกพันธ์ (Linear Homogeneous Isotropic Material) ที่แท้จริง

จากการวิจัยพบว่า ค่าที่กักความปลดกัยที่ควรใช้ในกรณีที่ดินมีปัญหาด้านครีฟ ควรมีค่าสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนจาก Field Vane หรือจากการทดลองแบบ CIUC ที่ให้เพียงกำลังรับแรงเฉือนในแนวตั้งมาเป็นค่าที่ใช้ในการพิจารณาปัญหาเมื่อดินรับแรงในแนวนอน เช่นการคิดแรงดันดินด้านข้าง แต่ถ้าใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนในแนวตั้งที่ได้จาก

การทดลองแบบ UC หรือแบบ UU ซึ่งยังมีค่าต่ำกว่ากำลังครีมาท อาจทำให้การออกแบบ  
ไม่ประหยัดถ้ายังคงใช้ค่าพิภคความปลอดภัยตามมาตรฐาน (ตัวอย่างเช่นค่าพิภคความปลอดภัย  
ที่ใช้ค่าแรงเฉือนจาก Corrected Field Vane ในการออกแบบเป็นต้น)





horizontal creep strength was higher than vertical undrained shear strength from Unconfined Compression test (UC), and from Unconsolidated Undrained Compression test (UU) by about 18 % and 24 % respectively.

This soft plastic silt-clay at Prathumthanee province is the creep susceptible material as the value of "m" parameter (slope of linear portion from graph between logarithm of strain rate versus logarithm of time) was lower than 1.0, showing only 0.70 for vertical loading and 0.45 for horizontal loading. Strain-time relationship during undrained creep could be estimated by SEMPLE (1974) or SINGH and MITCHELL (1968)'s equation with reasonable accuracy, though SEMPLE's equation gave better result. Moreover, the results also showed that if the stress level was high, failure due to undrained creep will occur. (Base on shear strength measured from CIUC test at  $\bar{\sigma}_{vo}$ , undrained creep failure would occur when soil sustained constant shear stress only 80 % of the shear strength in horizontal loading, and only 90 % of the shear strength in vertical loading)

For the study of drained compressibility characteristics, results were obtained from triaxial consolidation tests after completing undrained creep tests. The linear  $\sigma$ - $\epsilon$  relation base on elasticity theory and assumption that clay is isotropic material were used to evaluate the drained modulus of elasticity (E') and drained poisson's ratio ( $\nu'$ ). These two parameters can be used to predict three dimension compression or settlement at each stress level. Values of E' and  $\nu'$  are found to be dependent on stress level. These values are:

- a)  $\bar{E}$  and  $\bar{\nu}$  for total effects of undrained and drained compression.

Vertical loading:

$\frac{E'}{\bar{\sigma}_{vc}}$  between 38 and 18  $\bar{\nu}$  between 0.19 and 0.24 when  $\frac{\Delta q}{S_u}$   
 between 50 % to 90 %

Horizontal loading:

$\frac{E'}{\bar{\sigma}_{vc}}$  between 35 and 13  $\bar{\nu}$  between 0.16 and 0.14 when  $\frac{\Delta q}{S_u}$   
 between 50 % to 80 %

b.  $E'$  and  $\nu'$  for consolidation compression only.

Vertical loading:

$\frac{E'}{\bar{\sigma}_{vc}}$  between 43 and 29  $\nu'$  between -0.01 and -0.06 when  $\frac{\Delta q}{S_u}$   
 between 50 % to 90 %

Horizontal loading:

$\frac{E'}{\bar{\sigma}_{vc}}$  between 52 and 28  $\nu'$  between -0.10 and -0.54 when  $\frac{\Delta q}{S_u}$   
 between 50 % to 80 %

Due to soil behaving an inelastic nonlinear material, the observed drained poisson's ratio is negative.

As the result of this Bangkok silt-clay soil has creep problems and anisotropy in shear strength, the suitable factor of safety used in the design should be high especially when the undrained shear strength from Field Vane or  $\overline{CIUC}$  test is used in the design involving the horizontal loading problem (e.g. computing passive pressure). On the contrary, using undrained shear strength from UU and UC test with the standard factor of safety for design, e.g. that for using corrected Field Vane strength, it will lead to conservative design when results were from poor samples.



## กิติกรรมประกาศ

ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้แนวทาง คำแนะนำและวิธีการในการแก้ปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือด้านทุนการศึกษาและตรวจสอบ แก๊ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงษ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องวิจัย ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านอาจารย์ทั้งสองเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจสอบ แก๊ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ เป็นรูปเล่ม

ผู้เขียนระลึกถึงพระคุณของ บิดา มารดา ครู อาจารย์และความกรุณาจากท่านผู้มีอุปการคุณเสมอ ท่านผู้มีพระคุณเหล่านี้ได้มีส่วนช่วยให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในการศึกษาจนถึงปัจจุบัน

ในการเก็บตัวอย่างดินและในระหว่างการทดลอง ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณวิริยะ กิรศิริราชการ คุณคำรงค์ ปิ่นภูวดล ที่ให้ความช่วยเหลือและเสนอแนะวิธีการแก้ปัญหาที่ดี เสมอมา ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องวิจัยปฐพีกลศาสตร์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือร่วมมือเป็นอย่างดี

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี.

นายสมบัติ กิจจาลักษณ์



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ช
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ฉ
รายการตารางประกอบ .....	ณ
รายการรูปประกอบ .....	ด
สัญลักษณ์ .....	น
<b>บทที่</b>	
1. บทนำ .....	1
1.1 คำจำกัดความ (Definitions) .....	1
1.2 การออกแบบงานดินอ่อน .....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	4
1.5 ประโยชน์ของการวิจัย .....	5
2. ทฤษฎีและทบทวนงานในอดีต .....	6
2.1 งานในอดีตเกี่ยวกับอัน เทรนครีฟ .....	6
2.1.1 ทั่วไป .....	6
2.1.2 การคาดคะเนเวลาถึงพิบัติโดยอัน เทรนครีฟ (Predicting the Time to Failure) .....	11
2.1.3 ความดันน้ำในโพรงระหว่างอัน เทรนครีฟ .....	18
2.1.4 ผลของอุณหภูมิต่ออัน เทรนครีฟ (Effect of Temperature) .....	19
2.1.5 ผลของส่วนประกอบของดิน (Effect of Composition) .....	22
2.1.6 ผลของระบบหน่วยแรงในดิน (Effect of Stress System) .....	22
2.2 ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซอง (Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio) .....	25

บทที่

หน้า

2.2.1	ทฤษฎีอีลาสติก .....	26
2.2.2	วิธีการหาค่าอัตราส่วนปริมาตร .....	27
2.2.3	วิธีการหาค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น .....	27
2.2.3.1	วิธีการหาค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นโดยการทดลอง .....	27
2.2.3.2	วิธีการหาค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นโดยใช้สูตร Empirical .....	28
3.	การทดลอง .....	30
3.1	การเก็บตัวอย่างดินทดลอง .....	30
3.2	การหาคคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลอง .....	33
3.3	ขั้นตอนและวิธีการทดลอง .....	33
3.3.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	33
3.3.2	การเตรียมตัวอย่างดินทดลองในเครื่อง Triaxial .....	36
3.3.3	การทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) .....	37
3.3.4	การอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Consolidation) .....	38
3.3.5	การทดสอบดินทดลอง .....	39
3.3.5.1	การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำ แบบไอโซทรอปิกมาก่อนด้วยเครื่อง Triaxial ในสภาพอันเดรนพร้อมวัดค่าความดันน้ำในโพรง (Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with Pore Pressure Measurement) .....	39
3.3.5.2	การทดสอบอันเดรนครีฟและวิธีการคำนวณหาความ เครียด ( $\epsilon$ ) และอัตราความเครียด ( $\dot{\epsilon}$ ) .....	40
3.3.5.3	การทดสอบการอัดตัวคายน้ำในเครื่อง Triaxial (Triaxial Consolidation) .....	42

บทที่	หน้า
3.3.5.4 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่ถูกอัดตัวคายนํ้า มาก่อนในสภาพอันเดรน (Unconsolidated Undrained Compression Test, UU) ....	45
3.3.3.5 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบอิสระด้านข้าง (Unconfined Compression Test, UC) ..	45
3.4 ข้อผิดพลาดและการป้องกันแก้ไขในการทดลองด้วยเครื่อง Triaxial ..	46
3.4.1 การควบคุมระดับหน่วยแรงเฉือน (Stress Level) ให้คงที่ .	46
3.4.2 ผลของแรงเหนี่ยวรั้งที่ปลาย (Effect of End Restraint)	46
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ .....	48
4.1 การทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินทดลอง .....	48
4.2 การทดลองกำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรน .....	49
4.2.1 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลและ เอนเวอโลปของหน่วยแรง ประสิทธิผลที่พิบัติ .....	52
4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด .....	57
4.3 การทดลองอันเดรนครีพ .....	63
4.3.1 การคาดคะเนกำลังครีพ .....	63
4.3.2 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลในระหว่างเกิดอันเดรนครีพ	70
4.3.3 พฤติกรรมของหน่วยแรง-ความเครียดและเวลาในระหว่าง อันเดรนครีพ .....	70
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความดันนํ้าในโพรงกับเวลา ในระหว่างทดสอบอันเดรนครีพ .....	83
4.3.5 การคาดคะเนเวลาถึงพิบัติโดยอันเดรนครีพ .....	91
4.4 การทดลองอัดตัวคายนํ้าในเครื่อง Triaxial .....	93
4.4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้คาดคะเนการยุบตัวทั้งหมดของดินใน สภาพสามมิติ .....	94
4.4.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้คาดคะเนการยุบตัวเนื่องจากขบวนการ อัดตัวคายนํ้าในสภาพสามมิติเพียงอย่างเดียว .....	103

บทที่	หน้า
5. บทสรุปและแนะนำการวิจัยขั้นต่อไป .....	113
5.1 บทสรุป .....	113
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยขั้นต่อไป .....	117
เอกสารอ้างอิง .....	118
ภาคผนวก .....	122
- ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง (Raw Data) .....	123
ประวัติผู้เขียน .....	155

## รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลอง .....	49
4.2	ตัวอย่างดินสำหรับการทดลองหากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรน ..	51
4.3	ตัวอย่างดินสำหรับการทดลองอันเดรนครีพและการทดลองอัดตัวคายน้ำ ในเครื่อง Triaxial .....	64



## รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Log ของอัตราความเครียดกับ Log ของเวลา ....	8
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Log}_e$ ของอัตราความเครียดกับค่าระดับหน่วยแรงเฉือน	8
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Log ของความเครียดกับ Log ของเวลา .....	10
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Log}_e$ ของความเครียดกับค่าระดับหน่วยแรงเฉือน ...	10
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เหลือก่อนการพิบัติโดยครีฟกับอัตราความเครียด (จาก SAITO และ UEZAWA, 1961) .....	13
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียด x เวลา ( $\dot{\epsilon} t$ ) กับ เวลา (จาก SINGH และ MITCHELL, 1969) .....	15
2.7 ความสัมพันธ์ Log ของอัตราความเครียดกับ Log เวลาครีฟของดินเหนียวชั้นดี (จาก FINN และ SHEAD, 1973) .....	15
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Log อัตราความเครียดกับ Log ของเวลาครีฟของดิน เหนียวชั้นดี (จาก FINN และ SHEAD, 1973) .....	17
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Log อัตราความเครียดเร่งกับ Log ของเวลา (จาก FINN และ SHEAD, 1973) .....	17
2.10 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมอันเตนครีฟ เมื่อดินรับหน่วยแรงเพียงเบนค่าคงที่ (จาก MITCHELL และ CAMPANELLA, 1963) .....	20
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดกับหน่วยแรงเพียงเบนระหว่างอันเตน ครีฟเมื่ออุณหภูมิคงที่ (จาก MITCHELL และ CAMPANELLA, 1963) .....	21
2.12 ผลของปริมาณดินเหนียวต่ออัตราความเครียดครีฟ .....	22
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณดินเหนียว Plasticity Index และอัตราความ เครียดครีฟ .....	23
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดตามแนวแกนกับเวลา ครีฟของดินเหนียวชั้นดี เมื่ออัดตัวคายน้ำแบบไอโซทรอปิกและ $K_0$ -แอนไอโซทรอปิก โดยใช้เครื่อง Triaxial และ Plane Strain (จาก CAMPANELLA และ VAID, 1974)	24
3.1 แผนที่แสดงบริเวณที่เก็บตัวอย่างดินทดลอง .....	31

3.2	การแบ่งดินจากตัวอย่างดินทดลองแบบกล่อง (Block Sample) เป็นตัวอย่างดินทดลองในแนวตั้ง (ดินหมวด V) และตัวอย่างดินทดลองในแนวนอน (ดินหมวด H) .....	32
3.3	แสดงลักษณะของชั้นดินเหนือระดับที่เก็บดินตัวอย่าง .....	34
3.4	การจัดเครื่อง Triaxial สำหรับการทดลองอันเดรนครีฟ .....	41
4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c}$ , $\frac{\Delta u}{\sigma_c}$ , A จากการทดลองแบบ CIUC .....	53
4.2	ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล เมื่อดินรับแรงในแนวนอน .....	55
4.3	ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง .....	56
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเบี่ยงเบนกับความเครียด จากการทดลอง CIUC เมื่อดินรับแรงในแนวนอนและในแนวตั้งที่ Insitu Stress ....	58
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเบี่ยงเบนกับความเครียดจากการทดลอง UU .	59
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเบี่ยงเบนกับความเครียดจากการทดลอง UC .	60
4.7	ผลของระดับหน่วยแรง เหนือต่อค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำ เมื่อดินรับแรงในแนวนอนและในแนวตั้งจากการทดลอง CIUC .....	62
4.8	ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลในระหว่างอันเดรนครีฟ เมื่อดินรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ .....	65
4.9	ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลในระหว่างอันเดรนครีฟเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ .....	66
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับ Logarithm ของเวลาเมื่อดินรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ .....	67
4.11	การคาดคะเนค่า "กำลังครีฟ" โดยวิธีของ FINN และ SHEAD (1973) .....	69
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของความเครียดกับ Logarithm ของเวลาเมื่อดินรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ .....	72
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของความเครียดกับ Logarithm ของเวลาเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ .....	73
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของความเครียดกับระดับหน่วยแรงเฉือนเมื่อดินรับแรงในแนวนอน .....	75

รูปที่	หน้า
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของความเครียดกับระดับหน่วยแรงเฉือน เมื่อคืนรับแรงในแนวตั้ง .....	76
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับ Logarithm ของเวลาเมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ .....	78
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับระดับหน่วยแรง เฉือนเมื่อคืนรับแรงในแนวนอน .....	80
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับระดับหน่วยแรง เฉือนเมื่อคืนรับแรงในแนวตั้ง .....	81
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับ Logarithm ของเวลา จาก สมการ (4.9a) และ (4.9b) .....	83
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาในระหว่างอันแทรกครีฟเมื่อคืนรับ แรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ .....	84
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาในระหว่างอันแทรกครีฟเมื่อคืนรับ แรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ .....	85
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับ Logarithm ของเวลาในระหว่าง อันแทรกครีฟเมื่อคืนรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ ...	86
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับ Logarithm ของเวลาในระหว่าง อันแทรกครีฟเมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ ...	87
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำในโพรงกับ Logarithm ของเวลาใน ระหว่างอันแทรกครีฟเมื่อคืนรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ	88
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำในโพรงกับ Logarithm ของเวลาใน ระหว่างอันแทรกครีฟเมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ	89
4.26 เส้นแสดงอัตราความเครียดค่าสูงสุดชั่วคราว ตามวิธีของ FINN และ SHEAD (1973) เมื่อคืนรับแรงในแนวนอน .....	92
4.27 ผลการทดลองอัดตัวคาน้ำในเครื่อง Triaxial เมื่อคืนรับแรงในแนวนอน ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 80 % .....	96

## รูปที่

## หน้า

4.28	ผลการทดลองอัดตัวคายนํ้าในเครื่อง Triaxial เมื่อดินรับแรงในแนวนอน ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 70 % .....	97
4.29	ผลการทดลองอัดตัวคายนํ้าในเครื่อง Triaxial เมื่อดินรับแรงในแนวนอน ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 50 % .....	98
4.30	ผลการทดลองอัดตัวคายนํ้าในเครื่อง Triaxial เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 90 % .....	99
4.31	ผลการทดลองอัดตัวคายนํ้าในเครื่อง Triaxial เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 70 % .....	100
4.32	ผลการทดลองอัดตัวคายนํ้าในเครื่อง Triaxial เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 50 % .....	101
4.33	ผลของค่าระดับหน่วยแรงเฉือนต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคาดคะเนการยุบ ตัวทั้งหมดของดินโดยทฤษฎีอีลาสติก เมื่อดินรับแรงในแนวนอนและในแนวตั้ง	102
4.34	แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายนํ้าเมื่อดินรับแรงใน แนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 80 % .....	105
4.35	แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายนํ้าเมื่อดินรับแรงใน แนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 70 % .....	106
4.36	แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายนํ้าเมื่อดินรับแรงใน แนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 50 % .....	107
4.37	แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายนํ้าเมื่อดินรับแรงใน แนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 90 % .....	108
4.38	แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายนํ้าเมื่อดินรับแรงใน แนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 70 % .....	109
4.39	แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายนํ้าเมื่อดินรับแรงใน แนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 50 % .....	110
4.40	ผลของค่าระดับหน่วยแรงเฉือนต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคาดคะเนการยุบ ตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายนํ้าในสภาพสามมิติโดยทฤษฎีอีลาสติก เมื่อ ดินรับแรงในแนวนอนและในแนวตั้ง .....	111

รูปที่

หน้า

5.1 แสดงผลของระดับหน่วยแรงเฉือนต่อค่าการยุบตัวเมื่อดินรับแรงในแนวนอนและ  
ในแนวตั้ง ..... 116

สัญลักษณ์

(ก) สำหรับฟังก์ชันครีพ

- a = ค่าคงที่จากการอินทิเกรตฟังก์ชันครีพ
- A = ค่าที่ได้จากการต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ฐาน e ของอัตราความเครียดกับค่าระดับหน่วยแรงเฉือนส่วนที่เป็นเส้นตรงเมื่อเวลา  $t = t_1$  (1 นาที) มาตัดแกนของอัตราความเครียด เมื่อระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าเท่ากับศูนย์
- B = ค่าที่ได้จากการต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Lagarithm ฐาน e ของความเครียดกับค่าระดับหน่วยแรงเฉือนส่วนที่เป็นเส้นตรงเมื่อเวลา  $t = t_1$  (1 นาที) ตัดแกนของความเครียดเมื่อระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าเป็นศูนย์
- D = หน่วยแรงเบี่ยงเบน (Deviator Stress) =  $\sigma_1 - \sigma_3$
- $\bar{D}, \Delta$  = ระดับหน่วยแรงเฉือน (Stress Level) =  $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2S_u}$
- $D_{max}$  = ค่าสูงสุดของหน่วยแรงเบี่ยงเบน
- m = ความลาดของเส้นตรงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับ Logarithm ของเวลา
- $\lambda$  = ความลาดของเส้นตรงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของความเครียดกับ Logarithm ของเวลา
- $\bar{\alpha}$  = ความลาดของส่วนที่เป็นเส้นตรงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับค่าระดับหน่วยแรงเฉือน
- $\beta$  = ความลาดของส่วนที่เป็นเส้นตรงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของความเครียดกับค่าระดับหน่วยแรงเฉือน
- $\epsilon$  = ความเครียด (Strain)
- $\epsilon_1$  = ความเครียดเมื่อเวลา 1 หน่วย (1 นาที)
- $\dot{\epsilon}$  = อัตราความเครียด (Strain Rate)
- $\dot{\epsilon}_a$  = อัตราความเครียดเร่ง (Accelerating Strain Rate)

- $\dot{\epsilon}_m$  = อัตราความเครียดต่ำสุดชั่วครู่ (Transient Minimum Strain Rate)
- $t$  = เวลาใด ๆ
- $t_1$  = 1 หน่วยเวลา เช่น 1 นาที 1 ชั่วโมง
- $t_e$  = เวลาที่เกิดอัตราความเครียดต่ำสุดชั่วครู่
- $t_f$  = เวลาถึงพิบัติ (Time to Failure)
- $t_r$  = เวลาที่เหลือก่อนการพิบัติโดยครีฟ (Remaining Time to Rupture)

(ข) สัญลักษณ์อื่น ๆ

- $A, B$  = พารามิเตอร์ของความดันน้ำในโพรงของ SKEMPTON
- $\sigma_{vo}$  = หน่วยแรงรวมในแนวตั้งตามธรรมชาติ (Total Over-burden Pressure)
- $\sigma_c$  = ความดันในเซลล์ (Cell Pressure)
- $\bar{\sigma}_{vo}$  = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งตามธรรมชาติ (Effective Over-burden Pressure)
- $\bar{\sigma}_c$  = ความดันประสิทธิผลในเซลล์ (Effective Cell Pressure)
- $\sigma_1, \bar{\sigma}_1$  = หน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก
- $\sigma_3, \bar{\sigma}_3$  = หน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผลรอง
- $\bar{p}$  =  $(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3) / 2$
- $q$  =  $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$
- $\bar{a}$  = ค่าที่เส้นเอนเวอล็อปของหน่วยแรงประสิทธิผลที่พิบัติตัดแกน  $q$  จาก  $\bar{p}$ - $q$  plot
- $\bar{\alpha}$  = มุมลาดเอียงเส้นเอนเวอล็อปของหน่วยแรงประสิทธิผลที่พิบัติจาก  $\bar{p}$ - $q$  plot
- $U_b$  = ความดันน้ำในตัวอย่างคอนแรก (Back Pressure)
- $u$  = ความดันน้ำในโพรง (Pore Water Pressure)
- $S_u$  = กำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรน (Undrained Shear Strength)
- $E_u$  = โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Modulus of Elasticity)
- $\nu_u$  = อัตราส่วนปัวซองในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Poisson's Ratio)

$E_{50}$	=	โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นที่ 50 % ของหน่วยแรงเบี่ยงเบน
$E'$	=	โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพระบายน้ำ (Drained Modulus of Elasticity)
$\nu'$	=	อัตราส่วนปริมาตรของในสภาพระบายน้ำ (Drained Poisson's Ratio)
$W_i$	=	ปริมาณความชื้นเริ่มแรก (Initial Water Content)
$W_f$	=	ปริมาณความชื้นท้ายสุด (Final Water Content)
$W_L$	=	ขีดเหลว (Liquid Limit)
$W_p$	=	ขีดพลาสติก (Plastic Limit)
PI	=	Plastic Index
OCR.	=	Over Consolidation Ratio
$\gamma_t$	=	ความหนาแน่น (Total Density)

## (ค) ชนิดของการทดลอง

$\overline{CIUC}$	=	การหาค่าลึงรับแรงเฉือนของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทรอปิกมาก่อนด้วยเครื่อง Triaxial ในสภาพอันเดรนพร้อมวัดค่าความดันน้ำในโพรง (Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with Pore Pressure Measurement)
UU	=	การหาค่าลึงรับแรงเฉือนของดินที่ไม่ถูกอัดตัวคายน้ำมาก่อนในสภาพอันเดรน (Unconsolidated Undrained Compression Test)
UC	=	การหาค่าลึงรับแรงเฉือนของดินแบบอิสระด้านข้าง (Unconfined Compression Test)