

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับค่าความหนืดของดินเหนียว



นายสุธี มุกดาดีลก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4464-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RELATIONSHIP BETWEEN SHEAR STRENGTH AND VISCOSITY OF CLAY



Mr. Sutee Mukdadilok

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 2003

ISBN 974-17-4464-1


หัวข้อวิทยานิพนธ์      ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับค่าความเหนียว  
โดย                              นาย สุธี มุกดาดีลัก  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏชน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรัักษ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏชน)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(Dr. Tian Ho Seah)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.จิรวัตถ์ บุญญะฐิติ)

สุธี มุกดาติลก : ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับค่าความหนืดของดินเหนียว (RELATIONSHIP BETWEEN SHEAR STRENGTH AND VISCOSITY OF CLAY) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน, 131 หน้า. ISBN 974-17-4464-1..

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความหนืดของดินเหนียว การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนดำเนินการทดสอบ 2 วิธี คือการทดสอบแบบกรวยตกและทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ การหาค่าความหนืดดำเนินการทดสอบ 2 วิธี คือจากเครื่องมือ Baroid Rheometer และเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer ดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบเก็บมาจาก สนามบินหนองงูเห่าและนนทบุรี และดินเหนียว Kaolin ได้นำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมการทดสอบด้วย เครื่องมือทดสอบกรวยตกแบบมาตรฐานได้ถูกปรับปรุงเพื่อให้สามารถวัดค่าระยะจมของหัวกรวยได้อย่างต่อเนื่องกับเวลา งานวิจัยนี้ยังศึกษาค่าต่างๆที่มีผลกระทบต่อกรวยตกกรวยตก เช่น น้ำหนักกรวย, วัสดุที่ใช้ทำกรวย, มุมของหัวกรวย และขนาดของถ้วยใส่ดิน นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้ปรับปรุงวิธีการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีดูดอากาศออก เพื่อให้สามารถควบคุมความเป็นเนื้อเดียวกันและความสม่ำเสมอของตัวอย่าง

ผลการทดสอบกรวยตกแสดงให้เห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของหัวกรวยกับเวลาแบ่งเป็นพฤติกรรมทาง Kinematics และ Creep ที่ช่วงเวลาในการตกประมาณ 5 วินาที นอกจากนี้การศึกษาค่าผลกระทบต่อถ้วยใส่ดินในการทดสอบกรวยตกแบบอิสระพบว่า ขนาดของถ้วยใส่ดินที่เหมาะสมคือมี เส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มม. และความลึก 40 มม.เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าวัสดุที่ใช้สำหรับทำหัวกรวยมีผลกระทบต่อระยะการจมของหัวกรวยเนื่องมาจากแรงเสียดทานของผิว ที่สัมผัสกับดินเหนียวที่ทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบได้ดำเนินการทดสอบที่ค่าปริมาณความชื้นที่ใกล้เคียงกับปกติ ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบและปริมาณความชื้น(ดัชนีเหลว)ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

ผลการทดสอบกรวยตกเปรียบเทียบกับทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ ได้นำเสนอ ค่า K ซึ่งพบว่ามีความใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาแล้ว

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสมการเชิงประสพประการณ์ของความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับสัมประสิทธิ์ความหนืดจากการทดสอบความหนืดของดินเหนียวแปลงสภาพ ช่วงของปริมาณความชื้นของสมการที่นำเสนอจะอยู่ในช่วงแคบ เนื่องมาจากการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนที่มีค่าต่ำมากจะกระทำได้อย่างยากเมื่อใช้ด้วยการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอข้อแนะนำวิธีการเพิ่มช่วงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับความหนืดให้เพิ่มมากขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2546.....



## 4470606321: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: CLAYS / SHEAR STRENGTH / VISCOSITY/ K / SALT CONTENT

SUTEE MUKDADILOK : RELATIONSHIP BETWEEN SHEAR STRENGTH AND VISCOSITY OF CLAY. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. BOONCHAI UKRITCHON, Sc.D., 131 pp. ISBN 974-17-4464-1.

The primary objective of the thesis is to study the relationship between the undrained shear strength and the viscosity of clay. Two methods of determining the undrained shear strength were used; they were fall cone and laboratory vane shear tests. For viscosity measurements, two methods were selected, including baroid rheometer and marsh funnel tests. Soft clay samples were taken from the New Bangkok Airport and Nonthaburi, and Kaolin was also used as part of the research program. The standard fall cone apparatus was modified, enabling continuous recording of cone penetration with time. Several influencing parameters on the cone, such as cone weight, cone material, apex angle as well as container size, were investigated. An improved method of preparing the samples for testing by means of vacuum was developed with better control of sample homogeneity and uniformity.

The fall cone test results indicated that there was a distinct break in the penetration-time curve, separating the kinematics and creep behavior at approximately 5 seconds period. In addition, the container has a significant influence on the freedom of cone penetration; a minimum container diameter of 76 mm with depth of 40 mm should be used in the standard testing. It was also concluded that the material used for the cone had some effect on the penetration depth due to its adhesion properties with clayey sample.

The laboratory vane shear tests were conducted at water content close to the liquid limit. A relationship between the undrained shear strength from the vane test and water content (or liquidity index) was established.

The results from the fall cone and laboratory vane shear were compared, and the cone factor, K, was determined with values close to published data.

The relationship of undrained shear strength and coefficient of viscosity from the viscosity test was also established for the remolded clay, providing some empirical equations. The range of water content in the test was relatively narrow due to difficulty in measuring the low undrained shear strength in the vane shear tests. Recommendations have been provided to extend the overlapping range in these tests.

Department ..... Civil Engineering ..... Student's signature..... *S. E. L.*  
Field of study..... Civil Engineering ..... Advisor's signature..... *Boonchai Ukritchon*  
Academic year ..... 2003 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏานัน ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง ตรวจสอบ ตลอดจนปรับปรุง แก้ไขวิทยานิพนธ์นี้

Dr. Seah Tian Ho ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำชี้แนะวิธีการทดสอบ และ ให้ยืมเครื่องมือทดสอบ ตลอดจนได้ปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาใช้เวลา และให้คำแนะนำ รวมทั้งให้ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

มหาวิทยาลัย Asia Institutes of Technology (AIT) ที่ได้ให้คำชี้แนะวิธีการทดสอบ และ ให้ยืมเครื่องมือทดสอบ

ผู้เขียนขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนตลอดจนเจ้าหน้าที่วิจัยรัฐพีทศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความร่วมมือ และ ช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนปรารถนาที่จะแสดงความรำลึกถึงพระคุณของบิดาและมารดา ที่ได้ให้ ความสนับสนุน และเป็นกำลังใจแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษาในระดับนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 คำนำ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength of Soil) 5	
2.1.1 การทดสอบแบบกรวยตก (Fall Cone Test).....	5
2.1.2 การทดสอบ Laboratory Vane Shear Test.....	22
2.2 การทดสอบ ความหนืด (Viscosity) ของดินเหนียว.....	22
บทที่ 3 วิธีการทดสอบและวิจัย .....	33
3.1 ตัวอย่างดินเหนียว3ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ .....	33
3.1.1 ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.....	33
3.1.2 ตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี.....	33
3.1.3 ตัวอย่างดินเหนียว Kaoline.....	33
3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางเคมีของดิน .....	35
3.3 โปรแกรมการทดสอบ.....	35

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3.1 ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยเครื่องมือกรวยตก (Fall Cone Test) .....	35
3.3.2 ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธี การทดสอบแรงเฉือน ด้วยใบพัดในห้องทดสอบ (Laboratory Vane Shear Test) .....	36
3.3.3 ทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียว (Viscosity Test) .....	36
3.4 การหาลำดับรับแรงเฉือนด้วยเครื่องมือกรวยตก (Fall Cone Test) .....	38
3.4.1 เครื่องมือทดสอบ .....	38
3.4.1.1 ถ้วยใส่ดิน (Container) .....	38
3.4.1.2 เครื่องมือทดสอบกรวยตก (Fall Cone Apparatus) .....	38
3.4.1.3 หัวกรวยตก (Cone Head) .....	41
3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ .....	42
3.4.1.1 ขั้นตอนการทดสอบด้วยเครื่องมือกรวยตก (Fall Cone Test) .....	38
3.4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรง เฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ (Laboratory Vane Shear Test) .....	45
3.4.1.3 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความหนืด (Viscosity Test) .....	48

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล .....	51
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของดิน.....	51
4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน .....	51
4.1.2 ผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมี .....	51
4.2 เปรียบเทียบผลกระทบของอุปกรณ์และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ	
Fall Cone Test.....	53
4.2.1 ศึกษาผลกระทบเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทดสอบ	
Fall Cone Test.....	53
4.2.2 ศึกษาผลกระทบเนื่องจากขนาดถ้วยใส่ดิน	
ของเครื่องมือ Fall Cone Test .....	57
4.2.3 ศึกษาผลกระทบเนื่องจากความลึกของถ้วยใส่ดิน	
(Depth of Container) ของเครื่องมือ Fall Cone Test.....	60
4.2.4 ศึกษาผลกระทบเนื่องจากพื้นผิวของหัวกรวย	
(Roundness of Cone).....	61
4.3 การทดสอบ Fall Cone Test เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะจม	
(Cone Penetration) กับ Water Content .....	66
4.4 ทดสอบเครื่องมือหาค่ากำลังแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ	
(Laboratory Vane Shear Test).....	71
4.4.1 ศึกษาผลจากเปลี่ยนค่า Water Content กับกำลังรับแรงเฉือน.....	71
4.4.2 ศึกษาผลจากเปลี่ยนค่า Salt Content กับกำลังรับแรงเฉือน .....	77
4.5 เปรียบผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของเครื่องมือกรวยตก	
(fall Cone Test) กับเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ	
(Laboratory Vane Shear Test).....	81
4.5.1 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือน เพื่อหาค่า K ของเครื่องมือกรวย	
ตก (Fall Cone Apparatus) .....	81
4.5.2 เปรียบเทียบค่า K ของจากหัวกรวยตก (Cone Head) น้ำหนักต่างกัน	
แต่มุมเท่ากันที่ 30° .....	87

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.5.3 เปรียบเทียบค่า K ของจากมุมหัวกรวยตก (Cone Angle) ที่แตกต่างกันที่ 30°, 60°, 90° .....	91
4.6 ทดสอบเครื่องมือหาค่าความหนืด (Viscosity Test).....	100
4.6.1 ศึกษาผลจากเปลี่ยนค่า Water Content กับค่าความหนืด ด้วยเครื่องมือทดสอบ Marsh Funnel Viscometer.....	100
4.6.2 ศึกษาผลจากเปลี่ยนค่า Water Content กับค่าความหนืด (Viscosity) ด้วยเครื่องมือทดสอบ Hand-Crank Viscometer.....	107
4.7 นำผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength, $c_u$ ) เปรียบเทียบกับค่าความหนืด (Viscosity, $\eta$ ).....	113
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ .....	118
5.1 สรุปผลการทดสอบ .....	118
5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม .....	120
รายการอ้างอิง.....	121
ภาคผนวก ..... ศูนย์วิทยพัชกร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	124
ภาคผนวก ก. การ Calibrated Linear Vertical Displacement Transformer type Free Fall.....	125
ภาคผนวก ข. วิธีการทดสอบ Properties ของตัวอย่างดินเหนียว.....	129
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	131

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ทดสอบแบบกรวยตก (Fall Cone Test) จาก BS 1377 .....6
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมกับกำลังรับแรงเฉือน จาก Youssef et al. ( 1965)..... 8
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมกับปริมาณความชื้น จาก Youssef et al. (1965) (ต่อ).....8
2.4	ขอบเขตของค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าดัชนีความเหลวของดินเหนียว โดย Skempton Northley (1953) ..... 11
2.5	ทฤษฎีการเคลื่อนตัวของ Fall Cone: Normalized Penetration versus Normalized Time And Normalized velocity โดย Zreik (1995) ..... 13
2.6	เครื่องมือ Fall Cone แบบใหม่ ที่ใช้ระบบ Counterweight โดย Zreik (1995)..... 14
2.7	ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับค่า Liquidity Index โดย Zreik (1995)..... 16
2.8	ความสัมพันธ์ของระยะกรวยที่จมกับ Water Content โดย Feng, T.W. (2000) ..... 17
2.9	Schematic Dyagram ของการทดสอบกรวยตก โดย Koumoto(2001).....20
2.10	การเปลี่ยนแปลงค่า K ของการทดสอบ Fall Cone โดย Koumoto(2001).....20
2.11	เครื่องมือ Laboratory Vane Shear Test .....23
2.12	เครื่องมือ Marsh Funnel ทดสอบความหนืดตามมาตรฐาน API RP 13B Section 2).....23
2.13	เครื่องมือ Hand-Crank Viscometer ทดสอบความหนืดตามมาตรฐาน API RP 13B, I , Section 3 .....24
2.14	ความสัมพันธ์ของ ค่าความชื้นกับค่ากำลังรับแรงเฉือน โดย Bentley (1979) .....25
2.15	ความสัมพันธ์ของ pH กับ Yield Stress สำหรับดิน Gloucester โดย Bentley (1979).....26
2.16	(a) ดินเหนียว South Nation และ (b) ดินเหนียว St. Leon le Ground ใน sodium-saturated state โดยเปลี่ยนแปลง ค่าความเค็มและค่าความชื้น โดย Torrance (1987) ..28
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่าง Yield Stress ซึ่งหาค่าโดยใช้วิธีทดสอบค่าความหนืด และ ค่ากำลังรับแรงเฉือนซึ่งใช้วิธีกรวยตกในการทดสอบ (a) Na-saturated, (b) citrate-dithionite extracted และ Na-saturate (c) acid-base extracted และ Na-saturated, (d) Ca-saturated โดย Torrance (1987) .....29
2.18	ชนิดของการไหลแบบต่างๆ (1) Newtonian (2) thickening (3) fluidizing (4) Casson (5) Bingham โดย Locat (1988).....30
2.19	ความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity และ yield Stress โดย Locat (1988) ..... 31



## สารบัญรูป (ต่อ)

๗

รูปที่	หน้า
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ yield Stress โดย Locat (1988).....	31
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ Viscosity โดย Locat (1988)	32
2.22 ความสัมพันธ์ของ Yield Stress และ Remoulded Shear Strength โดย Locat (1988)	32
3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมเจาะ .....	34
3.2 ถ้วยใส่ดิน (Container)+ฝาปิด ที่ทำมาจาก PVC .....	39
3.3 การเตรียมตัวอย่างดิน และการดูอากาศเพื่อควบคุมคุณภาพของตัวอย่าง .....	40
3.4 เครื่องมือทดสอบแบบกรวยตก ปรับปรุงใหม่(Fall Cone Apparatus) .....	40
3.5 หัวกรวยมุม 90°, 60°, 30° ตามลำดับด้วยวัสดุ Plastic และอันสุดท้ายคือ หัวกรวยแบบ มาตรฐานขนาด 30° ด้วยวัสดุ Stainless.....	41
3.6 หัวกรวย Plastic 30° (1) ไม่ได้เคลือบสารหล่อลื่น (2) เคลือบสารหล่อลื่น .....	41
3.7 เครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำด้วยอัตราเครียดคงที่ (แบบการระบายน้ำในแนวตั้ง) ..	41
3.8 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบใบพัดในห้องทดสอบ (Laboratory Vane Shear Test) .....	46
3.9 เครื่องมือทดสอบ Marsh Funnel Viscometer ตามมาตรฐาน API RP 13 B Section 2 .	50
3.10 เครื่องมือ Baroid Rheometer หรือ Hand-Crank Viscometer ตามมาตรฐาน API RP 13 B ,I Section 2 .....	50
4.1 แสดงระยะที่จมของกรวย (Vertical Displacement, mm.) เปรียบเทียบกับเวลา (Time, sec) ของดิน นนทบุรี ที่ค่า Water Content 58.35 %.....	54
4.2 ทฤษฎีการเคลื่อนตัวทาง Dynamic ของ Fall Cone Test โดยแสดงเป็น Normalized penetration กับ Normalized Time โดย Hansbo (1957) .....	54
4.3 แสดงเปรียบเทียบที่ช่วงเวลา 0-5 วินาที ของการตกของหัวกรวย เมื่อเทียบกับทฤษฎี Dynamic Fall Cone .....	55
4.4 แสดงการเกิด Creep ของ Fall Cone ที่ช่วงเวลาต่างๆ กัน เมื่อเทียบกับทฤษฎี Dynamic Fall .....	56
4.5 แสดงเปรียบเทียบขนาดของถ้วยใส่ดิน (Size of Container) ขนาด 2", 3" และ 4" โดย plot เปรียบเทียบระหว่าง ระยะที่จมของหัวกรวย (Penetration) กับ Water Content ของดิน นนทบุรี .....	58



## สารบัญรูป (ต่อ)

๕๗

รูปที่	หน้า
4.6	แสดงผลกระทบเนื่องจากการเกิด Heave และ Slip Line เพื่อหาขนาดของถ้วยใส่ดิน (size of Container) ของ Houlsby(1982) ..... 58
4.7	แสดงผลกระทบจาก Mesh of Failure ของถ้วยใส่ดิน (size of Container) 2", 3" และ 4" ..... 59
4.8	แสดงเปรียบเทียบขนาดของถ้วยใส่ดิน (Size of Container) ความลึก 4, 6, 8, 10 เซนติเมตร โดย plot เปรียบเทียบระหว่าง ระยะที่จมของหัวกรวย (Penetration) กับ Water Content ของดิน นนทบุรี ..... 61
4.9	แสดงเปรียบเทียบหัวกรวยมาตรฐาน, หัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่น, หัวกรวย Plastic ที่ไม่เคลือบสารหล่อลื่น โดยใช้หัวกรวยขนาด 30° หนัก 80 กรัม ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า Water Content 63.72 %..... 62
4.10	แสดงเปรียบเทียบหัวกรวยมาตรฐาน, หัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่น, หัวกรวย Plastic ที่ไม่เคลือบสารหล่อลื่น โดยใช้หัวกรวยขนาด 30° หนัก 80 กรัม ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า Water Content 71.37 %..... 62
4.11	แสดงเปรียบเทียบหัวกรวยมาตรฐาน, หัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่น, หัวกรวย Plastic ที่ไม่เคลือบสารหล่อลื่น โดยใช้หัวกรวยขนาด 30° หนัก 80 กรัม ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า Water Content 84.15 %..... 63
4.12	แสดงเปรียบเทียบหัวกรวยมาตรฐาน, หัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่น, หัวกรวย Plastic ที่ไม่เคลือบสารหล่อลื่น โดยใช้หัวกรวยขนาด 30° หนัก 80 กรัม ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า Water Content 86.61 %..... 63
4.13	แสดงค่า error ของหัวกรวยที่เคลือบสารหล่อลื่น กับ ไม่เคลือบสารหล่อลื่น ที่ค่า Water Content ต่างๆ กัน ..... 65
4.14	แสดงค่า Water Content (%) กับ ระยะจมของหัวกรวยหัวกรวยมาตรฐาน (Penetration d, mm.) ของตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี และตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า ใน scale Log-Log..... 67
4.15	แสดงค่า Water Content (%) กับ ระยะจมของหัวกรวยหัวกรวย (Penetration d, mm.) ของตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี และตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Feng, T.W. (2000)..... 67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงค่า Water Content (%) กับ ระยะจมของหัวกรวยหัวกรวย (Penetration d, mm.) ของตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี และตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Skempton & Northey (1953).....	68
4.17 แสดงค่า Water Content (%) กับ ระยะจมของหัวกรวยหัวกรวย (Penetration d, mm.) ของตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี และตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Karlsson (1961).....	68
4.18 แสดงค่า Water Content (%) กับ ระยะจมของหัวกรวยหัวกรวย (Penetration d, mm.) ของตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี และตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Wood (1985).....	69
4.19 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ ค่าปริมาณค่าชั้นของดิน (Water Content, %) ของดินเหนียวหนองงูเห่า .....	73
4.20 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ ค่าปริมาณค่าชั้นของดิน (Water Content, %) ของดินเหนียวนนทบุรี.....	73
4.21 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ ค่าปริมาณค่าชั้นของดิน (Water Content, %) ของดินเหนียว Kaoline .....	74
4.22 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ ค่าปริมาณค่าชั้นของดิน (Water Content, %) ของดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียวนนทบุรี, ดินเหนียว Kaoline ..	74
4.23 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ Liquidity Index ของดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียวนนทบุรี, ดินเหนียว Kaoline .....	75
4.24 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ Water Content (%) ใน Log-Log scale ของดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียวนนทบุรี, ดินเหนียว Kaoline .....	75
4.25 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ Liquidity Index ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียวนนทบุรี เปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จาก Skempton Northley (1953).....	76
4.26 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ Liquidity Index ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียวนนทบุรี เปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จาก with Zreik(1995), Leroueil et al.(1983), Locat&Derners (1988).....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 แสดงค่า Water Content (%) กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength, kPa) ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่า Salt Content ที่ 40 g/L, 20 g/L และ 10 g/L .....	79
4.28 แสดงค่า Water Content (%) กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength, kPa) ของตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่า Salt Content ที่ 40 g/L, 20 g/L และ 10 g/L.....	79
4.29 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa)กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) ทดสอบกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า.....	84
4.30 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa)กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) ทดสอบกับตัวอย่างดินนนทบุรี .....	84
4.31 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ $\frac{W}{d^2}$ (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินหนองงูเห่า .....	86
4.32 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ $\frac{W}{d^2}$ (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินนนทบุรี.....	86
4.33 ค่า Water Content ( $w_n$ , %) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) ทดสอบกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหัวกรวย.....	88
4.34 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) ทดสอบกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหัวกรวย .....	88
4.35 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) ทดสอบกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหัวกรวย ใน Scale Log-Log .....	89
4.36 ค่าระยะจมของหัวกรวยที่พิกัดเหลว (Penetration @ Liquid Limit, d) กับน้ำหนักของหัวกรวยที่แตกต่างกัน (Cone Weight, W).....	89
4.37 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ $\frac{W}{d^2}$ (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยใช้หัวกรวยหนัก 22.5 กรัม มุม 30° .....	90



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ $\frac{W}{d^2}$ (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินเหนืองูเห่า โดยใช้หัวกรวยหนัก 13.5 กรัม มุม $30^\circ$ .....	91
4.39 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) สำหรับตัวอย่างดินเหนืองูเห่า โดยใช้หัวกรวย มุม $60^\circ$ หนัก 80กรัม.....	93
4.40 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) สำหรับตัวอย่างดินเหนืองูเห่า โดยใช้หัวกรวย มุม $90^\circ$ หนัก 80 กรัม.....	93
4.41 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) สำหรับตัวอย่างดินนทบุรี โดยใช้หัวกรวย มุม $60^\circ$ หนัก 80 กรัม.....	94
4.42 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) สำหรับตัวอย่างดินนทบุรี โดยใช้หัวกรวย มุม $90^\circ$ หนัก 80 กรัม.....	94
4.43 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) ในกราฟ Log-Log สำหรับตัวอย่างดินเหนืองูเห่า โดยใช้ หัวกรวยมุม $60^\circ$ หนัก 80กรัม.....	95
4.44 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) ในกราฟ Log-Log สำหรับตัวอย่างดินเหนืองูเห่า โดยใช้ หัวกรวยมุม $90^\circ$ หนัก 80 กรัม.....	95
4.45 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) ในกราฟ Log-Log สำหรับตัวอย่างดินนทบุรี โดยใช้ หัวกรวยมุม $60^\circ$ หนัก 80 กรัม.....	96
4.56 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) ในกราฟ Log-Log สำหรับตัวอย่างดินนทบุรี โดยใช้ หัวกรวยมุม $90^\circ$ หนัก 80 กรัม.....	96



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ $\frac{W}{d^2}$ (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินเหนืองูเห่า โดยใช้มุม $60^\circ$ หัวกรวยหนัก 80 กรัม.....	98
4.48 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ $\frac{W}{d^2}$ (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินเหนืองูเห่า โดยใช้มุม $90^\circ$ หัวกรวยหนัก 80 กรัม.....	98
4.49 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ $\frac{W}{d^2}$ (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินนทบุรี โดยใช้มุม $60^\circ$ หัวกรวยหนัก 80 กรัม.....	99
4.50 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa) กับ $\frac{W}{d^2}$ (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินนทบุรี โดยใช้มุม $60^\circ$ หัวกรวยหนัก 80 กรัม.....	99
4.51 แสดงค่า Water Content (%) กับ Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) ของตัวอย่างดินนทบุรี ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer.....	101
4.52 แสดงค่า Water Content (%) กับ Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) ของตัวอย่างดินเหนืองูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer.....	102
4.53 แสดงค่า Water Content (%) กับ Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) ของตัวอย่างดินนทบุรีและเหนืองูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer.....	103
4.54 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของตัวอย่างดินนทบุรี ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer.....	104
4.55 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของตัวอย่างดินเหนืองูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer.....	104
4.56 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของตัวอย่างดินเหนืองูเห่าและ ตัวอย่างดินนทบุรี ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer.....	105
4.57 แสดงการแปลงหน่วยของค่าความหนืด ในหน่วย วินาที (second) เป็น mPa-s.....	106
4.58 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index ของตัวอย่างดินนทบุรี ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer.....	108
4.59 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index ของตัวอย่างดินเหนืองูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer.....	109

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.60 แสดงเปรียบเทียบค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของตัวอย่างดินนันทบุรี และ ตัวอย่างดินหนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer	110
4.61 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของ ตัวอย่างดินนันทบุรี ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer.....	111
4.62 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของ ตัวอย่างดินหนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer .....	111
4.63 แสดงการเปรียบเทียบค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของ ตัวอย่างดินนันทบุรีกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer.....	112
4.64 แสดงผลการทดสอบค่า Water Content (%) กับค่าระยะจมของหัวกรวย (Cone Penetration d,mm.) โดยใช้หัวกรวยขนาด 30° หนัก 80 g, 22.5 g, 13.5 g และค่าความหนืด (Viscosity $\eta$ , mPa-s).....	114
4.65 แสดงผลการทดสอบค่า Liquidity Index กับค่าระยะจมของหัวกรวย (Cone Penetration d,mm.) โดยใช้หัวกรวยขนาด 30° หนัก 80 g, 22.5 g, 13.5 g และค่าความหนืด (Viscosity $\eta$ , mPa-s) ตัวอย่างดินหนองงูเห่า.....	115
4.66 แสดงระยะที่จม (Penetration d,mm.)ของกรวย 30° หนัก 80 g, 22.5 g และ 13.5 g กับค่าความหนืด (Viscosity, $\eta$ ) สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า.....	116
4.67 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength $c_u$ , kPa)กับค่าความหนืด (Viscosity, $\eta$ )ของกรวย 30° หนัก 22.5 g และ 13.5 g สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า.....	117

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าของแรงในแนวตั้ง (P) สำหรับหั่วกรวย: Hansbo(1957) .....	11
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่า K โดย Zreik (1995) .....	15
ตารางที่ 2.3 ข้อมูลแสดงเวลาในการตกจาก Automated fall cone โดย Zreik (1995)	15
ตารางที่ 2.4 ค่า c และ m ของดินเหนียวจากค่า strength ratio 50, 100 และ 2000 โดย Feng, T.W. (2000) .....	18
ตารางที่ 2.5 คำนวณค่า $N_{ch}$ , $\delta$ และ $\lambda$ สำหรับช่วงของ $\beta$ และ $\alpha$ โดย Koumoto(2001)	21
ตารางที่ 2.6 ตาราง 2.6 ค่า K สำหรับการเปลี่ยนแปลง $\beta$ โดย Koumoto(2001)	21
ตารางที่ 2.7 ข้อมูลทั่วไปของดินที่ใช้ทดสอบ โดย Torrance (1987).....	29
ตารางที่ 2.8 ข้อมูล Atterberg Limits ของดินเหนียวที่มี sodium-saturated, ค่าความเค็มสูง โดย Torrance (1987)	30
ตารางที่ 3.1 โปรแกรมการทดสอบ .....	37
ตารางที่ 3.1 การสอบเทียบค่าสปริงที่ใช้ทดสอบ .....	47
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และเคมีของดินเหนียวธรรมชาติ .....	52
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าระยะ OB จากรูปที่ 4.7 เมื่อเกิดผลกระทบจาก $a_v/c_v$ และ Heave ที่ทำให้ค่า OB เปลี่ยนไป .....	59
ตารางที่ 4.3 แสดงระยะจมของหั่วกรวยที่เวลา 5 วินาที.....	65
ตารางที่ 4.4 แสดงค่า c และ m จากสมการของ Feng, T.W. (2000).....	70
ตารางที่ 4.5 แสดงค่า Liquid Limit และ Plastic Limit ที่ค่า Salt Content 10 g/L, 20 g/L และ 40 g/L.....	80
ตารางที่ 4.6 แสดงค่า K จากการคำนวณสมการที่ 4.2 ที่มุมหั่วกรวยต่างกัน .....	83
ตารางที่ 4.7 สรุปค่า K ที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา.....	85