

พฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนและความหนืดของดินโคลน

นายวศิน เหลืองชนนารถ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SHEAR STRENGTH AND VISCOSITY BEHAVIORS OF SLURRY CLAY

Mr. Wasin Luanghotchanart

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

490781

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนและความหนืดของดินโคลน

โดย

นายวศิน เหลืองคชนารถ


สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

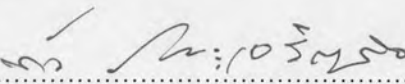
อาจารย์ที่ปรึกษา

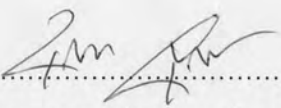
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

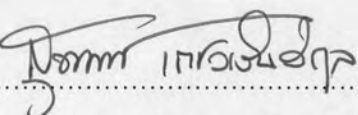

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

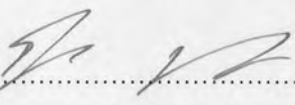
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(Tian Ho Seah, Sc.D)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัด บุญญะฐิติ)

วาทิน เหลืองคนารถ: พฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือน และความหนืดของดินโคลน (SHEAR STRENGTH AND VISCOSITY BEHAVIORS OF SLURRY CLAY) อ. ที่ปรึกษา: รศ. ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน, 90หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนกับความหนืดของดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวที่ใช้เก็บมาจากบริเวณถนนพระราม 9 การเตรียมตัวอย่างกระทำโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เพื่อควบคุมคุณภาพดินเหนียวให้มีเม็ดกรวดและทรายปน การหาลำกำลังเฉือนทดสอบด้วยเครื่องทดสอบหาลำกำลังเฉือนแบบใบพัดในห้องปฏิบัติการ พารามิเตอร์ที่ศึกษาประกอบด้วย ขนาดของใบพัดที่ใช้เฉือนดิน อัตราเร็วในการหมุนของใบพัด และความชื้นของดิน การหาค่าความหนืดทดสอบด้วยเครื่อง Rotational Viscometer ออกแบบตามมาตรฐาน ASTM C1276 พารามิเตอร์ที่ศึกษาประกอบด้วย อัตราเร็ว ความชื้นของดิน การสอบเทียบเครื่องมือนี้กระทำกับวัสดุมาตรฐาน คือน้ำมันเครื่องเกรด SAE30 และ SAE50 โดยนำมาหาค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Model DV-III ผลการสอบเทียบเครื่องประดิษฐ์ใหม่นี้มีค่า Shape Factor, K เท่ากับ 0.0022236

การทดสอบหาลำกำลังเฉือนในดินเหนียว กระทำกับดินที่ความชื้นอยู่ในช่วงระหว่าง 75% - 125% หรือดัชนีเหลวเท่ากับ 1.2 - 2.5 และอัตราเร็วในการหมุนประมาณ 46 - 278 องศา/นาที ได้มีการประเมินผลออกเป็น 2 ค่าคือ Peak shear strength และ Residual shear strength การวิเคราะห์ผลเลือกใช้ Residual shear strength พบว่ากำลังเฉือน (c_u) มีความสัมพันธ์กับดัชนีเหลว (liquidity index, LI.) แบบปฏิภาคผกผัน โดยได้สมการความสัมพันธ์คือ $c_u = 10.41 \cdot LI^{-4.45}$, $R^2 = 97.86\%$ โดยอัตราเร็วในการหมุน และขนาดของใบพัดไม่มีผลต่อกำลังเฉือนของดินเหนียว

การทดสอบหาค่าความหนืดในดินเหนียว ที่มีความชื้นอยู่ในช่วงระหว่าง 85% - 140% หรือดัชนีเหลว (LI.) เท่ากับ 1.5 - 3.0 และความเร็วในการหมุน (N) ประมาณ 0.4 - 40 รอบต่อนาที ความหนืด (η) มีความสัมพันธ์กับดัชนีเหลวแบบปฏิภาคผกผัน โดยสมการความสัมพันธ์คือ $\eta = 1.95 \times 10^4 \cdot LI^{0.9816} \cdot N^{-0.937}$, $R^2 = 97.1\%$ ผลการทดสอบแสดงว่าความหนืดมีค่าลดลงเมื่ออัตราเร็วเพิ่มขึ้น จากทฤษฎีของไหลสามารถสรุปได้ว่า ดินเหนียวเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น ของไหลแบบนอนนิวทอนเนียน คล้ายกับประเภทลูโดพลาสติก แต่มีความเด่นคลากเริ่มต้นค่าหนึ่ง กำลังเฉือนและความหนืดมีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคโดยตรงกัน โดยได้สมการความสัมพันธ์คือ $\eta = 1.96 \times 10^3 \cdot c_u^{0.9816} \cdot N^{-0.937}$

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต..... ว.ว.น. เหลืองคนารถ.....
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา..... 2549.....

4670482021: MAJOR CIVIL ENGINEERING

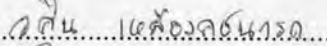
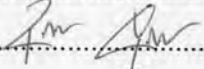
KEY WORD: CLAYS / SHEAR STRENGTH / VISCOSITY

WASIN LUANGKHOTCHANART : SHEAR STRENGTH AND VISCOSITY BEHAVIORS OF SLURY CLAY. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. BOONCHAI UKRITCHON, Sc.D., 90 pp.

The objective of this thesis is to study the relationship between undrained shear strength and viscosity of soft clay. The clay sample was collected from Phra Ram 9 Road. Preparation of sample was carried out by sieving through sieve #40 for controlling quality of clay without inclusion of grains of gravel and sand. Undrained shear strength was determined by the laboratory vane shear test. Studied parameters in this investigation consisted of vane blade size, rotation speed, and moisture content of clay. The viscosity was studied by the rotational viscometer equipment designed according to the ASTM C1276. Studied parameters in this investigation also included rotation speed, and moisture content of clay. The calibration of this instrument was carried out by using two standard materials, namely engine oil grade SAE30 and SAE50 with the Brookfield device. This calibration showed that the equipment shape factor, $K = 0.0022236$.

The laboratory vane shear tests were carried out with clay, where moisture content = 75% - 125% or liquidity index = 1.2 - 2.5, and rotation speed = 46 - 278 degree/min. There are two types of shear strength measurement, peak shear strength and residual shear strength. The analysis selected residual shear strength and found that the undrained shear strength (c_u) grew inversely proportional to the liquidity index (LI.) as: $c_u = 10.41 \cdot LI^{-4.45}$, $R^2 = 97.86\%$. However, parameters of rotation speed and vane blade size had very small effect to undrained shear strength.

The viscosity of clay was tested with clay, where moisture content = 85% - 140% or liquidity index = 1.5 - 3.0, and rotation speed (N) = 0.4 - 40 round/min. The viscosity (η) showed inverse relationship with liquidity index (LI.) as: $\eta = 1.95 \times 10^4 \cdot LI^{0.9816} \cdot N^{-0.937}$, $R^2 = 97.1\%$. The results of test showed that viscosity decreased with increasing of rotation speed. Based on theory of rheology, it could be concluded that clay was a Non-newtonian material, whose behavior was pseudoplastic but had initial yield stress. Undrained shear strength had direct proportional to the viscosity as: $\eta = 1.96 \times 10^3 \cdot c_u^{0.9816} \cdot N^{-0.937}$.

Department Civil Engineering Student's signature..... .....
Field of study Civil Engineering Advisor's signature..... .....
Academic year 2006

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำทาง ตรวจสอบ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไข วิทยานิพนธ์นี้

Dr. Seah Tian Ho อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำชี้แนะในการทำวิจัยมาโดยตลอด ทั้ง ได้ปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาสละเวลา และให้คำแนะนำ รวมทั้งให้ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ดร.จิรวัดณ์ ชีวรุ่งโรจน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ฯ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร. ดนัย อารยะพงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดร.พรเพ็ญ วีระวัฒกานนท์ อาจารย์ประจำภาควิชาเภสัชวิทยา คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุณวิทวัส งามประดิษฐ์ ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บริษัท เอ็ม เอ เอ จีไอเทคนิค จำกัด สำหรับสถานที่ ความสะดวก ความรัก และความ อบอุ่น ในการทดสอบงานวิจัย

วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์ใน การสอบเทียบวัสดุมาตรฐาน

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณสุธี มุกดาดีลัก พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ทุกคนตลอดจนเจ้าหน้าที่วิจัย ปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ ความร่วมมือ และช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนปรารถนาที่จะแสดงความรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา พี่ น้อง ใน ครอบครัว และคุณย่าที่น่ารักที่เป็นกำลังใจของผมเสมอมา ที่ได้ให้ความสนับสนุน และเป็น กำลังใจแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 คำนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength of Soil)..	4
2.1.1 การทดสอบหากำลังรับค่าแรงเฉือนในสนาม	4
2.1.2 การทดสอบหากำลังรับค่าแรงเฉือนในห้องทดลองด้วยใบพัด	6
2.2 ความหนืด (Viscosity)	8
2.2.1 ทฤษฎี.....	8
2.2.2 การทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียว	16
2.3 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต.....	20
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบหากำลังรับเฉือนด้วยใบพัด	20
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบหาค่าความหนืด	22

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการทดสอบและวิจัย	34
3.1 ตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบ	34
3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางเคมีของดิน.....	35
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	37
3.3.1 แบบใส่ดิน (Mold)	37
3.3.2 เครื่องทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนแบบใบพัดในห้องทดสอบ	37
3.3.3 เครื่องทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียว ด้วยเครื่อง Rotational Viscometer	41
3.4 โปรแกรมการทดสอบ.....	44
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ.....	44
3.4.2 ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธี การทดสอบแรงเฉือน ด้วยใบพัดในห้องทดสอบ	44
3.4.3 ทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer	44
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ	45
3.5.1 การทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือน ด้วยใบพัดในห้องทดสอบ	45
3.5.2 การทดสอบหาค่าความหนืดด้วยเครื่อง Rotational Viscometer	47

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล	49
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของดิน	49
4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน	49
4.1.2 ผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมี	49
4.2 การสอบเทียบค่าเครื่อง Rotational Viscometer	50
4.2.1 การคำนวณขีดจำกัดค่าความหนืดของเครื่อง Rotational Viscometer	50
4.2.2 การสอบเทียบค่าความหนืดของน้ำมันมาตรฐาน	53
4.2.3 การสอบเทียบค่าความหนืดของเครื่อง Rotational Viscometer	55
4.3 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวด้วยเครื่องมือทดสอบ กำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ	60
4.3.1 การประเมินความหมายจากผลการทดสอบ	60
4.3.2 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวด้วยเครื่อง มือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ	60
4.4 การทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer	69
4.4.1 การประเมินความหมายจากผลการทดสอบ	69
4.4.2 ผลการทดสอบค่าความหนืดของดินเหนียวด้วยเครื่องมือ Rotational Viscometer	72
4.5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างหนืดและกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว	76
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	78
5.1 สรุปผลการทดสอบ	78
5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม	79

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียว ด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัด.....	84
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	90

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะการกระจายกำลังรับเฉือนแบบต่างๆ.....5
2.2	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องทดสอบด้วยใบพัดตามมาตรฐาน ASTM 2573.....7
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดพลวัตกับอุณหภูมิ9
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ10
2.5	การเปลี่ยนรูปของของไหลเมื่อมีแรงเฉือน F มากกระทำ.....8
2.6	พฤติกรรมของของไหลนิวโทเนียน จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้นเฉือน และ ความหนืด12
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราเฉือน ของวัสดุต่างชนิดกัน.....13
2.8	พฤติกรรมของของไหลประเภทไดเลนแทน จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้น เฉือน และ ความหนืด14
2.9	พฤติกรรมของของไหลประเภทสโตพลาสติก จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความ เค้นเฉือน และ ความหนืด.....14
2.10	พฤติกรรมของของไหลประเภทบิงแฮม จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้นเฉือน และ ความหนืด15
2.11	พฤติกรรมของของไหลประเภทพลาสติก จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้น เฉือน และ ความหนืด15
2.12	ลักษณะเครื่องทดสอบหาความหนืดตามมาตรฐาน ASTM C 127616
2.13	ลักษณะเครื่อง Marsh Funnel ทดสอบความหนืดตามมาตรฐาน API RP 13B Section 2.....17
2.14	ลักษณะเครื่อง Brookfield Model DV-III สำหรับหาค่าความหนืดของของ เหลว.....18
2.15	ลักษณะเครื่อง Hand-Crank Viscometer ทดสอบความหนืดตามมาตรฐาน API RP 13B, I , Section 319
2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน กับความลึก ที่อัตราเร็วในการหมุน แตกต่างกัน โดย Wiesel (1973).....21
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน กับอัตราเร็วในการหมุน โดย Kenney et al., (1965)21

รูปที่	หน้า
2.18 การกระจายแรงเฉือนบนระนาบวิบัติตามแนวราบของใบพัด โดย Donald et al., (1977).....	22
2.19 ความสัมพันธ์ของ ค่าความชื้นกับค่ากำลังรับแรงเฉือน โดย Bentley (1979)	23
2.20 ความสัมพันธ์ของ pH กับ Yield Stress สำหรับดิน Gloucester โดย Bentley (1979).....	23
2.21 (a) ดินเหนียว South Nation และ (b) ดินเหนียว St. Leon le Ground ใน sodium-saturated state โดยเปลี่ยนแปลง ค่าความเค็มและค่าความชื้น โดย Torrance (1987)	26
2.22 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).....	27
2.23 ชนิดของการไหลแบบต่างๆ (1) Newtonian (2) thickening (3) fluidizing (4) Casson (5) Bingham โดย Locat (1988)	28
2.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity และ yield Stress โดย Locat (1988)	29
2.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ yield Stress โดย Locat (1988).....	29
2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ Viscosity โดย Locat (1988)	30
2.27 ความสัมพันธ์ของ Yield Stress และ Remoulded Shear Strength โดย Locat (1988).....	30
2.28 ค่า Water Content (%) กับ Viscosity (η , sec) ของตัวอย่างดินนหนทุรีและ หนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer โดย สุธี (2003).....	31
2.29 เปรียบเทียบค่า Water Content (%) กับ Viscosity (η , mPa-s) ของตัวอย่าง ดินนหนทุรี และ ตัวอย่างดินหนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer โดย สุธี (2003)	32
2.30 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength c_u , kPa) กับ ค่าความหนืด (Viscosity, η) ของกรวย 30° หนัก 22.5 g และ 13.5 g สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดย สุธี (2003).....	33

รูปที่	หน้า
3.1	แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมเจาะ.....34
3.2	รูปตัดของชั้นดินบริเวณหลุมเจาะ.....35
3.3	ชุดมอเตอร์สำหรับทดสอบ Laboratory Vane Shear Test39
3.4	กล่องควบคุมชุดมอเตอร์.....39
3.5	ใบพัดขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ40
3.6	แกนหมุน และภาชนะสำหรับการทดสอบหาค่าความหนืด.....41
3.7	รายละเอียด ขนาด รูปร่างของ แกนหมุน และภาชนะใส่ดิน.....42
3.8	ลักษณะรูปด้านล่าง และรูปตัด ของแกนหมุน และภาชนะใส่ดิน.....42
3.9	เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบใบพัดในห้องทดสอบ.....46
3.10	เครื่องทดสอบ Rotational Viscometer48
4.1	แรงต้านของวัสดุจากการกระทำของแรง F.....50
4.2	ลักษณะการพิจารณาแรงต้านของวัสดุที่เกิดขึ้นจากการหมุนของแกนหมุน51
4.3	รายละเอียดขนาดต่างๆที่ใช้ในการคำนวณค่าความหนืดของ Rotational Viscometer52
4.4	รายละเอียดเครื่อง Brookfield ที่ใช้ในการสอบเทียบน้ำมัน.....54
4.5	น้ำมันมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ.....55
4.6	การวิเคราะห์ค่า K ที่ได้จากทฤษฎี และการสอบเทียบ.....56
4.7	ผลการทดสอบของน้ำมันมาตรฐาน Pennzoil HD SAE 3057
4.8	ผลการทดสอบของน้ำมันมาตรฐาน Pennzoil HD SAE 50..... 58
4.9	ผลการสอบเทียบค่ามาตรฐานของเครื่อง Rotational Viscometer59
4.10	เปรียบเทียบค่า K จากทฤษฎี กับค่า K จากการสอบเทียบ59
4.11	วิธีการประเมินความหมายจากผลการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือน.....60
4.12	ตัวอย่างการเขียนข้อมูล สำหรับโปรแกรม Nonlin.....62
4.13	ตัวอย่างผลการประมวลผลด้วยโปรแกรม Nonlin62
4.14	ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ปริมาณความชื้น 84.72% โดยใช้ใบพัด ขนาด 6x9 ซม.63
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินกับ Water Content (%) จาก การประเมินแบบ Peak Shear Strength 64

รูปที่	หน้า
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินกับ Water Content (%) จาก การประเมินแบบ Residual Strength.....	65
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากสมการที่ 4.5 กับ Liquidity Index (%) จากการโปรแกรม NONLIN	66
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากสมการที่ 4.5 กับ ค่า กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ปรากฏจากการโปรแกรม NONLIN	66
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับ Liquidity Index ของดินบริเวณ ถนนพระราม 9 เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียว นนทบุรี, Kaoline Clay.....	67
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับ Liquidity Index ของดินบริเวณ ถนนพระราม 9 เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียว นนทบุรี Kaoline Clay และ Skempton Northley (1953) บน log-log scale.....	68
4.21 วิธีการประเมินความหมายของค่าแรงบิดจากผลการทดสอบหาความเหนียว	69
4.22 วิธีการทดสอบหาความเหนียวที่ปริมาณความชื้น 111.33% โดยใช้ความเร็วใน การหมุน 21.32 รอบต่อนาที.....	70
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับอัตราเร็วในการหมุนต่างๆ ที่ปริมาณ ความชื้น 111.33%.....	71
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับอัตราเร็วในการหมุนต่างๆ ที่ปริมาณ ความชื้นต่างๆ	73
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับอัตราเร็วในการหมุนต่างๆ ที่ดัชนีเหลวต่างๆ บน log-log scale	74
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวของดินจากสมการที่ 4.8 กับ Liquidity Index (%) ที่อัตราเร็วรอบต่างๆ จากการโปรแกรม NONLIN	75
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวของดินจากสมการที่ 4.8 กับ ค่ากำลังรับ แรงเฉือนของดินที่ปรากฏจากการโปรแกรม NONLIN	75
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากสมการที่ 4.11 กับความเหนียว ของดินเหนียว ที่อัตราเร็วรอบต่างๆ จากการโปรแกรม NONLIN ของดินบริเวณ ถนนพระราม 9 เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า โดยสุธี (2003).....	77

สารบัญตาราง

ค

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลทั่วไปของดินที่ใช้ทดสอบ โดย Torrance (1987)	27
ตารางที่ 2.2 ข้อมูล Atterberg Limits ของดินเหนียวที่มี sodium-saturated, ค่า ความเค็มสูง โดย Torrance (1987).....	28
ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และเคมีของดินเหนียวตามธรรมชาติ ของดินบริเวณถนนพระราม 9	36
ตารางที่ 3.2 ขนาดต่างๆของใบพัด	40
ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ Peak Shear Strength ของ ดินเหนียว ด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้อง ทดสอบ	85
ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ Residual Strength ของดิน เหนียว ด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้อง ทดสอบ	86
ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบค่าความเหนียวของดินเหนียว ด้วยเครื่อง Rotational Viscometer.....	88
ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบค่าความเหนียวของดินเหนียว ด้วยเครื่อง Rotational Viscometer (ต่อ).....	89