



พฤติกรรมการรับแรงเฉือนเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลงไปของดินที่ผุสลายอยู่กับที่ในประเทศไทย เพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มและการออกแบบทางธรณีวิศวกรรม

Shear Strength Behavior of Residual Soils in Thailand

for Supporting Landslide Warning Analysis and Geotechnical Engineering Design

สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์ (SUTTISAK SORALUMP)¹

วรวัชร ทอวิวัฒน์ (WORAWAT THOWIWAT)²

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, Soralump_s@yahoo.com

²นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, w_thowiwat@yahoo.com

บทคัดย่อ : พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนของดินตามสภาพความชื้นที่เปลี่ยนไป เป็นปัจจัยสำคัญต่อการศึกษาเพื่อกำหนดเกณฑ์การเตือนภัยดินถล่มด้วยความชื้นในมวลดินหรืออีกนัยหนึ่งคือ ปริมาณน้ำฝนที่ซึมลงสู่ชั้นดิน การศึกษาดำเนินการโดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนแบบ KU-MDS Shear ซึ่งทำการทดสอบแบบเปลี่ยนแปลงความชื้นตามระดับความอิ่มตัวของดินด้วยกัน 3 ช่วง คือ ระดับความอิ่มตัวร้อยละ 60, ระดับความอิ่มตัวร้อยละ 80 และระดับความอิ่มตัวร้อยละ 100 แล้วทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในระบบ 3 แกน แล้วนำสมการควบคุมในลักษณะสมการระนาบของความสัมพันธ์ดังกล่าว ไปวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินเพื่อใช้เป็นแบบจำลองกำลังรับแรงเฉือนของดินในการคำนวณหาค่า API_{cr} สำหรับการเตือนภัยดินถล่มในแต่ละพื้นที่ได้นอกจากนั้นยังสามารถนำตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนไปใช้สำหรับการออกแบบทางธรณีวิศวกรรมบนดินที่ผุสลายอยู่กับที่

ABSTRACT : Shear strength behavior of residual soils at various water contents plays an important role on developing the warning criterion by water content or infiltrated water. Shear strength parameters are obtained by KU-MDS Shear Test which testing by varies degree of saturation, S_r in 3 levels : 60%, 80% and 100%. The test result shows a relationship in triaxis system of σ'_v , τ and S_r . The relationship will be used for modeling shear strength of soil and determining the API_{cr} for landslide warning. Furthermore, the residual soil strength parameters can be used for geotechnical engineering design.

KEYWORDS : Landslide, Shear Strength Testing, Unsaturated Soil, Critical API

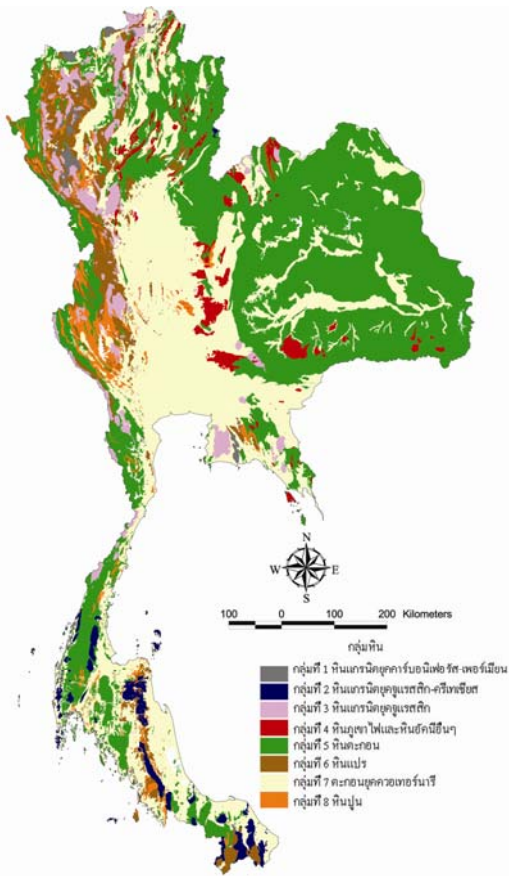
1. บทนำ

การศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้นจะเป็นรากฐานในการกำหนดค่าความชื้นวิกฤติหรือปริมาณฝนวิกฤติที่ใช้ในการเตือนภัยดินถล่ม รวมถึงเป็นค่าที่ใช้ในการตัดสินใจออกแบบ

โครงสร้างทางวิศวกรรมในสภาพที่ดินไม่อิ่มตัว (Unsaturated Soil) การศึกษาในบทความนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาคุณสมบัติดังกล่าวโดยได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูล เก็บตัวอย่างและทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ โดยมุ่งหวังจะศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ผุพังจากหินกลุ่มต่างๆ ทั่วประเทศไทย

2. กลุ่มหินทางธรณีวิทยา

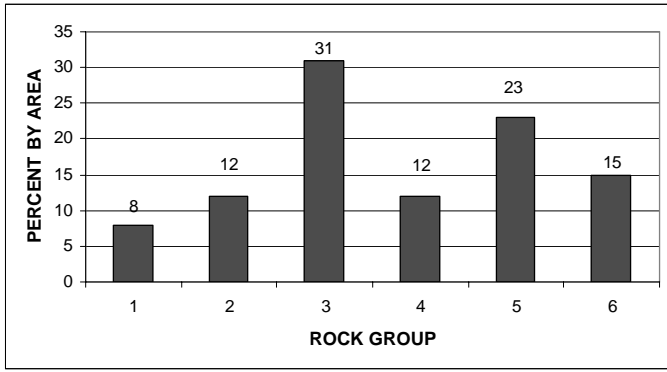
สุทธิสักดิ์และคณะ, 2550 ได้ศึกษาคุณสมบัติของดินที่ผุสลายจากหินแต่ละชุดตามลักษณะธรณีวิทยาของประเทศไทย เพื่อนำคุณสมบัติที่ได้มาทำการจัดกลุ่มชุดหินที่มีความหมายทางวิศวกรรม ทั้งนี้เนื่องจากชุดหินในประเทศไทยมีจำนวน 61 ชุด การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของทุกชุดหินจึงเป็นเรื่องที่ต้องใช้เวลามาก ดังนั้น จึงต้องทำการจัดกลุ่มของชุดหิน (1 กลุ่ม ประกอบด้วยหลายชุดหิน) โดยรวมชุดหินที่เมื่อผุสลายจะมีคุณสมบัติของดินทางกายภาพใกล้เคียงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ผลจากการจัดกลุ่มดังกล่าวนี้ สามารถจำแนกลักษณะทางธรณีวิทยาที่สำคัญที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการวิเคราะห์ดินถล่มได้ออกเป็น 8 กลุ่ม ดังภาพที่ 1 โดยกลุ่มที่ 1 คือ หินแกรนิตยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน กลุ่มที่ 2 คือ หินแกรนิตยุคจูแรสสิก-ครีเทเชียส กลุ่มที่ 3 คือ หินแกรนิตยุคจูแรสสิก กลุ่มที่ 4 คือ หินภูเขาไฟและหินอัคนีอื่นๆ กลุ่มที่ 5 คือ หินตะกอน กลุ่มที่ 6 คือ หินแปร กลุ่มที่ 7 คือ หินตะกอนยุคควอเทอร์นารี และกลุ่มที่ 8 คือ หินปูน ตามลำดับ



ภาพที่ 1 กลุ่มหินทางธรณีวิทยาเพื่อการศึกษาคุณสมบัติดินทางวิศวกรรม (สุทธิสักดิ์และคณะ, 2550)

3. การดำเนินงาน

ตัวอย่างดินแบบถูกรบกวนและไม่ถูกรบกวนได้ถูกเก็บโดยศูนย์วิจัยป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้โครงการกำหนดค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (Antecedent Precipitation Index : API) เพื่อสนับสนุนการเตือนภัยล่วงหน้า น้ำท่วมฉับพลัน – ดินถล่ม ของกรมทรัพยากรน้ำ โดยเก็บตัวอย่างให้ครอบคลุมกลุ่มหินจำนวน 6 กลุ่ม จากทั้งหมด 8 กลุ่ม โดยกลุ่มของตะกอนยุคควอเทอร์นารีและกลุ่มหินปูน เป็นกลุ่มหินที่มีโอกาสการเกิดดินถล่มต่ำจึงไม่นำมาพิจารณา นอกจากนี้ยังได้เลือกเก็บตัวอย่างในหมู่บ้านเสี่ยงภัยดินถล่มประกาศโดยกรมทรัพยากรน้ำและเป็นหมู่บ้านที่อยู่ในพื้นที่ลาดชันเกิน 10 องศา การคัดเลือกดังกล่าวดำเนินการโดยการใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ซึ่งโดยสรุปแล้วได้เก็บตัวอย่างจาก 121 หมู่บ้าน เป็นตัวอย่างแบบไม่ถูกรบกวนจำนวน 484 ตัวอย่าง โดยจำนวนตัวอย่างที่จะเก็บต่อกลุ่มหินได้พิจารณาจากสถิติความถี่การเกิดดินถล่มตามกลุ่มหินต่างๆ รวบรวมโดย สุทธิสักดิ์และคณะ, 2550 (ภาพที่ 2) โดยให้กลุ่มหินที่มีความถี่การเกิดดินถล่มมากจะเก็บตัวอย่างจำนวนมากเช่นเดียวกัน การเก็บตัวอย่างดินที่ผุสลายจากหินกลุ่มต่างๆ จะเก็บโดยการขุดบ่อสำรวจ (Test Pit) ลงไปถึงชั้นหินที่มีระดับความสูงประมาณระดับ 3 ตัวอย่างจะถูกเก็บบริเวณรอยต่อระหว่างหินที่ผุพังระดับ 3 และระดับ 4 ทั้งนี้เนื่องจากมีสมมุติฐานว่า รอยต่อดังกล่าวเป็นระนาบของการพิบัติแบบลาดอนันต์ นอกจากตัวอย่างจากโครงการกำหนดค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินฯ ผู้ศึกษายังได้รับอนุเคราะห์ข้อมูลจากกรมทรัพยากรธรณีในโครงการศึกษาหาแนวทางการป้องกันและลดผลกระทบจากภัยดินถล่ม 6 จังหวัดภาคใต้ของกรมทรัพยากรธรณี และตัวอย่างจากการศึกษาวิจัยด้านวิศวกรรมดินถล่มของศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทำให้มีข้อมูลและตัวอย่างเพื่อการทดสอบจำนวน 696 ตัวอย่างครอบคลุมกลุ่มหินจำนวน 6 กลุ่มดังที่กล่าวมา ตัวอย่างได้นำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการ ซึ่งโดยสรุปแล้วมีจำนวนการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 1



- Group 1 Permo-Carb granite
- Group 2 Jurassic-Cretaceous granite
- Group 3 Jurassic granite
- Group 4 Volcanic and other plutonic rock
- Group 5 Sandstone, shale, mudstone, conglomerate and chert
- Group 6 Metamorphic rock

ภาพที่ 2 ร้อยละการเกิดดินถล่มในอดีตเฉลี่ยต่อพื้นที่ชุดหินกลุ่มที่ 1 ถึง กลุ่มที่ 6 ตั้งแต่ปีพ.ศ.2513-2549 (Soralump and Kulsuwan, 2006)

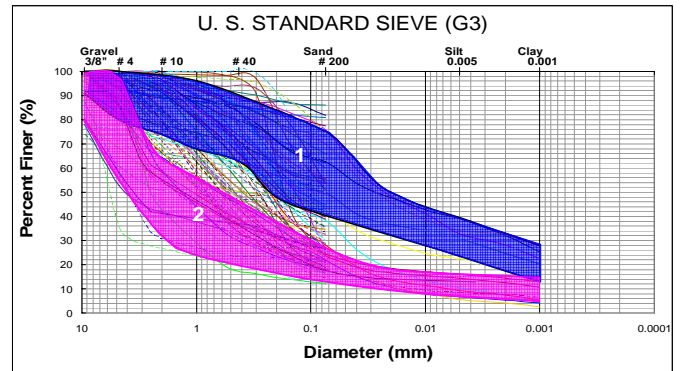
ตารางที่ 1 จำนวนตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบ	จำนวนตัวอย่าง
	(ชุดตัวอย่าง)
Strength Reduction Index (SRI)	47
KU-Multistage Direct Shear Test (KU-MDS Test)	127
Atterberg's Limits	531
Grain Size Analysis	535
Soil Classification (USCS)	514

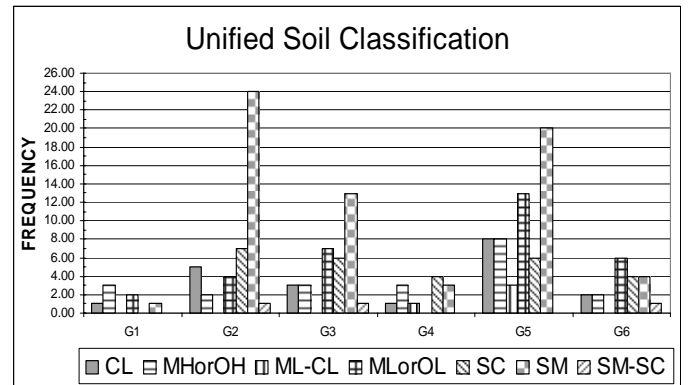
4. คุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินที่ผสมผสานอยู่กับที่จากหินทั้ง 6 กลุ่ม จากการทดสอบ Grain size distribution, Atterberg's Limits และจำแนกประเภทของดินทางวิศวกรรมตาม Unified Soil Classification System พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของเม็ดดินมี 2 ลักษณะดังภาพที่ 3 อันได้แก่ลักษณะที่ 1 การกระจายตัวเป็นลักษณะ Well Grade ซึ่งมีดินทั้งขนาดเม็ดหยาบและเม็ดละเอียดผสมผสานกันและลักษณะที่ 2 คือดินที่มีร้อยละของเม็ดดินขนาดหยาบมากกว่าเม็ดละเอียดอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้คาดว่าลักษณะการกระจายตัวดังกล่าวเกี่ยวข้องกับการพัดพาของดินเม็ดละเอียดจากการไหลซึมผ่านของน้ำฝนลงสู่ดินชั้นล่าง สำหรับผลการจำแนกประเภทของดิน พบว่าดินที่ผสมผสานอยู่กับที่จากกลุ่มหินที่ 2 และ กลุ่มหินที่ 3 เมื่อสุฟงจะให้

ดินประเภท SM และกลุ่มหินที่ 5 จำแนกได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ML or OL และ SM สำหรับกลุ่มหินที่ 1,4 และ 6 ไม่สามารถสรุปชนิดดินได้ชัดเจน ดังผลการจำแนกประเภทของดินทั้ง 6 กลุ่มตามภาพที่ 4



ภาพที่ 3 รูปแบบการกระจายตัวของเม็ดดิน 2 ลักษณะ

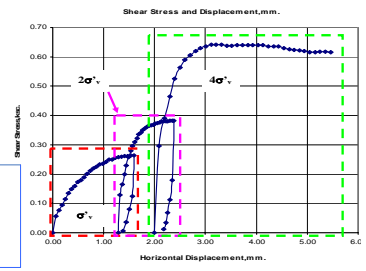
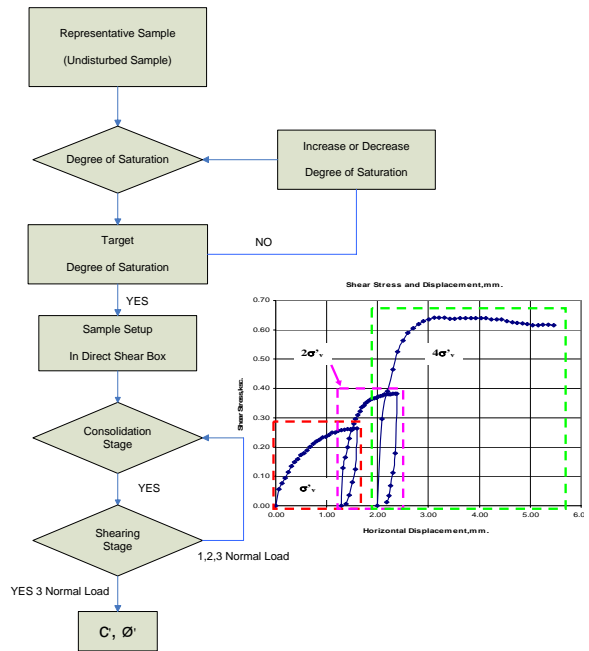


ภาพที่ 4 การจำแนกประเภทของดินทั้ง 6 กลุ่ม

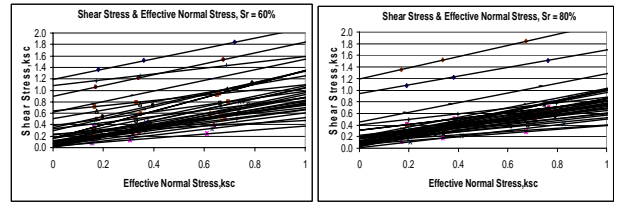
5. พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนเมื่อความชื้นเปลี่ยนไป

พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ผสมผสานอยู่กับที่จากหินกลุ่มต่างๆ ได้ทำการศึกษาโดยการทดสอบ Direct Shear ประเภท KU-MDS Shear Test (วรากรและนงลักษณ์, 2546, บรรพต, 2548) ซึ่งรายละเอียดได้อธิบายโดย สุทธิศักดิ์และคณะ (2550) การทดสอบดำเนินการกับตัวอย่างที่ไม่ถูกรบกวนจากทั่วประเทศ จำนวน 127 ชุดตัวอย่างหรือทดสอบตัวอย่างทั้งสิ้น 307 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างได้ถูกนำมาปรับความชื้นให้ได้ความอิ่มตัวที่ร้อยละ 60, 80 และ 100 โดยประมาณ การเอนตัวอย่างดำเนินการในลักษณะการเอนแบบระบายน้ำ (Drained) อัตราการเอนตัวอย่างวิเคราะห์จากอัตราการทรุดตัวในช่วงการ Consolidate ตัวอย่างก่อนการเอนตัวอย่าง รายละเอียดอธิบายใน Head, K.H. (1981)

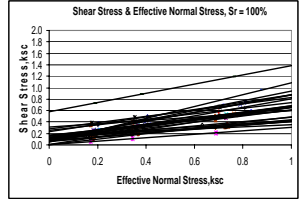
ขั้นตอนการทดสอบแสดงดังภาพที่ 5 ผลการทดสอบได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear Stress) กับแรงดันดินกดทับประสิทธิภาพ (Effective Normal Stress) ของแต่ละระดับความอิ่มตัว โดยพบว่าเมื่อระดับความอิ่มตัวของดินสูงขึ้นกำลังรับแรงเฉือนของดินจะมีค่าลดลงตามที่ควรจะเป็นและจะสังเกตเห็นได้ว่าค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle, ϕ') ของดินมีค่าค่อนข้างคงที่แต่ค่าความเชื่อมแน่นของดิน (Cohesion, c') มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อระดับความอิ่มตัวของดินเพิ่มสูงขึ้น ตัวอย่างผลการทดสอบของดินที่ผุสลายอยู่กับที่จากหินกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 5 แสดงดังภาพที่ 6 และ 7 ตามลำดับจากภาพดังกล่าวจะเห็นได้ชัดว่าเมื่อร้อยละความอิ่มตัวในมวลดินเพิ่มมากขึ้น ความแปรปรวนของค่า Cohesion (c') จะลดลงอย่างมากโดยสังเกตได้จากการเกาะกลุ่มกันของเส้น Failure Criterion ภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า c' และ ϕ' จากดินที่ผุสลายอยู่กับที่จากหินกลุ่มดังกล่าวซึ่งได้แสดงให้เห็นชัดเจนมากขึ้นถึงอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่า Cohesion (c') ซึ่งทำให้มีช่วงความแปรปรวนกว้าง ในขณะที่ค่า ϕ' จะกระจายตัวอยู่ในช่วงจำกัด นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการลดลงของค่ากำลังรับแรงเฉือนเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น พบว่าพฤติกรรมการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนมี 2 ลักษณะ ได้แก่ การลดลงในอัตราค่อนข้างคงที่ตามความชื้นและการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นถึงค่าระดับหนึ่ง พฤติกรรมประเภทหลังแสดงถึงการสูญเสียกำลังอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจเกิดจากการยุบตัวของมวลดิน ดังแสดงในภาพที่ 9 พฤติกรรมดังกล่าวสำคัญอย่างยิ่งต่อการเข้าใจถึงวิธีการเตือนภัยของดินถล่มตามประเภทของกลุ่มหินต่างๆ นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ผุสลายอยู่กับที่จากกลุ่มหินทุกกลุ่มจะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนค่อนข้างคงที่หลังระดับความอิ่มตัวเกินร้อยละ 90 และยังพบว่าตัวอย่างดินไม่สามารถจะทำให้อิ่มตัวร้อยละ 100 ได้ถึงแม้ว่าจะแช่ตัวอย่างดินในน้ำไว้เป็นเวลาหลายวัน โดยระดับความอิ่มตัวที่ได้สูงสุดเฉลี่ยอยู่ประมาณร้อยละ 95 จากข้อมูลดังกล่าวทำให้สรุปได้ว่าการพิบัติของลาดดินหรือการเกิดดินถล่มนั้น ดินจะไม่อิ่มตัวร้อยละ 100 ดังนั้นในการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องควรตั้งสมมุติฐานถึงระดับความอิ่มตัวของมวลดินที่ทำให้เกิดดินถล่มตามพฤติกรรมดังกล่าว



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการทดสอบ KU-MDS Shear

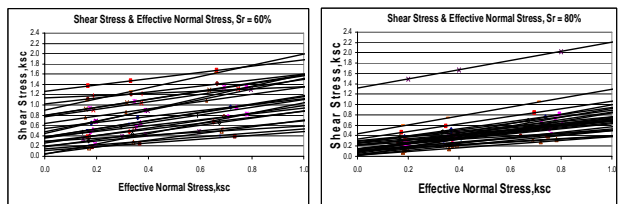


ก. ระดับความอิ่มตัว 60% ข. ระดับความอิ่มตัว 80%

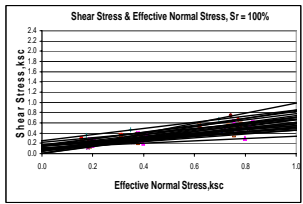


ค. ระดับความอิ่มตัว 100%

ภาพที่ 6 ผลทดสอบ KU-MDS ของดินที่ผุสลายอยู่กับที่จากหินกลุ่มที่ 3

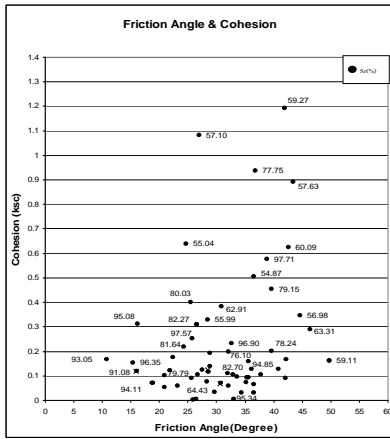


ก. ระดับความอิ่มตัว 60% ข. ระดับความอิ่มตัว 80%

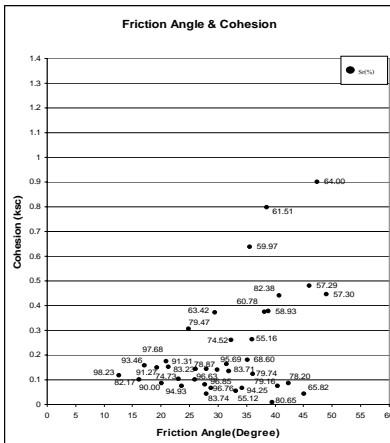


ค. ระดับความอิ่มตัว 100%

ภาพที่ 7 ผลทดสอบ KU-MDS ของดินที่ผุสลายอยู่กับที่จากหินกลุ่มที่ 5



ก.ดินที่ผุสลายอยู่กับที่จากหินกลุ่มที่ 3



ข.ดินที่ผุสลายอยู่กับที่จากหินกลุ่มที่ 5

เมื่อนำข้อมูลผลการทดสอบข้างต้นมาหาความสัมพันธ์
ในระบบ 3 แกน โดยให้ Z เป็นแกนของกำลังรับแรงเฉือน Y
เป็นแกนของแรงกดทับ และ X เป็นแกนของระดับความอิ่มตัว
จากนั้นหาสมการควบคุมโดยเลือกใช้สมการระนาบในลักษณะ 2
ระนาบต่อกัน (Bi-Plane Equation) ดังภาพที่ 10 ถึง ภาพที่ 15
และมีรูปแบบความสัมพันธ์แต่ละระนาบตามสมการที่ 1 และ 2

$$\text{สมการระนาบ} \quad Z = Z_0 + bY + aX \quad (1)$$

$$\text{สมการความแข็งแรงของดิน} \quad \tau = \tau_0 + b\sigma' - aS_r \quad (2)$$

τ_0 ค่าคงที่จากกราฟความสัมพันธ์ในระบบ 3 แกน

a ความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง S_r กับ τ

b ความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง σ'_v กับ τ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในระบบ 3 แกนทำให้
สามารถหาสมการกำลังรับแรงเฉือนสำหรับการนำไปใช้ในการ
วิเคราะห์และออกแบบตามสภาพความชื้นในมวลดินต่างๆ ของ
ดินที่สลายตัวอยู่กับที่จากหินแต่ละกลุ่มได้ดังสมการที่ 3 ถึง
สมการที่ 14 โดยสมการดังกล่าวเป็นสมการ Lower Bound

$$\text{กลุ่มที่ 1} \quad \tau_1 = 0.8628 + 0.4985\sigma' - 1.0684S_r \quad (3)$$

$$\tau_2 = 0.1891 + 0.3725\sigma' - 0.1046S_r \quad (4)$$

$$\text{กลุ่มที่ 2} \quad \tau_1 = 0.9585 + 0.5976\sigma' - 1.1250S_r \quad (5)$$

$$\tau_2 = 0.6425 + 0.3872\sigma' - 0.6343S_r \quad (6)$$

$$\text{กลุ่มที่ 3} \quad \tau_1 = 0.9627 + 0.8004\sigma' - 1.1835S_r \quad (7)$$

$$\tau_2 = 0.7746 + 0.4570\sigma' - 0.7623S_r \quad (8)$$

$$\text{กลุ่มที่ 4} \quad \tau_1 = 2.1459 + 0.6107\sigma' - 2.4959S_r \quad (9)$$

$$\tau_2 = 0.7432 + 0.5076\sigma' - 0.6902S_r \quad (10)$$

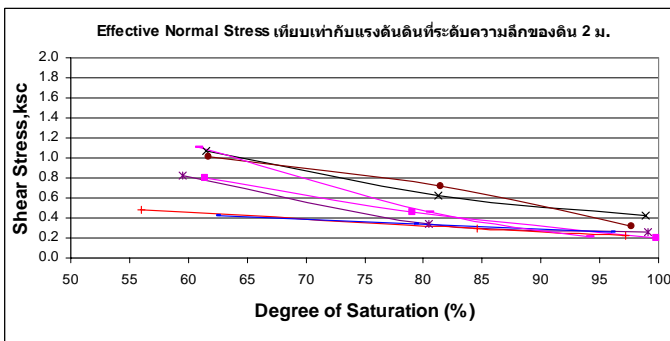
$$\text{กลุ่มที่ 5} \quad \tau_1 = 1.9578 + 0.5842\sigma' - 2.2601S_r \quad (11)$$

$$\tau_2 = 0.6441 + 0.4876\sigma' - 0.5866S_r \quad (12)$$

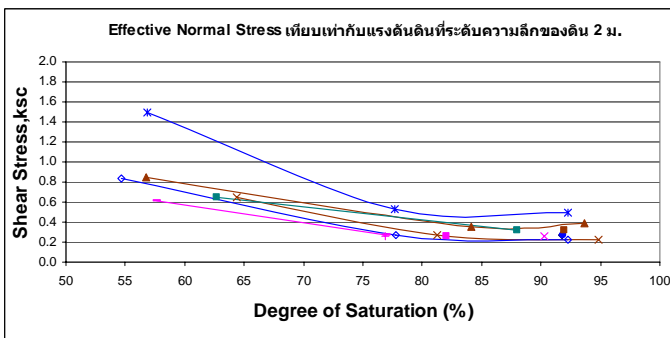
$$\text{กลุ่มที่ 6} \quad \tau_1 = 1.3884 + 0.4607\sigma' - 1.6086S_r \quad (13)$$

$$\tau_2 = 0.2476 + 0.5349\sigma' - 0.1892S_r \quad (14)$$

ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง c' และ ϕ'

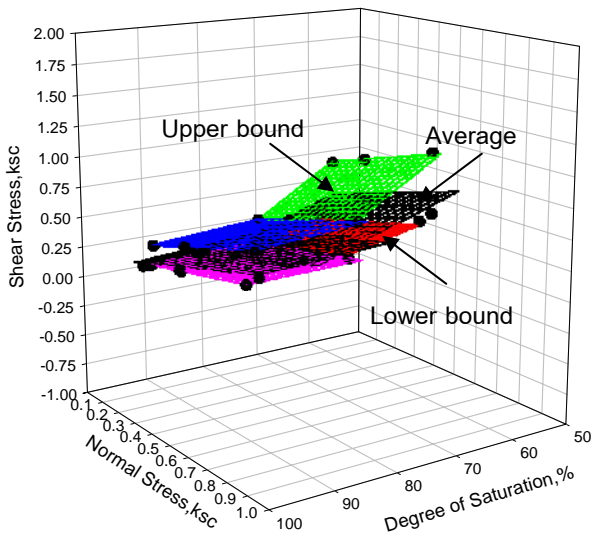


ก.การลดลงในอัตราค่อนข้างคงที่ (ดินที่ผุสลายอยู่กับที่จากหินกลุ่มที่ 4)

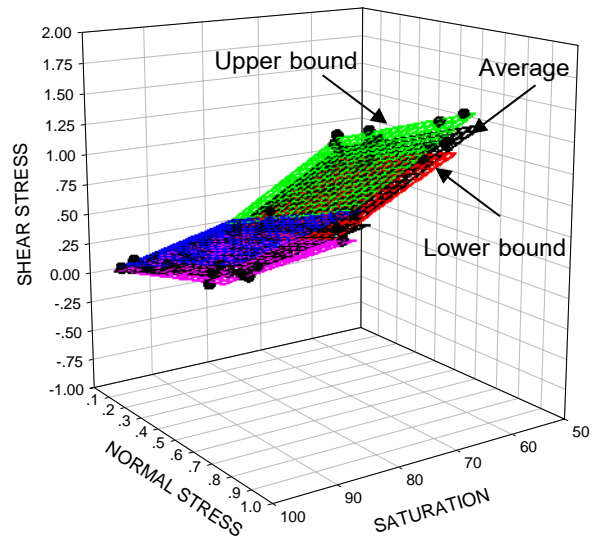


ข.การลดลงอย่างรวดเร็ว (ดินที่ผุสลายอยู่กับที่จากหินกลุ่มที่ 6)

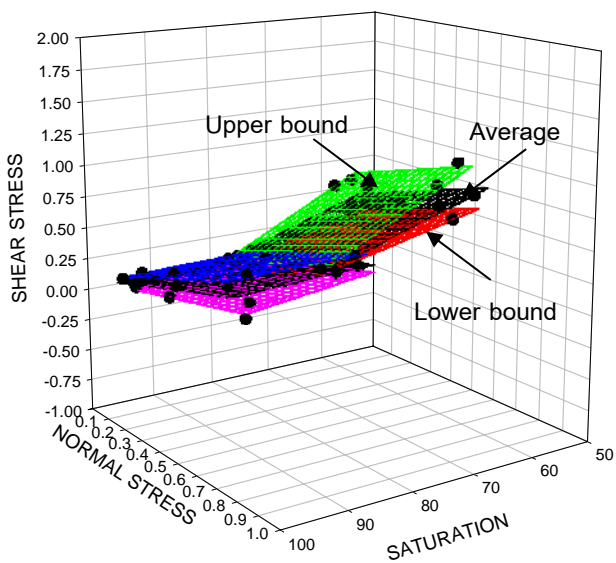
ภาพที่ 9 พฤติกรรมการลดลงของกำลังรับแรงเฉือน 2 ลักษณะ



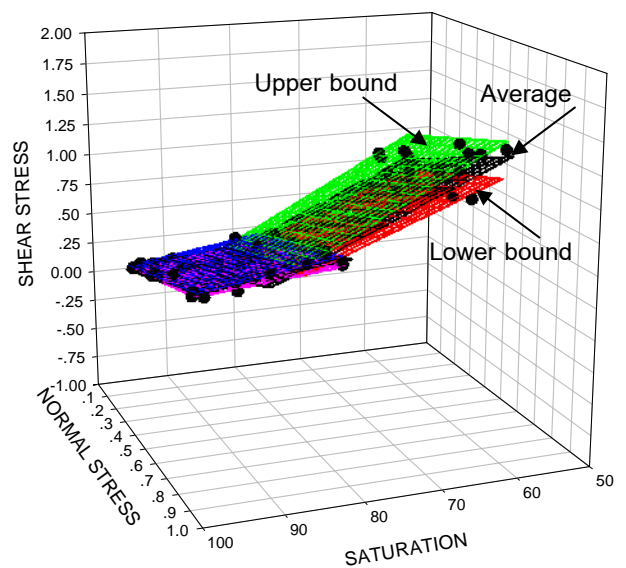
ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนตามความอิ่มตัว(ดินกลุ่มที่ 1)



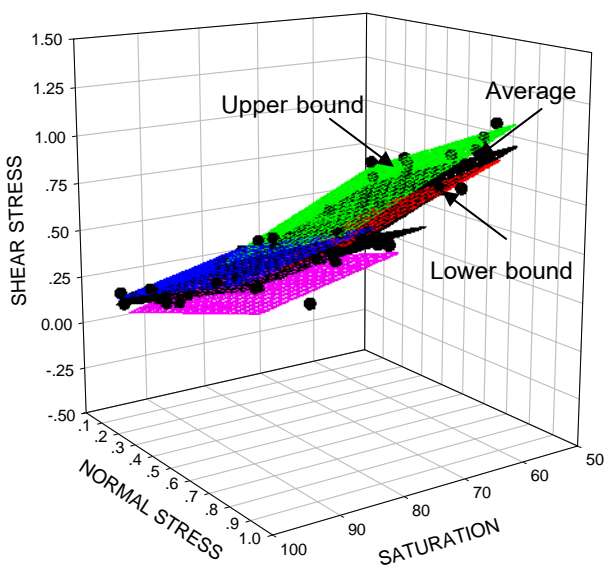
ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนตามความอิ่มตัว(ดินกลุ่มที่ 4)



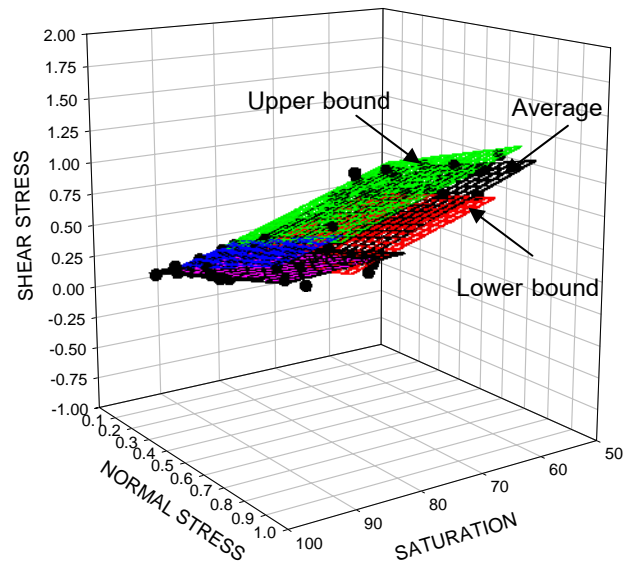
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนตามความอิ่มตัว(ดินกลุ่มที่ 2)



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนตามความอิ่มตัว(ดินกลุ่มที่ 5)



ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนตามความอิ่มตัว(ดินกลุ่มที่ 3)



ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนตามความอิ่มตัว(ดินกลุ่มที่ 6)

ในการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันหรือการออกแบบทางธรณีวิศวกรรมอื่นๆ เราสามารถทำการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของดิน ณ ความลึกใดๆ จากสมการควบคุมทั้งสองสมการ แล้วพิจารณาเลือกค่าของสมการที่ให้กำลังรับแรงเฉือนที่สูงกว่าเป็นสมการที่ใช้คำนวณเพื่อหาอัตราส่วนความปลอดภัย ทั้งนี้ในกรณีที่ต้องการค่าตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมปฏิรูปดินอ่อนตัว ซึ่งค่า c' และ ϕ' กรณีดินอ่อนตัวอันเป็นกรณีที่ใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนขั้นต่ำ จากผลการทดสอบจะสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

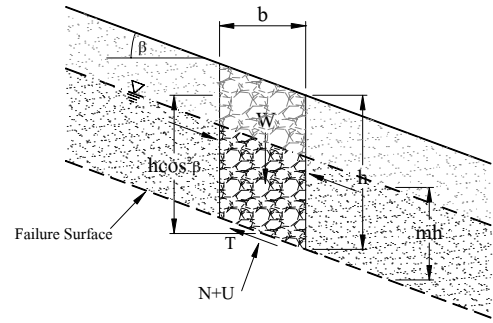
ตารางที่ 2 ค่า c' และ ϕ' ของดินที่ผุสลายจากหินกลุ่มต่างๆ กรณีดินอ่อนตัว

หินต้นกำเนิดของดินที่ผุสลายอยู่กับที่	c' , ksc	ϕ' , Degree
กลุ่ม 1 หินแกรนิตยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน	0.085	20.43
กลุ่ม 2 หินแกรนิตยุคจูแรสสิก-ครีเทเชียส	0.008	21.17
กลุ่ม 3 หินแกรนิตยุคจูแรสสิก	0.012	24.56
กลุ่ม 4 หินภูเขาไฟและหินอัคนีอื่นๆ	0.053	26.91
กลุ่ม 5 หินตะกอน	0.058	25.99
กลุ่ม 6 หินแปร	0.058	28.14

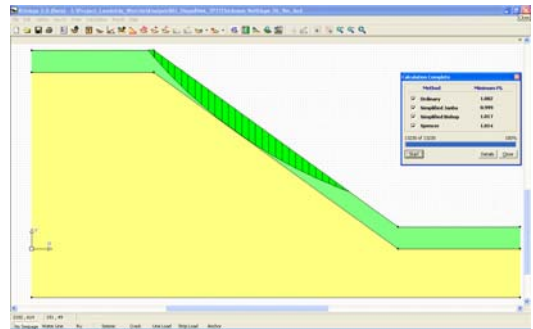
6. การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อจำลองพฤติกรรมดินถล่ม

สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อจำลองพฤติกรรมดินถล่ม ได้พิจารณารูปแบบการพิบัติ 3 รูปแบบได้แก่ การพิบัติแบบลาดอนันต์ (Infinite slope) ดังสมการที่ 15 และ ภาพที่ 16, การพิบัติแบบผิวโค้ง (Circular failure) และลักษณะไม่เป็นส่วนโค้งของวงกลม (Non-circular failure) การวิเคราะห์ดำเนินการโดยวิธี Limit Equilibrium โดยโปรแกรม KU-Slope 2.0 (รัฐธรรม, 2547) ดังแสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 17 ถึง ภาพที่ 18 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินทั้ง 3 วิธี สามารถเปรียบเทียบได้ดังภาพที่ 19 พบว่า เสถียรภาพของลาดดินแบบลาดอนันต์ ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำที่สุด เหมาะสมกับการนำมาวิเคราะห์ความปลอดภัยของลาดชันธรรมชาติและตรงกับข้อมูลระนาบการพิบัติในสนามจากเหตุการณ์ดินถล่มต่างๆ

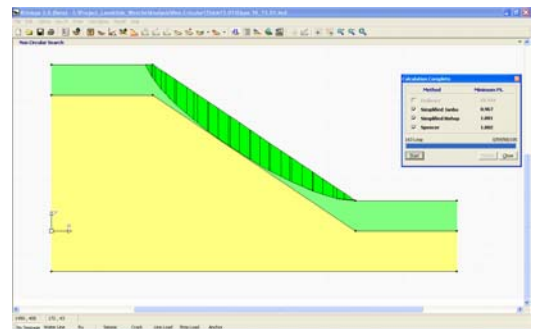
$$F.S. = \frac{c' + h \cos^2 \beta \tan \phi' [(1-m)\gamma' + m(\gamma_{sat} - \gamma_w)] + S_r \tan \alpha}{h \sin \beta \cos \beta [(1-m)\gamma' + m\gamma_{sat}]} \quad (15)$$



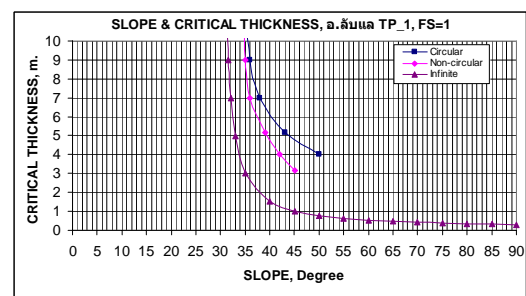
ภาพที่ 16 เสถียรภาพของลาดดินแบบ Infinite Slope (บรรพต , 2548)



ภาพที่ 17 เสถียรภาพของลาดดินแบบ Circular failure



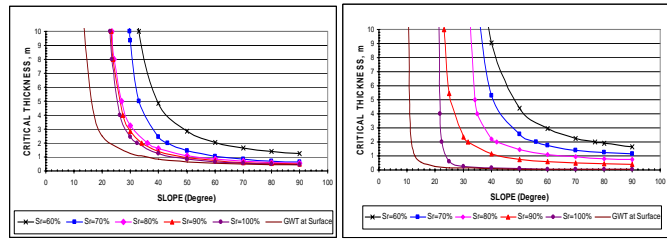
ภาพที่ 18 เสถียรภาพของลาดดินแบบ Non-circular failure



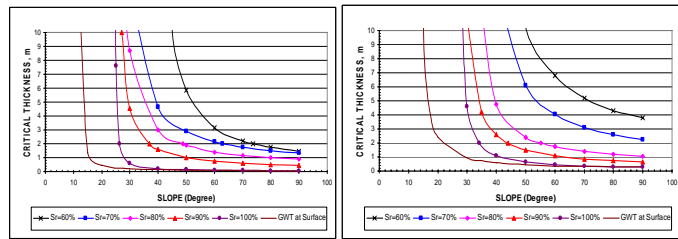
ภาพที่ 19 การเปรียบเทียบค่าเสถียรภาพของลาดดินตามลักษณะการพิบัติต่างๆ

ภาพที่ 20 แสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันแบบลาดอนันต์ ซึ่งดำเนินการวิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนตามระนาบความลึกของดินที่ผุสลายอยู่กับที่จากกลุ่มหินต่างๆ ดังที่ได้เสนอผลมาแล้ว โดยการวิเคราะห์เป็นการวิเคราะห์แบบ Effective Stress และสมมุติให้ระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าระนาบ

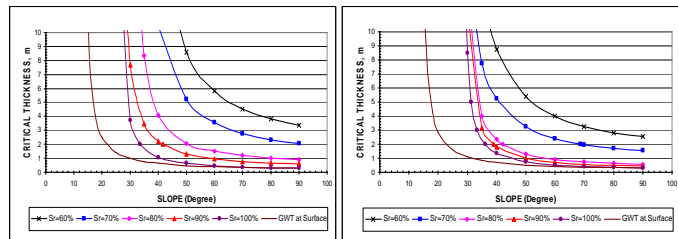
การพิบัติ ซึ่งผลการวิเคราะห์ทำให้ได้ความหนาวิกฤติ (Critical Thickness) ตามความลาดชันและความอึดตัวที่ระดับใดๆ ผลการวิเคราะห์ดังกล่าว จะได้นำไปใช้ในการวิเคราะห์เกณฑ์น้ำฝนเตือนภัย โดยใช้ค่า API (Antecedent Precipitation Index) ต่อไป



ก.ดินที่ผุสลายอยู่กับที่(กลุ่มหินที่ 1) ข.ดินที่ผุสลายอยู่กับที่(กลุ่มหินที่ 2)



ค.ดินที่ผุสลายอยู่กับที่(กลุ่มหินที่ 3) ง.ดินที่ผุสลายอยู่กับที่(กลุ่มหินที่ 4)



จ.ดินที่ผุสลายอยู่กับที่(กลุ่มหินที่ 5) ฉ.ดินที่ผุสลายอยู่กับที่(กลุ่มหินที่ 6)

ภาพที่ 20 ความหนาวิกฤติของชั้นดินที่จะเกิดการพิบัติตามความลาดชันและระดับความอึดตัวใดๆ

6. สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนเมื่อระดับความอึดตัวเปลี่ยนไป มีลักษณะเป็นระนาบ 2 ระนาบตัดกันในกราฟ 3 แกน โดยพฤติกรรมการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนเมื่อระดับความอึดตัวเพิ่มขึ้นมี 2 รูปแบบ อันได้แก่ รูปแบบที่ 1 กำลังรับแรงเฉือนของดินค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการลดลงค่อนข้างคงที่ รูปแบบที่ 2 กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการเพิ่มความชื้น (ช่วง S_r ประมาณร้อยละ 60-80) จากนั้นไปค่ากำลังรับแรงเฉือนค่อนข้างคงที่ที่พฤติกรรมในรูปแบบที่ 2 นั้นแสดงถึงพฤติกรรมการยุบตัวของโครงสร้างดินเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลงไป การทราบพฤติกรรม

ดังกล่าวของดินที่ผุสลายอยู่กับที่จากกลุ่มหินชุดต่างๆ มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการนำไปใช้ในการกำหนดเกณฑ์ปริมาณน้ำฝนในการเตือนภัยดินถล่มรวมถึงวิธีการที่เหมาะสมในการเตือนภัย

นอกจากนั้นจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการทำให้พบว่าทำให้ดินอึดตัวถึงร้อยละ 100 นั้นเป็นเรื่องที่ยากมาก ถึงแม้ว่าตัวอย่างดินจะถูกแช่น้ำนานเพียงใดระดับความอึดตัวจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ ร้อยละ 95 ดังนั้นจึงทำให้เห็นภาพว่าพฤติกรรมของดินตามธรรมชาติบนลาดชันขณะฝนตกหนักจะมีโอกาสอึดตัวถึงร้อยละ 100 ยากหรือสภาวะดินน่าจะยังคงไม่อึดตัวอยู่ ซึ่งจะส่งผลต่อการประเมินเสถียรภาพของลาดดินที่อาจต้องพิจารณาถึงระดับน้ำใต้ดินที่ต่ำ ซึ่งขัดแย้งกับสมมุติฐานในอดีต

7. กิติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมทรัพยากรธรณี, กรมทรัพยากรน้ำ, ศูนย์วิจัยป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับข้อมูลการวิจัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย

8. บรรณานุกรม

- [1] สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์, วรวัชร ตอวิวัฒน์และวรารกร ไม้เรียง. 2550, การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, จ.พิษณุโลก
- [2] Soralum, S. and B. Kulsuwan. 2006. **Landslide Risk Prioritization of Tsunami Affected Area in Thailand**. Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, Joint Workshop 6-9 December, Manila Philippines.
- [3] นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์. 2546, เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อ โดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- [4] บรรพต กุศลสุวรรณ. 2548, การศึกษาพฤติกรรมการพืดของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์
- [5] Head, K.H. 1981. Manual of Soil Laboratory Testing. Vol 2. Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. Pentech press Ltd., London.530 p.
- [6] รัฐธรรม อิศโรพาร. 2547, การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Generalized Limit Equilibrium .วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์