



วิทยานิพนธ์

การศึกษาแนวทางในการแก้ปัญหาการกัดเซาะที่เกิดจากดินกระจายตัว
บริเวณอ่างเก็บน้ำและถนนภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

A STUDY ON ALTERNATIVE COUNTERMEASURES ON DISPERSIVE SOIL EROSIONS
FOR RESERVOIRS AND ROAD EMBANKMENTS IN KASETSART UNIVERSITY
CHALERMPHRAKIAT SAKON NAKHON PROVINCE CAMPUS

นายชูเดช ทองมิตร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551

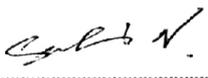
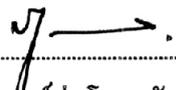
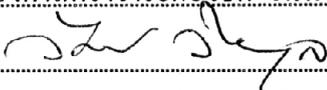
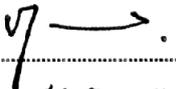


ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
ปริญญา

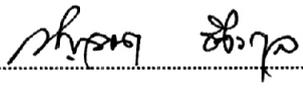
| วิศวกรรมโยธา | วิศวกรรมโยธา |
|--------------|--|
| สาขา | ภาควิชา |
| เรื่อง | การศึกษาแนวทางในการแก้ปัญหาการกัดเซาะที่เกิดจากดินกระจายตัวบริเวณอ่างเก็บน้ำและถนนภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร |
| | A Study on Alternative Countermeasures on Dispersive Soil Erosions for Reservoirs and Road Embankments in Kasetsart University Chalemphrakiat Sakon Nakhon Province Campus |

นามผู้วิจัย นายชูเดช ทองมิตร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ 
(..... รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนานันท์, D.Eng.)
กรรมการ 
(..... รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทร์วางกูร, Ph.D.)
กรรมการ 
(..... รองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทยกุล, M.Eng.)
หัวหน้าภาควิชา 
(..... รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทร์วางกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

..... 
(..... รองศาสตราจารย์กัญญา นีระกุล, D.Agr.)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ๕๑ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๖๑

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาแนวทางในการแก้ปัญหาการกัดเซาะที่เกิดจากดินกระจายตัว
บริเวณอ่างเก็บน้ำและถนนภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ
จังหวัดสกลนคร

A Study on Alternative Countermeasures on Dispersive Soil Erosions
for Reservoirs and Road Embankments in Kasetsart University Chalermphrakiat
Sakon Nakhon Province Campus

โดย

นายชูเดช ทองมิตร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
พ.ศ. 2551

ชูเดช ทองมิตร 2551: การศึกษาแนวทางในการแก้ปัญหาการกัดเซาะที่เกิดจากดินกระจายตัวบริเวณ
อ่างเก็บน้ำและถนนภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์สุภกิจ นนทนานันท์, D.Eng. 198 หน้า

งานวิจัยนี้เสนอแนวทางการแก้ปัญหาดินกระจายตัวในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิม
พระเกียรติ จังหวัดสกลนคร บริเวณอ่างเก็บน้ำและถนนที่มีปัญหาการกัดเซาะ ผลจากการศึกษาพบว่า บริเวณ
อ่างมุกดาหาร อ่างอุดรธานี และกองดินถมข้างอ่างอุดรธานี เป็น โชนที่ดินกระจายตัวรุนแรงกว่าในบริเวณอื่น ๆ
จึงต้องระมัดระวังการนำดินในบริเวณนี้ไปใช้งาน และจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับการกระจายตัว
ของดินกับการกัดเซาะ พบว่า เมื่อความแน่นของดินบริเวณขอบอ่างเพิ่มขึ้น จะทำให้ความลึกและความถี่ของ
การกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกลดลง ในขณะที่เมื่อความลาดชันบริเวณขอบอ่างค่อย ๆ ลดลง ก็จะเป็นตัว
เสริมให้ปริมาณของดินที่ถูกกัดเซาะลดลงตามไปด้วย จากการสำรวจภาคสนาม พบว่า อัตราส่วนความกว้าง
ต่อความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก มีสัดส่วนคงที่เป็น 1 ต่อ 0.60 และปริมาณของดินที่ถูกกัดเซาะ
จะมากขึ้นเมื่อระดับการกระจายตัวของดินในบริเวณนั้นมีค่าสูง

จากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินกระจายตัวด้วยปูนขาว พบว่า ต้องใช้ปริมาณปูนขาวอย่างน้อย
1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง สำหรับดินกระจายตัวที่มีระดับการกระจายตัวเริ่มต้นเท่ากับ 51.30
และ 72.21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงทำให้ดินมีระดับการกระจายตัวลดลงเป็นประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ส่วน
คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาว
ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเป็น
ประมาณ 1.6 และ 2.2 เท่าของดินที่ไม่ได้ผสมปูนขาว สำหรับดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัว ตามลำดับ
กำลังรับแรงอัดของดินผสมปูนขาวจะสูงขึ้นแต่ดินจะเปราะ และเกิดการวิบัติที่เปอร์เซ็นต์ความเครียดต่ำ ๆ
ส่วนกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่น้อยกว่า โดยที่มุมความเสียดทานภายในของดินจะเพิ่มขึ้น
ประมาณ 2 และ 6 องศา ที่ปริมาณปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าความชื้นน้ำเฉลี่ยของดิน
เมื่อไม่ได้ผสมปูนขาวจะเพิ่มขึ้นจาก 10^{-9} เป็น 10^{-8} ซม. ต่อ วินาที เมื่อผสมปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์

แนวทางการแก้ไขปัญหาดินกระจายตัว ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ
จังหวัดสกลนคร แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือ การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ปูนขาว และการควบคุมคุณภาพ
การบดอัดดินร่วมกับการใช้วัสดุโอสังเคราะห์ จากการศึกษาพบว่า การใช้จีโอเทกซ์ไทล์ ที่ เอส 50 สำหรับทำ
หน้าที่เป็นวัสดุรองในดินกระจายตัวบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และมีความหนาแน่นแห่งสูงสุด
ตั้งแต่ 95 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะทำให้ดินมีความต้านทานต่อการกัดเซาะ ส่วนการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้
ปูนขาว จะช่วยแก้ปัญหาดินกระจายตัวของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินกระจายตัวรุนแรงได้เป็นที่น่าพอใจ

Choodech Thongmit 2008: A Study on Alternative Countermeasures on Dispersive Soil Erosions for Reservoirs and Road Embankments in Kasetsart University Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Supakij Nontananandh, D.Eng. 198 pages.

This study is aimed at investigating alternative countermeasures on dispersive soil and soil erosion in form of gullies around reservoirs and road embankments in Kasetsart University Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus. Based on dispersivity classification in laboratory and site reconnaissance surveys, the soil around Mukdahan reservoir, Udon-Thani reservoir and embankment nearby are considered as highly dispersive zone. Therefore, the use of soil in these areas could be carefully planned with caution. The test results of soil dispersion using physical index tests and detailed site investigations show that the soil volume loss due to gully erosions increases as soil density decreases and slope of reservoir increases. The frequency of gully occurrence vary proportionately with the gully depth. The gully width to gully depth is found to be 1 : 0.6 approximately. The magnitude of soil volume loss due to gully erosion depends on soil dispersion.

Based on double hydrometer test, degree of dispersion (DDS) of soil tend to decrease with lime content. At lime content of 1.5% and 2% by dry weight of soil, DDS decreased by about 15% for initial DDS of 51.30% and 72.21% respectively. The unconfined compressive strength and shear strength from direct shear test of dispersive soil tend to increase with lime content. Especially, at lime content of 2% by dry weight of soil, UCS increased to about 1.4 to 2.1 times the strength of only 1% lime-stabilized soil. The cohesion decreased with lime content. However, internal friction angle by direct shear test increased by about 2 and 6 degrees at lime content of 1% and 2% respectively. Average strain at failure appeared to be low (2 to 6%). Furthermore, average hydraulic conductivity of soil increased to 10^{-8} cm/sec when the lime content was 2%.

The study ultimately focused on the two alternative countermeasures for dispersive soil erosions, namely, lime treatment, and compaction control with geosynthetics. The test results indicated that the use of geotextile TS50 might be able to filter the dispersive clay particles satisfactorily only when compacted at optimum water content. However, compacted dispersive clay at optimum moisture content will be able to resist erosion in short term and lime treatment still works for improving the soils at any degree of dispersion.

Choodech Thongmit

Student's signature



Thesis Advisor's signature

23 / May / 2008

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ศุภกิจ นนทนนันท์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษาทั้งในเรื่องการทำวิจัย การตรวจแก้ไขบทความต่าง ๆ และร่างวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งให้คำแนะนำในเรื่องการดำเนินชีวิตที่ดี และดูแลผู้วิจัยตลอดจนเอาใจใส่สนับสนุนช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ก่อโชค จันทรวงศ์ ที่ให้ความกรุณาอย่างสูงเป็นกรรมการวิชาเอกให้กับผู้วิจัย และให้ความสะดวกในการทำวิจัยที่วิทยาเขตสกลนคร

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. วัชรินทร์ วิทกุล ที่ให้ความกรุณาอย่างสูงเป็นกรรมการวิชาการ และให้ความสะดวกในเรื่องนัดหมายเวลาในการสอบ และขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร. เกียรติศักดิ์ มั่นเสถียรสิน ที่ให้ความกรุณาอย่างสูงเป็นผู้แทนบัณฑิตให้กับผู้วิจัยโดยไม่ขัดข้อง

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร. อภินิติ โชติสังกาศ ที่ให้ความกรุณาอย่างสูงเป็นอาจารย์พี่เลี้ยง ออกภาคสนามด้วยกัน ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการออกสำรวจภาคสนาม และการจัดทำรูปกราฟต่าง ๆ รวมทั้งตรวจแก้ไขบทความภาษาอังกฤษและเนื้อความในบทความต่าง ๆ หลายครั้ง

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ที่ได้อนุมัติทุนอุดหนุนงานวิจัยขึ้นนี้ถึง 2 ทุน และขอขอบคุณบุคลากรและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการขอยืมอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ รวมทั้งให้คำแนะนำดี ๆ ตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณพี่สมเจตน์ ถิ่นนคร หัวหน้ากลุ่มงานดินด้านวิทยาศาสตร์ สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความกรุณารับงานทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของผู้วิจัยโดยไม่คิดค่าใช้จ่ายใด ๆ

งานวิจัยชิ้นนี้ไม่อาจสำเร็จได้ถ้าขาดผู้ช่วยที่ดี คือนิสิตปริญญาตรี 5 คน ที่ได้ร่วมทุกข์ร่วมสุขกันมาตลอดระยะเวลาหลายเดือน คือ นายปิยะวัฒน์ บุราณเคน นายวิระโชค สุนทรเต็ม นายวินิจ ไชยภักดี นายเดวิท วาณะวงศ์ และนายศุภชัย จำปี

ชูเดช ทองมิตร

มีนาคม 2551

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| สารบัญ | (1) |
| สารบัญตาราง | (2) |
| สารบัญภาพ | (5) |
| สัญลักษณ์และคำย่อ | (13) |
| คำนำ | 1 |
| วัตถุประสงค์ | 5 |
| การตรวจเอกสาร | 8 |
| อุปกรณ์และวิธีการ | 50 |
| อุปกรณ์ | 50 |
| วิธีการ | 52 |
| ผลและวิจารณ์ | 58 |
| สรุปและข้อเสนอแนะ | 160 |
| สรุป | 160 |
| ข้อเสนอแนะ | 164 |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง | 166 |
| ภาคผนวก | 171 |
| ภาคผนวก ก ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินก่อนและหลัง ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว | 172 |
| ภาคผนวก ข ผลทดสอบ Double Hydrometer Test | 176 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---|------|
| 1 | ปริมาณอนุภาคของดินเหนียว ในจำนวน 195 ตัวอย่าง โดยวิธี Pinhole Test | 10 |
| 2 | การจำแนกประเภทของดินจากผลการทดสอบ Pinhole Test | 21 |
| 3 | ผลการจำแนกดินกระจายตัวโดยใช้เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของดิน | 22 |
| 4 | ปริมาณดินเหนียวของตัวอย่างทดสอบ 71 ตัวอย่าง กับระดับการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Double Hydrometer Test | 60 |
| 5 | ระดับการกระจายตัวของดิน โดยการทดสอบ Double Hydrometer Test เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของเม็ดดิน เฉพาะตัวอย่างที่มีการกระจายตัวรุนแรง | 63 |
| 6 | เปรียบเทียบผลการจำแนกดินกระจายตัว โดยวิธี Double Hydrometer Test และ Pinhole Test ของตัวอย่างทดสอบ จำนวน 63 ตัวอย่าง | 73 |
| 7 | เปรียบเทียบผลการจำแนกดินกระจายตัว โดยวิธี Double Hydrometer Test และ Pinhole Test แยกตามระดับการกระจายตัวของดิน | 73 |
| 8 | (ก) สรุปความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ ความถี่ สัดส่วนของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก และปริมาตรของดินที่สูญหายไปโดยประมาณบริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ | 84 |
| | (ข) สรุปปริมาตรของดินที่สูญหายไปโดยประมาณ จากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกบริเวณขอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ | 85 |
| 9 | สรุปสัดส่วนของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก บริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ | 89 |
| 10 | สรุปความหนาแน่นเปียก ความหนาแน่นแห้ง และความหนาแน่นช่องว่างอากาศ เป็นศูนย์โดยวิธีแทนที่ทราย บริเวณขอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ และบนกองดินถม | 96 |
| 11 | สรุปค่าความชุ่ม ค่าความเป็นกรด-ด่าง และความลึกเฉลี่ยของอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ (พฤษภาคม 2550) | 97 |
| 12 | พื้นที่ผิวหน้าและความจุโดยประมาณของอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ภายในวิทยาเขต (พฤษภาคม 2550) | 103 |
| 13 | ปริมาตรดินที่สูญหายไปในช่วงความถี่ต่าง ๆ เนื่องจากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก และจำนวนของข้อมูล (จำนวนความถี่) ในช่วงความถี่นั้น ๆ | 114 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 14 | ปริมาตรดินที่สูญเสียน้ำไปในช่วงลึกต่าง ๆ เนื่องจากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก และจำนวนของข้อมูล (จำนวนร่องการกัดเซาะ) ในช่วงความลึกนั้น ๆ | 116 |
| 15 | ปริมาตรดินที่สูญเสียน้ำไปในช่วงความลาดชันต่าง ๆ เนื่องจากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก และจำนวนของข้อมูลในช่วงความลาดชันนั้น ๆ | 118 |
| 16 | คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพ | 125 |
| 17 | ผลการเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการตอกต่อชั้นของตุ้มน้ำหนักขนาดเล็กกับตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน สำหรับแบบทรงกระบอกขนาดเล็กกับแบบมาตรฐาน | 129 |
| 18 | กำลังเฉลี่ยก่อนการปรับปรุงคุณภาพ ของดินบริเวณอ่างอุทธรธานีเหนือและอ่างกาฬสินธุ์ โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว | 130 |
| 19 | สรุปกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเฉลี่ย ของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุทธรธานีเหนือ และดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม | 133 |
| 20 | สรุปความเครียดเฉลี่ยที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียว ของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุทธรธานีเหนือและดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม | 134 |
| 21 | กำลังรับแรงเหมือนแบบเฉือนโดยตรงของตัวอย่างทดสอบ ที่หน่วยแรงกดในแนวตั้ง 0.64, 1.27 และ 2.56 กก. ต่อ ตร.ซม. | 136 |
| 22 | (ก) สรุปกำลังรับแรงเหมือนแบบโดยตรงเฉลี่ย ของดินกระจายตัวอ่างอุทธรธานีเหนือ และดินไม่กระจายตัวอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม โดยใช้น้ำหนักกดทับในแนวตั้ง 2 กิโลกรัม (0.64 กก. ต่อ ตร.ซม.) | 138 |
| | (ข) สรุปกำลังรับแรงเหมือนแบบโดยตรงเฉลี่ย ของดินกระจายตัวอ่างอุทธรธานีเหนือ และดินไม่กระจายตัวอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม โดยใช้น้ำหนักกดทับในแนวตั้ง 4 กิโลกรัม (1.27 กก. ต่อ ตร.ซม.) | 138 |
| | (ค) สรุปกำลังรับแรงเหมือนแบบโดยตรงเฉลี่ย ของดินกระจายตัวอ่างอุทธรธานีเหนือ และดินไม่กระจายตัวอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม โดยใช้น้ำหนักกดทับในแนวตั้ง 8 กิโลกรัม (2.56 กก. ต่อ ตร.ซม.) | 139 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|--------------|--|------|
| 23 | สรุปค่าความซึมผ่านของน้ำโดยเฉลี่ย และความขุ่นเฉลี่ยของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินของดินกระจายตัวอย่างอุทธรณีเหนือและดินไม่กระจายตัวอย่างกาพสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้วิธี Constant Pressure Head | 146 |
| 24 | ปริมาณความชื้นและน้ำหนักของดินแห้งที่ต้องใช้ในการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้มีความแน่นตามที่ต้องการ ที่ขอบเขตต่ำสุดและสูงสุด | 151 |
| 25 | คุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของแผ่นใยสังเคราะห์ (จีโอเท็กซ์ไทล์ ที่ เอส 50) | 153 |
| | | |
| ตารางผนวกที่ | | |
| ข1 | ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดดินกับเปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าที่ระบุจากการทดสอบ Double Hydrometer Test | 177 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 1 | พื้นที่ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร | 2 |
| 2 | ลักษณะภูมิประเทศของดินกระจายตัว บริเวณอ่างเก็บน้ำและถนนภายในวิทยาเขต | 3 |
| 3 | การวิบัติแบบ Piping Failure ของดินเหนียวกระจายตัวบริเวณ Slope Cut | 14 |
| 4 | การวิบัติของลาดดินคันทางซึ่งเกิดจากการนำดินกระจายตัวมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง | 15 |
| 5 | การวิบัติทั่วไปของเขื่อนดินเนื้อเดียวซึ่งใช้ดินกระจายตัวเป็นวัสดุก่อสร้าง | 15 |
| 6 | แผนภูมิจำแนกดินกระจายตัว โดยวิธี Emerson Crumb Test | 18 |
| 7 | เครื่องมือทดสอบ Pinhole Test และหน้าตัดผ่านตัวอย่างทดสอบ | 19 |
| 8 | ขั้นตอนการจำแนกดินกระจายตัวโดยวิธี Pinhole Test | 20 |
| 9 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESP และ SAR ในรูปของสมการ Regression | 24 |
| 10 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESP และ SAR ในรูปของ Nomogram | 25 |
| 11 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือละลายโซเดียมกับปริมาณเกลือละลายทั้งหมด | 23 |
| 12 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือละลายโซเดียมกับปริมาณเกลือละลายทั้งหมด เมื่อทำการพล็อตค่า SAR ลงไปด้วย | 26 |
| 13 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESP กับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน | 26 |
| 14 | การเกาะตัวของสาร CSH ในโครงสร้างดินเหนียวผสมปูนขาว | 33 |
| 15 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Strength กับปริมาณสารเชื่อมประสาน | 34 |
| 16 | การเปลี่ยนแปลง Plasticity ของดินเมื่อผสมปูนขาว | 35 |
| 17 | ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อการกัดเซาะกับความเหนียวของดิน | 36 |
| 18 | ปริมาณของปูนขาวที่มีผลต่อกราฟการบดอัดดิน | 37 |
| 19 | ความสัมพันธ์ของปริมาณปูนขาวต่อกำลังของดินบางชนิด | 39 |
| 20 | ผลกระทบของความล่าช้าในการบดอัดของดินผสมปูนขาวเทียบกับดินผสมซีเมนต์ | 41 |
| 21 | การพัฒนากำลังตามอายุการบ่มของดินผสมปูนขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก | 42 |
| 22 | การจำลองรูปแบบการเสริมกำลังของดินด้วยรากในแนวตั้งฉาก | 45 |
| 23 | รากแก้วและรากฝอยของต้นไม้ | 46 |
| 24 | ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยตลอดโครงการ | 56 |
| 25 | ผลการทดสอบ Double Hydrometer Test ตามมาตรฐาน ASTM D4221 บริเวณกองดินถมและรายอ่างเก็บน้ำ | 59 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 26 | วิธีการหาระดับการกระจายตัวของดิน จากการทดสอบ Double Hydrometer Test | 60 |
| 27 | บริเวณอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ภายในวิทยาเขต ซึ่งแบ่งไว้เบื้องต้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงถึง และระดับการกระจายตัวเริ่มต้นของดินจากผลทดสอบ Double Hydrometer Test | 61 |
| 28 | ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายขนาดของเม็ดดินกับระดับของการกระจายตัว จากการจำแนกโดยวิธี Double Hydrometer Test | 62 |
| 29 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียว (Percentage Clay) กับระดับการกระจายตัวของดินบริเวณกองดินถมและรายอ่างเก็บน้ำ | 64 |
| 30 | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ไซเดียมต่อปริมาณเกลือละลายทั้งหมดของ ตัวอย่างดินอ่างอุตราธานีเหนือและกองดินถม | 65 |
| 31 | ความสัมพันธ์ระหว่าง Atterberg's limits กับความสามารถในการต้านทานต่อการ กัดเซาะของดิน บริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ | 66 |
| 32 | อัตราการไหลของน้ำผ่านรูเจาะดินขนาด 1 มม. จากการทดสอบ Pinhole Test ของ ตัวอย่างดินบริเวณกองดินถม และอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ | 67 |
| 33 | เครื่องมือทดสอบ Pinhole Test แบบมาตรฐาน และตำแหน่งของวัสดุ (ดินบดอัด กรวดกลม และ wire-mesh) ในแบบ | 71 |
| 34 | (ก) ตัวอย่างดินผ่าตามยาว เพื่อวัดขนาดรูเจาะหลังทดสอบ และ (ข) ตัวอย่างน้ำ หลังทดสอบที่เสดของน้ำนั้น ๆ สำหรับนำไปวัดความชุ่ม ประกอบการพิจารณา ผลการจำแนกดิน | 71 |
| 35 | ขนาดรูเจาะหลังทดสอบของตัวอย่างดินบริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ กับผลการจำแนกดินกระจายตัว โดยวิธี Pinhole Test | 72 |
| 36 | ระดับการกระจายตัวของดิน (เกรด) บริเวณอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ซึ่งจำแนกโดยวิธี Crumb Test | 75 |
| 37 | ลักษณะทางกายภาพของดินบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ | 76 |
| 38 | ความสัมพันธ์ระหว่างสีผสมของดินจากสารละลายของดิน น้ำ และสารแตกตัว จากการทดสอบ Standard Hydrometer Test (ASTM D422) กับระดับการกระจายตัวของดิน ซึ่งจำแนกโดยวิธี Double Hydrometer Test (ASTM D4221) | 77 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 39 | (ก) ความกว้างต่ำสุดและสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก บริเวณอ่างอุครธานีเหนือ อ่างกาฬสินธุ์ และอ่างมุกดาหาร โดยพิจารณาตามช่วงความกว้าง | 79 |
| | (ข) ความลึกต่ำสุดและสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก บริเวณอ่างอุครธานีเหนือ อ่างกาฬสินธุ์ และอ่างมุกดาหาร โดยพิจารณาตามช่วงความลึก | 79 |
| 40 | ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชัน ความถี่ และความลึกสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกรอบอ่างอุครธานีเหนือ อ่างกาฬสินธุ์ และอ่างมุกดาหาร | 81 |
| 41 | ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชัน ความถี่ และความลึกสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกรอบอ่างอุครธานีใต้ และอ่างสกลนคร | 82 |
| 42 | ปริมาตรของดินที่สูญหายไปโดยประมาณ (Approx. Volume Loss) จากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกรอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ | 86 |
| 43 | ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก บริเวณอ่างอุครธานีเหนือ อ่างกาฬสินธุ์ และอ่างมุกดาหาร | 90 |
| 44 | (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก บริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ | 91 |
| | (ข) ความกว้างและความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก และแนวโน้มสัดส่วนความกว้างต่อความลึกเฉลี่ยของการกัดเซาะ บริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ | 92 |
| 45 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเปียก ความหนาแน่นแห้ง และความหนาแน่นช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ จากการทดสอบความแน่นของดินในสนาม โดยวิธีแทนที่ทราย | 93 |
| 46 | ระดับก้นอ่างและระดับผิวน้ำโดยเฉลี่ย หน้าตัดของท้องคลอง โดยประมาณตามแนวเส้นกริด A-A และคุณภาพของน้ำในอ่างนครพนม (พฤษภาคม 2550) | 98 |
| 47 | ระดับก้นอ่างและระดับผิวน้ำโดยเฉลี่ย หน้าตัดของท้องคลอง โดยประมาณตามแนวเส้นกริด A-A และคุณภาพของน้ำในอ่างสกลนคร (พฤษภาคม 2550) | 99 |
| 48 | ระดับก้นอ่างและระดับผิวน้ำโดยเฉลี่ย หน้าตัดของท้องคลอง โดยประมาณตามแนวเส้นกริด A-A และคุณภาพของน้ำในอ่างมุกดาหาร (พฤษภาคม 2550) | 100 |
| 49 | ระดับก้นอ่างและระดับผิวน้ำโดยเฉลี่ย หน้าตัดของท้องคลอง โดยประมาณตามแนวเส้นกริด A-A และคุณภาพของน้ำในอ่างอุครธานีเหนือ (พฤษภาคม 2550) | 101 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 50 | ระดับกันอ่างและระดับผิวน้ำโดยเฉลี่ย หน้าตัดของท้องคลองโดยประมาณตามแนวเส้นกริด A-A และคุณภาพของน้ำในอ่างกาฬสินธุ์ (พฤษภาคม 2550) | 102 |
| 51 | ความสัมพันธ์ระหว่างแนวโน้มของชั้นดินกระจายตัวรอบอ่างเก็บน้ำ กลุ่มดินในระบบ USCS ระดับผิวน้ำและระดับกันอ่าง (พฤษภาคม 2550) จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการสำรวจภาคสนาม | 105 |
| 52 | ความลึกและความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และความแน่นของดินขบอ่างกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณบริเวณอ่างอุครธานีเหนือ | 109 |
| 53 | ความลึกและความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และความแน่นของดินขบอ่างกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณบริเวณอ่างมุกดาหาร | 110 |
| 54 | ความลึกและความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และความแน่นของดินขบอ่างกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ | 111 |
| 55 | ความลึกและความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และความแน่นของดินขบอ่างกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณบริเวณอ่างอุครธานีใต้ | 112 |
| 56 | ความลึกและความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และความแน่นของดินขบอ่างกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณบริเวณอ่างสกลนคร | 113 |
| 57 | (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ช่วงต่าง ๆ ของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ แยกรายอ่างเก็บน้ำ | 115 |
| | (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ช่วงต่าง ๆ ของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ แยกรายอ่างเก็บน้ำ | 117 |
| | (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันของอ่างเก็บน้ำช่วงต่าง ๆ กับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ แยกรายอ่างเก็บน้ำ | 120 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 58 | แนวโน้มน้ำของดินกระจายตัวในวิทยาเขตโดยยึดพื้นที่บริเวณอ่างเก็บน้ำเป็นหลัก | 122 |
| 59 | ผลการทำ Trial Mixes ของดินผสมปูนขาวที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดย น้ำหนักดินแห้ง ซึ่งมีระดับการกระจายตัวเริ่มต้นต่าง ๆ กัน | 123 |
| 60 | การตกตะกอนของดินผสมปูนขาว 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง เมื่อเวลา ผ่านไป 15, 30 และ 60 นาที ของตัวอย่างดินอ่างอุครธานีเหนือ (DDS เท่ากับ 51.30 เปอร์เซ็นต์) | 124 |
| 61 | (ก) การกระจายขนาดของเม็ดดินและระดับการกระจายตัวของดิน โดยการทดสอบ Double Hydrometer Test ของดินบริเวณอ่างอุครธานีเหนือ | 127 |
| | (ข) การกระจายขนาดของเม็ดดินและระดับการกระจายตัวของดิน โดยการทดสอบ Double Hydrometer Test ของดินบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ | 127 |
| 62 | (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ของดินบริเวณอ่างอุครธานีเหนือ | 128 |
| | (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ของดินบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ | 129 |
| 63 | (ก) กำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าความเชื่อมแน่นของดินกระจายตัวบริเวณอ่าง อุครธานีเหนือ ก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว เมื่อพิจารณาตามปริมาณ ปูนขาวและอายุการบ่ม | 131 |
| | (ข) กำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าความเชื่อมแน่นของดินไม่กระจายตัวบริเวณ อ่างกาฬสินธุ์ ก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว เมื่อพิจารณาตามปริมาณ ปูนขาวและอายุการบ่ม | 132 |
| 64 | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเคียดกับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวโดยเฉลี่ย ของดินบริเวณอ่างอุครธานีเหนือกับอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ | 135 |
| 65 | (ก) กำลังรับแรงเฉือนแบบเนียนโดยตรงก่อนการปรับปรุงคุณภาพ ของตัวอย่าง ดินบริเวณอ่างอุครธานีเหนือ ตามอายุการบ่ม | 136 |
| | (ข) กำลังรับแรงเฉือนแบบเนียนโดยตรงก่อนการปรับปรุงคุณภาพ ของตัวอย่าง ดินบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ ตามอายุการบ่ม | 137 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 66 | (ก) กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือน โดยตรงของตัวอย่างดินบริเวณอ่างอุครธานีเหนือ หลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม | 140 |
| | (ข) กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือน โดยตรงของตัวอย่างดินบริเวณอ่างอุครธานีเหนือ หลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม | 140 |
| 67 | (ก) กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือน โดยตรงของตัวอย่างดินบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ หลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม | 141 |
| | (ข) กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือน โดยตรงของตัวอย่างดินบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ หลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม | 141 |
| 68 | (ก) กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือน โดยตรงเฉลี่ย ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ของดินบริเวณอ่างอุครธานีเหนือ | 142 |
| | (ข) กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือน โดยตรงเฉลี่ย ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ของดินบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ | 142 |
| 69 | (ก) Mohr-Coulomb Failure Envelope ของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุครธานีเหนือ หลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ | 143 |
| | (ข) Mohr-Coulomb Failure Envelope ของดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ หลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ | 144 |
| 70 | (ก) ค่าความชื้นน้ำโดยเฉลี่ยของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุครธานีเหนือ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของดินแห้ง | 148 |
| | (ข) ค่าความชื้นน้ำโดยเฉลี่ยของดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของดินแห้ง | 148 |
| 71 | ค่าความชื้นน้ำโดยเฉลี่ยของดิน และค่าความชุ่มเฉลี่ยของน้ำที่ไหลซึมออกมา บริเวณอ่างอุครธานีเหนือและอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ | 149 |
| 72 | (ก) ความสามารถของจีไอเท็กซ์ไทล์ ที เอส 50 สำหรับทำหน้าที่เป็นวัสดุกรอง ตัวอย่างดินบริเวณกองดินถม เมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นใกล้เคียงสภาพในสนาม | 155 |
| | (ข) ความสามารถของจีไอเท็กซ์ไทล์ ที เอส 50 สำหรับทำหน้าที่เป็นวัสดุกรอง ตัวอย่างดินอ่างอุครธานีเหนือ เมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นใกล้เคียงสภาพในสนาม | 155 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|------------|--|------|
| | (ค) ความสามารถของจีโอเท็กซ์ไทล์ ที เอส 50 สำหรับทำหน้าที่เป็นวัสดุกรอง ตัวอย่างดินอ่างมุกดาหาร เมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นใกล้เคียงสภาพในสนาม | 156 |
| | (ง) ความสามารถของจีโอเท็กซ์ไทล์ ที เอส 50 สำหรับทำหน้าที่เป็นวัสดุกรอง ตัวอย่างดินอ่างกาฬสินธุ์ เมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นใกล้เคียงสภาพในสนาม | 156 |
| 73 | เปรียบเทียบอัตราการไหลและความชุ่มของน้ำของตัวอย่างดินอ่างอุดรธานีเหนือ กับอ่างกาฬสินธุ์เมื่อไม่มีวัสดุกรอง โดยทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม | 157 |
| 74 | ลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง 3 ลักษณะ เมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดสูง และเมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดต่ำ สำหรับวัสดุกรองเพียงชั้นเดียว ซึ่งทำการบดอัดที่ขอบเขตต่ำสุด (Lower Bound) | 158 |
| 75 | การพัดพาของตะกอนผ่านรูเจาะดิน เมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดต่ำ และเมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดสูง ของตัวอย่างดินอ่างอุดรธานีเหนือ | 158 |
| 76 | การสะสมของตะกอนที่แผ่นวัสดุกรอง (Filter Cake) เมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดต่ำ (ทดสอบที่ขอบเขตต่ำสุด) ของตัวอย่างดินอ่างอุดรธานีเหนือ สำหรับวัสดุกรอง 3 ชั้น | 159 |
| 77 | สีและความชุ่มของน้ำที่เกิดจากเม็ดดินถูกพัดพาออกมากับน้ำ เมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดต่ำ (ทดสอบที่ขอบเขตต่ำสุด) โดยไม่มีวัสดุกรอง ของตัวอย่างดินอ่างกาฬสินธุ์ | 159 |
| | | |
| ภาพผนวกที่ | | |
| ก1 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินกระจายตัวที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว จากการทดสอบ Unconfined Compression Test | 173 |
| ก2 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินกระจายตัวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบ Unconfined Compression Test | 173 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ | | หน้า |
|------------|---|------|
| ก3 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินกระจายตัวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบ Unconfined Compression Test | 174 |
| ก4 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินไม่กระจายตัวที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว จากการทดสอบ Unconfined Compression Test | 174 |
| ก5 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินไม่กระจายตัวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบ Unconfined Compression Test | 175 |
| ก6 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินไม่กระจายตัวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบ Unconfined Compression Test | 175 |

คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และอักษรย่อ

| | |
|---|---|
| กก. | กิโลกรัม |
| ซม. | เซนติเมตร |
| ตร.ซม. | ตารางเซนติเมตร |
| ตร.ม. | ตารางเมตร |
| มม. | มิลลิเมตร |
| มล. | มิลลิลิตร |
| มอก. | มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย |
| รทก. | ระดับน้ำทะเลปานกลาง |
| ลบ.ม. | ลูกบาศก์เมตร |
| % | เปอร์เซ็นต์, ร้อยละ |
| ϕ | มุมความเสียดทานภายในของดิน (Internal Friction Angle) |
| ϕ_x | มุมความเสียดทานภายในของดินที่ปริมาณปูนขาวหนึ่ง ๆ |
| ϕ_{x-1} | มุมความเสียดทานภายในของดินเดิมที่ปริมาณปูนขาวน้อยกว่า อยู่ 1 เปอร์เซ็นต์ |
| σ | หน่วยแรงกด (ความเค้นกด) ในแนวตั้งฉาก |
| $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ | หน่วยแรงกด (ความเค้นกด) ในแนวตั้งฉากที่หน้าหักกดทับต่าง ๆ |
| τ | หน่วยแรงเฉือน (ความเค้นเฉือน) |
| \emptyset | เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน |
| θ | มุมของแรงเฉือนที่บิดไปของราก |
| γ_d | ความหนาแน่นแห้ง |
| γ_w | ความหนาแน่นเปียก |
| $(\gamma_d)_{\text{average}}, (\gamma_{d, \text{avg.}})_{\text{field}}, \gamma_{d, \text{field}}$ | ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของดินในสนาม |
| $(\gamma_{d, \text{max.}})_{\text{lab}}, \gamma_{d, \text{max}}$ | ความหนาแน่นสูงสุดของดินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ |
| $\epsilon_{\text{at UCS}}$ | ความเครียดที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุด |
| $^{\circ}\text{C}$ | อุณหภูมิเป็นองศาเซลเซียส |
| $^{\circ}\text{F}$ | อุณหภูมิเป็นองศาฟาเรนไฮต์ |
| $(\text{NaPO}_3)_6$ | โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต (Sodium hexametaphosphate) หรือ Calgon |
| ΔS_R | กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยราก |

คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และอักษรย่อ (ต่อ)

| | |
|--------------------------------|--|
| 2S _R | กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยราก |
| A | พื้นที่หน้าตัดของดิน |
| Al ₂ O ₃ | อลูมิเนียมออกไซด์ |
| Al ³⁺ | อลูมิเนียมไอออน |
| Approx. | ค่าโดยประมาณ ตัวย่อของ Approximate |
| A _R | พื้นที่หน้าตัดของรากที่อยู่ในพื้นที่หน้าตัดของดิน |
| ASTM | มาตรฐานการทดสอบโดย American Society for Testing and Materials |
| ave | ค่าเฉลี่ย |
| c | ค่าความเชื่อมแน่นของดิน (Cohesion) |
| Ca | ธาตุแคลเซียม |
| Ca(OH) ₂ | สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ |
| Ca ²⁺ | แคลเซียมไอออน |
| CaCO ₃ | สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต |
| CAH | สารประกอบแคลเซียมอลูมินตไฮเดรต (Calcium aluminate Hydrate) |
| CaO | สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ |
| CBR | อัตราส่วนหน่วยแรงต้านของดินบดอัดต่อแรงต้านการกดของหินคลุกมาตรฐาน ย่อมาจาก California Bearing Ratio |
| CEC | ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (Cation Exchange Capacity) |
| CH | ดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง (High Plasticity Clay) |
| CL | ดินเหนียวที่มีความเหนียวต่ำ (Low Plasticity Clay) |
| cm | เซนติเมตร |
| cm/sec. | เซนติเมตรต่อวินาที |
| CO ₂ | ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ |
| CSH | สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) |
| CU-Test | การทดสอบแบบเร็ว แต่ยอมให้ตัวอย่างดินเกิดการยุบตัวก่อนการให้แรงเฉือน ย่อมาจาก Consolidated Undrained Test |

คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และอักษรย่อ (ต่อ)

| | |
|--------------------------------|---|
| d | ขนาดรูเจาะหลังทดสอบ จากการทดสอบ Pinhole Test |
| D1 | ดินกระจายตัวสูง จากการจำแนกโดยวิธี Pinhole Test |
| D2 | ดินกระจายตัวสูง จากการจำแนกโดยวิธี Pinhole Test |
| DDS | ระดับการกระจายตัวของดิน จากการทดสอบ DHT ย่อมาจาก Degree of Dispersion |
| deg. | มุมเป็นองศา กับแนวราบ |
| DHT | การทดสอบ Double Hydrometer Test |
| ds/m., mmhos/cm | หน่วยวัดค่าการนำไฟฟ้าของดินเป็นเดซิซีเมนต์ต่อเมตร หรือเท่ากับมิลลิโม่ห์ต่อเซนติเมตร |
| E | ตัวอย่างดินทดสอบที่เก็บจากกองดินถมข้างอ่างอุทธรธานี |
| EL. M.S.L. | ระดับอ้างอิงมาตรฐานจากระดับน้ำทะเลปานกลาง |
| ESP | เปอร์เซ็นต์โซเดียมในดินที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Sodium Percentage) |
| Fe ₂ O ₃ | สารประกอบเฟอร์รัสออกไซด์ |
| g | กรัม ตัวย่อของ gram(s) |
| g/m ² | กรัมต่อตารางเมตร |
| H ⁺ | ไฮโดรเจนไอออน |
| H ₂ O | สารประกอบของน้ำ |
| HD | ดินกระจายตัวรุนแรง |
| i.e. | ดังนั้น, นั่นคือ |
| I.W.L. | ระดับเก็บกักปานกลาง ย่อมาจาก Intermediate Water Level |
| K | ธาตุโปแตสเซียม |
| K ⁺ | โปแตสเซียมไอออน |
| kN/m | หน่วยวัดแรงเป็นกิโลนิวตันต่อเมตร |
| kPa | หน่วยวัดแรงเป็นกิโลปาสคาล |
| KS | ตัวอย่างดินทดสอบที่เก็บจากอ่างกาฬสินธุ์ใต้ |
| ksc | หน่วยวัดหน่วยแรง (ความเค้น) เป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร |
| L.L. | ปริมาณความชื้นที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสถานะภาพจากของเหลวเป็นสารหนืดตัว (Liquid Limit) |

คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และอักษรย่อ (ต่อ)

| | |
|---------------------|---|
| Li ⁺ | ลิเทียมไอออน |
| l/m ² /s | หน่วยวัดอัตราการไหลของน้ำเป็นลิตรต่อตารางเมตรต่อวินาที หรือมีค่าเท่ากับมิลลิเมตรต่อวินาที |
| l/m.h | หน่วยวัดอัตราการไหลของน้ำเป็นลิตรต่อเมตร-ชั่วโมง |
| M | ตัวอย่างดินทดสอบที่เก็บจากอ่างมูกดาหาร |
| m. | เมตร ตัวย่อของ metre(s) |
| m ³ | ปริมาตรเป็นลูกบาศก์เมตร |
| max. | ค่าสูงสุด ตัวย่อของ maximum |
| Max. DDS | ระดับการกระจายตัวสูงสุด จากการทดสอบ DHT |
| MD | ดินกระจายตัวปานกลาง |
| MDD | ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดิน (Maximum Dry Density) จากการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ |
| meq/100 g | หน่วยวัดความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน เป็น milliequivalents ต่อ 100 กรัมของดิน |
| meq/l | หน่วยวัดปริมาณประจุบวกในดิน เป็น milliequivalents ต่อ ลิตร |
| Mg | ธาตุแมกนีเซียม |
| Mg(OH) ₂ | สารประกอบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ |
| Mg ²⁺ | แมกนีเซียมไอออน |
| MgO | สารประกอบแมกนีเซียมออกไซด์ |
| MH | ดินทรายแป้งที่มีความเหนียวสูง (High Plasticity Silt) |
| min. | ค่าต่ำสุด ตัวย่อของ minimum |
| ml | มิลลิลิตร ตัวย่อของ millilitre(s) |
| ml/sec. | มิลลิลิตรต่อวินาที |
| mm | มิลลิเมตร ตัวย่อของ millimetre(s) |
| mm/s | มิลลิเมตรต่อวินาที |
| N | หน่วยวัดแรงเป็นนิวตัน ตัวย่อของ newton |
| Na | ธาตุโซเดียม |
| Na ⁺ | โซเดียมไอออน |
| NaOAc | สารละลายโซเดียมแอซิเตต |

คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และอักษรย่อ (ต่อ)

| | |
|---------------------|---|
| ND | ดินไม่กระจายตัว |
| ND1 | ดินไม่กระจายตัว จากการจำแนกโดยวิธี Pinhole Test |
| ND2 | ดินไม่กระจายตัว จากการจำแนกโดยวิธี Pinhole Test |
| ND3 | ดินกระจายตัวปานกลาง จากการจำแนกโดยวิธี Pinhole Test |
| ND4 | ดินกระจายตัวปานกลาง จากการจำแนกโดยวิธี Pinhole Test |
| NH ₄ OAc | สารละลายแอมโมเนียมแอซิเตต |
| NK | ตัวอย่างดินทดสอบที่เก็บจากอ่างหนองคาย |
| NP | ตัวอย่างดินทดสอบที่เก็บจากอ่างนครพนม |
| NTU | หน่วยวัดความขุ่นที่ได้จากการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Nephelometer ย่อมาจาก Nephelometric Turbidity Unit |
| O ₉₀ | ขนาดรูเปิดประสิทธิผลของจีโอเท็กซ์ไทล์ (Effective Opening Size) |
| O ₉₅ | ขนาดรูเปิดที่ปรากฏของจีโอเท็กซ์ไทล์ (Apparent Opening Size) |
| OMC | ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดิน (Optimum Moisture Content) จากการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ |
| P | แรงดัน |
| P.L. | ปริมาณความชื้นที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสถานภาพจากพลาสติกเป็น กึ่งของแข็ง (Plastic Limit) |
| PET | เปอร์เซ็นต์การกัดเซาะ (Physical Erosion Test) |
| pH | ค่าความเป็นกรดต่าง |
| PI | ดัชนีความเหนียวของดิน (Plasticity Index) |
| ppm | ส่วนในหนึ่งล้านส่วน (parts per million) |
| R ² | ค่ากำลังสองน้อยที่สุด (least square) |
| S | ตัวอย่างดินทดสอบที่เก็บจากอ่างสกลนคร |
| S | กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมราก |
| s ⁻¹ | หน่วยวัดการยอมให้น้ำไหลผ่านเป็นต่อวินาที |
| SAR | อัตราการดูดซับโซเดียมในดิน (Sodium Adsorption Ratio) |
| SC | ดินทรายที่มีส่วนผสมของดินเหนียว (Clayey Sand) |
| SiO ₂ | สารประกอบซิลิกาออกไซด์ |
| SM | ดินทรายที่มีส่วนผสมของทรายแป้ง (Silty Sand) |

คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และอักษรย่อ (ต่อ)

| | |
|-------------------|--|
| SP-SC | ดินทรายที่มีส่วนผสมของดินเหนียว และไม่มีขนาดคละ |
| Sta. no. | ตำแหน่งทดสอบต่าง ๆ |
| sum | ผลรวม ตัวย่อของ summation |
| SW-SC | ดินทรายที่มีส่วนผสมของดินเหนียว และมีขนาดคละที่ดี |
| t/m ³ | ตันต่อลูกบาศก์เมตร |
| TDS | ปริมาณเกลือละลายทั้งหมด (Total Dissolved Salts) ประกอบด้วย เกลือละลายของ Na, Ca, Mg และ K |
| T _R | กำลังรับแรงดึงของราก |
| UCS | กำลังรับแรงอัดสูงสุด (Unconfined Compressive Strength) |
| UN | ตัวอย่างดินทดสอบที่เก็บจากอ่างอุทธรานีเหนือ |
| US | ตัวอย่างดินทดสอบที่เก็บจากอ่างอุทธรานีใต้ |
| USCS | การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification System |
| W _d | น้ำหนักดินแห้ง |
| w _n | ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติของดิน |
| w _{opt.} | ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม จากการทดสอบการบดอัดดิน ในห้องปฏิบัติการ |
| x | ปริมาณปูนขาวเป็นเปอร์เซ็นต์ |
| x | ระยะการเคลื่อนที่ของการเหือน |
| y | ความหนาบริเวณที่เกิดแรงเหือน |

การศึกษาแนวทางในการแก้ปัญหาการกัดเซาะที่เกิดจากดินกระจายตัว
บริเวณอ่างเก็บน้ำและถนนภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ
จังหวัดสกลนคร

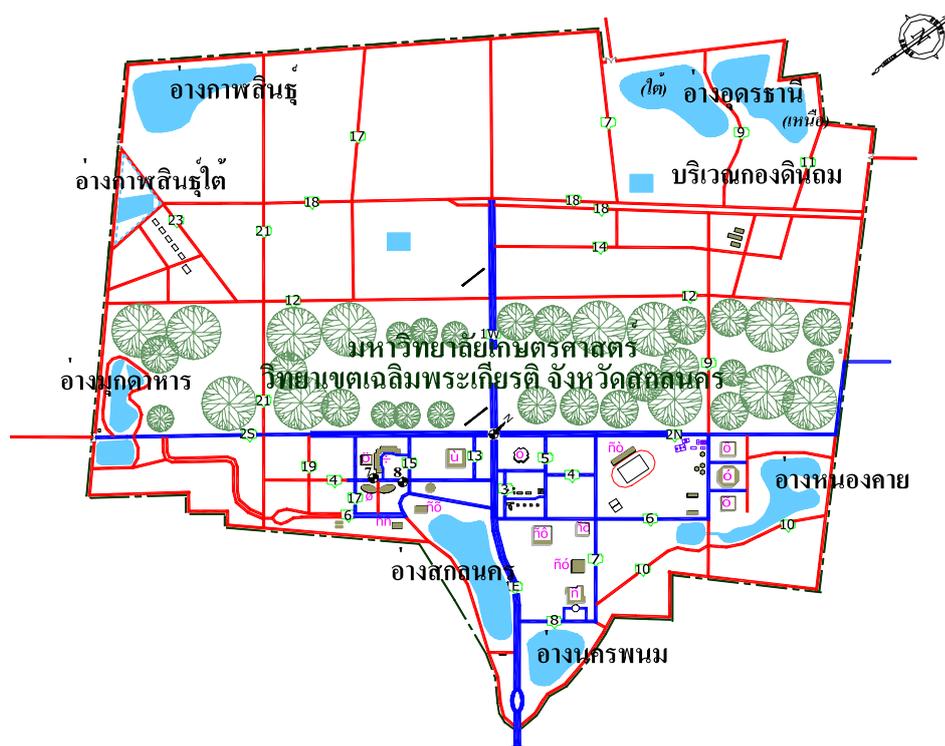
A Study on Alternative Countermeasures on Dispersive Soil Erosions
for Reservoirs and Road Embankments in Kasetsart University Chalermphrakiat
Sakon Nakhon Province Campus

คำนำ

งานก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธา จำเป็นต้องใช้ดินซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างเป็นปริมาณมาก เช่น งานเขื่อนดิน งานอ่างเก็บน้ำ งานคลองส่งน้ำ งานถนน ฯลฯ ดังนั้นการนำดินไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างดังกล่าว จำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติของดินก่อนว่าเหมาะสมเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ และเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ใช้งานในระยะยาว จึงควรเลือกใช้วัสดุที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ ไม่ถูกกัดเซาะได้โดยง่าย ซึ่งจะทำให้โครงสร้างมีความมั่นคงและสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย ปัญหาประการหนึ่งในงานก่อสร้างคือ ถ้าวัสดุดินที่นำมาใช้งานเป็นดินกระจายตัว (Dispersive Soils) และการควบคุมคุณภาพในการก่อสร้างทำได้ไม่ดีพอ ก็อาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้ โดยเฉพาะเมื่อดินสัมผัสกับน้ำ

ดินกระจายตัว เป็นดินที่ส่วนละเอียดของเนื้อดิน ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว ทำให้เม็ดดินส่วนละเอียดแยกตัวออกจากกันเมื่อสัมผัสกับน้ำ ดินเหนียวกระจายตัวมีคุณสมบัติการกัดเซาะทางกลแตกต่างจากดินเหนียวไม่กระจายตัว โดยพิจารณาความแตกต่างของขบวนการกัดเซาะ กล่าวคือ ขบวนการกัดเซาะของดินเหนียวกระจายตัวมีลักษณะพิเศษ เมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดการกัดเซาะโดยรอบของอนุภาค เม็ดดินเหนียวจะหลุดออกจากมวลดินเป็นตะกอนบูนและแขวนลอยฟุ้งกระจายอยู่ในน้ำ ในทางกลับกันดินเหนียวไม่กระจายตัวอาจถูกกัดเซาะได้เมื่อน้ำมีความเร็วหรือมีพลังงานในการไหลสูง ซึ่งอนุภาคของเม็ดดินเหล่านี้จะไม่ฟุ้งกระจายหรือแขวนลอยอยู่ในน้ำ แต่จะตกตะกอนเมื่อน้ำหนักของดินมากกว่าพลังงานในการพัดพา (ศุภกิจ, 2543)

ลักษณะภูมิประเทศของดินกระจายตัว สามารถสังเกตได้จากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกรู (Piping) โพรง (Tunneling) หรือถูกกัดเซาะที่ผิวด้านนอก (Surface Erosion) โดยเฉพาะบริเวณที่มีความลาดชันมาก ๆ หรือสังเกตจากแหล่งน้ำในบริเวณข้างเคียงที่มีความขุ่นอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้ อาจสังเกตพบคราบเกลือสีขาวกระจายอยู่บนผิวดินทั่วไป



ภาพที่ 1 พื้นที่ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

ตัวอย่างของความเสียหายจากการนำดินที่สงสัยว่าเป็นดินกระจายตัวไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ในงานวิจัยนี้รวบรวมจากการสำรวจภาคสนามเบื้องต้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ดังแสดงในภาพที่ 1 ในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา วิทยาเขตมีการพัฒนาและขยายตัวในด้านต่าง ๆ ทั้งอาคาร สิ่งปลูกสร้าง ระบบสาธารณูปโภค และระบบถนน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการพัฒนาแหล่งน้ำนั้น วิทยาเขตได้สร้างอ่างเก็บน้ำขึ้นทั้งสิ้น 8 อ่าง เพื่อเก็บน้ำไว้ใช้ภายในวิทยาเขต ได้แก่ อ่างอุดรธานีเหนือและใต้ อ่างกาฬสินธุ์ อ่างกาฬสินธุ์ใต้ อ่างมุกดาหาร อ่างสกลนคร อ่างนครพนม และอ่างหนองคาย ซึ่งจะทำให้ระบบการบริหารจัดการน้ำภายในวิทยาเขตมีความสมบูรณ์และเพียงพอต่อปริมาณการใช้ในอนาคต

อย่างไรก็ตาม จากการสำรวจพื้นที่ภายในวิทยาเขตเบื้องต้นพบว่า น้ำในอุทธรานีเหนือและได้อ่างสกนคร และอ่างมุกดาหาร มีลักษณะเป็นตะกอนขุ่น โดยเฉพาะอ่างสกนคร ทำให้ไม่สามารถนำน้ำดิบไปใช้ผลิตน้ำประปาได้ นอกจากนี้ถนนโดยรอบอ่างอุทธรานียังสังเกตพบการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกริเวณลาดคันดินถมและบนผิวถนน มีขนาดและความลึกแตกต่างกัน สันนิษฐานว่า น่าจะเกิดจากการใช้ดินกระจายตัวในการก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม จากการสำรวจในบางบริเวณก็ไม่พบปัญหาในลักษณะดังกล่าว เช่น บริเวณอ่างนครพนมและอ่างหนองคาย ภาพที่ 2 แสดงลักษณะบริเวณที่สงสัยว่าเป็นดินกระจายตัวในวิทยาเขต



(ก) ลักษณะการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกริเวณขอบอ่าง



(ข) การกัดเซาะลาดคันดินถมของถนนที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง



(ค) ลักษณะของน้ำที่ขุ่นอยู่ตลอดเวลา



(ง) คราบเกลือบนผิวดินที่ถูกกัดเซาะเป็นรูป v-shape

ภาพที่ 2 ลักษณะภูมิประเทศของดินกระจายตัว บริเวณอ่างเก็บน้ำและถนนภายในวิทยาเขต

งานวิจัยนี้ จะได้ศึกษาพฤติกรรมการกักเซาะลาดดินธรรมชาติบริเวณขอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ และหาขอบเขต (Zoning) ของดินกระจายตัวภายในวิทยาเขต โดยเฉพาะบริเวณอ่างเก็บน้ำและถนน ที่ได้รับความเสียหายโดยการทดสอบทางกายภาพและทางเคมี รวมทั้งการสำรวจภาคสนาม เพื่อช่วย ประเมินแนวโน้มการกระจายตัวของดินในบริเวณต่าง ๆ ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้จะได้ ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความชื้นน้ำของดินกระจายตัวเปรียบเทียบกับดินไม่กระจายตัว ตลอดจน ปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวโดยเฉพาะอย่างยิ่งดินที่มีการกระจายตัวสูง ให้มีความเหมาะสมทางวิศวกรรม ก่อนนำไปใช้งาน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะลาดดินคันทางของถนนและลาดดินธรรมชาติบริเวณขอบอ่างเก็บน้ำที่เกิดจากดินกระจายตัว
2. เพื่อกำหนดขอบเขต (Zoning) ของดินกระจายตัวในวิทยาเขต จากการสำรวจและหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับการกระจายตัวของดินกับความเสียหายที่เกิดขึ้น
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติการกระจายตัว กำลังรับแรงเฉือน และความชื้นน้ำของดินกระจายตัวเปรียบเทียบกับดินที่ไม่กระจายตัว ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว โดยคำนึงถึงปัจจัยดังนี้
 - 3.1 ระยะเวลาในการบ่ม
 - 3.2 ปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม
4. เพื่อศึกษาแนวทางในการแก้ปัญหาการกัดเซาะที่เหมาะสมที่สุด สำหรับดินที่มีระดับการกระจายตัวต่างๆ กัน โดยวิธีการดังนี้
 - 4.1 ศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินกระจายตัวโดยใช้ปูนขาว (Lime Treatment)
 - 4.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพดินกระจายตัวโดยการควบคุมคุณภาพการบดอัดดิน (Compaction Control) และการใช้วัสดุใยสังเคราะห์ (Geosynthetics)

ขอบเขตของการศึกษา

1. งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะลาดดิน รวมทั้งเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดิน โดยเฉพาะบริเวณอ่างเก็บน้ำและถนนที่ได้รับความเสียหาย ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

2. การทดสอบเพื่อจำแนกและหาระดับการกระจายตัวของดินในห้องปฏิบัติการและในสนาม โดยวิธีทางกายภาพ (Physical Index Test) จะทดสอบโดยวิธี Double Hydrometer Test (DHT) Pinhole Test และ Crumb Test ตามลำดับ

สำหรับการทดสอบโดยวิธีทางเคมี (Chemical Index Test) นั้น จะทดสอบเฉพาะในบางตัวอย่างเท่านั้น เพื่อยืนยันผลการจำแนกดินกระจายตัวในกรณีที่ผลการทดสอบข้างต้นไม่ชัดเจน ซึ่งประกอบด้วย

- 2.1 ปริมาณเกลือละลายทั้งหมดและเปอร์เซ็นต์โซเดียมในดิน
- 2.2 อัตราการดูดซับโซเดียมในดิน
- 2.3 เปอร์เซ็นต์โซเดียมในดินที่แลกเปลี่ยนได้
- 2.4 ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน

3. งานวิจัยนี้จะศึกษาความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์ที่สำคัญ 3 ตัว ซึ่งน่าจะมีผลอย่างมากต่อการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก (Gully Erosion) ประกอบด้วย ระดับการกระจายตัวของดิน ความชันของลาดดิน และความแน่นของดินในสนาม

4. การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความชื้นน้ำ จะทดสอบเฉพาะตัวอย่างดินในบางอ่างเก็บน้ำเท่านั้น สำหรับเป็นตัวแทนของดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัว โดยจะทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรง ส่วนการทดสอบความชื้นน้ำจะใช้วิธีความดันคงที่

5. แนวทางการแก้ไขปัญหาน้ำแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือ การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ปุ๋ยขาว และการควบคุมคุณภาพการบดอัดร่วมกับการใช้วัสดุใยสังเคราะห์ โดยจะเลือกแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับดินที่มีระดับการกระจายตัวต่าง ๆ กัน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถกำหนดขอบเขตของดินกระจายตัวในวิทยาเขตหรือบริเวณอื่นที่มีปัญหาในลักษณะอย่างเดียวกัน ทำให้สามารถคาดคะเนคุณสมบัติของดินในเบื้องต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นดินกระจายตัว จะได้มีการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้งาน
2. งานวิจัยนี้เสนอแนวทางในการแก้ปัญหาการกัดเซาะลาดดินคันทางของถนน และลาดดินธรรมชาติบริเวณขอบอ่างเก็บน้ำที่เกิดจากการนำดินกระจายตัวมาใช้งาน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาน้ำในอ่างขุนจนไม่สามารถนำมาใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์
3. ทำให้ทราบคุณสมบัติด้านกำลังและความชื้นน้ำของดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัวก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว
4. เพื่อกำหนดอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างดินกับปูนขาวที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งไม่เพียงมุ่งปรับปรุงคุณสมบัติดินไม่ให้เกิดการกระจายตัวเท่านั้น แต่จะปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมและรักษาคุณสมบัติที่ดีอื่น ๆ เอาไว้ด้วย
5. ช่วยลดปริมาณปูนขาวที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพดิน โดยใช้เท่าที่จำเป็นสำหรับแก้ปัญหาการกระจายตัวของดินในระดับต่าง ๆ จึงประหยัดทั้งค่าใช้จ่าย เวลา และทรัพยากรอันมีค่า

การตรวจเอกสาร

ลักษณะทั่วไปของดินกระจายตัว

งานก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธา จำเป็นต้องใช้ดินซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างเป็นปริมาณมาก เช่น งานเขื่อนดิน งานถนน งานคลองส่งน้ำ งานอ่างเก็บน้ำ ฯลฯ ถ้าดินที่นำมาใช้งานเป็นดินกระจายตัว และการควบคุมการก่อสร้างทำได้ไม่ดีพอ ก็อาจเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้โดยเฉพาะเมื่อดินสัมผัสกับน้ำจะเกิดการกัดเซาะโดยรอบของอนุภาค เมื่อดินจะหลุดออกจากมวลดินเป็นตะกอนขุ่น และแขวนลอยฟุ้งกระจายอยู่ในน้ำ หรืออาจกล่าวได้ว่าการกระจายตัวของอนุภาคดินเหนียวเกิดจากกลไกการกัดเซาะทั้งทางด้านเคมีและทางกลศาสตร์ (ศุภกิจ, 2543)

คุณสมบัติการกัดเซาะทางกลของดินกระจายตัว

ดินเหนียวกระจายตัวมีคุณสมบัติการกัดเซาะทางกลแตกต่างจากดินเหนียวไม่กระจายตัว โดยพิจารณาความแตกต่างของขบวนการกัดเซาะกล่าวคือ ขบวนการกัดเซาะดินเหนียวกระจายตัวมีคุณลักษณะพิเศษ เมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดการกัดเซาะโดยรอบของอนุภาค เมื่อดินจะหลุดออกจากมวลดินเป็นตะกอนขุ่นและแขวนลอยฟุ้งกระจายอยู่ในน้ำทั้งน้ำนิ่งและน้ำไหล ในทางกลับกันดินเหนียวที่ไม่กระจายตัวอาจถูกกัดเซาะได้เมื่อน้ำมีความเร็วหรือมีพลังงานการไหลสูง ซึ่งเป็นขบวนการกัดเซาะทางกล อนุภาคของเม็ดดินเหล่านี้จะไม่ฟุ้งกระจายและแขวนลอยอยู่ในน้ำ Sherard et. al. (1977) พบว่า ดินกระจายตัวจะประกอบไปด้วยอนุภาคดินเม็ดละเอียดมาก เมื่อดินนี้สัมผัสกับน้ำแล้วอนุภาคของเม็ดดินจะแยกห่างออกจากกันกระจายตัวออกไปง่ายและรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากแรงผลักระหว่างอนุภาคดินเหนียวมากกว่าแรงดึงดูด

Lambe and Whitman (1969) ได้อธิบายว่า ในสภาพที่โครงสร้างของดินรวมกลุ่มกันอยู่ อนุภาคดินเหนียวจะหันหัวท้ายเข้าหากันและดึงดูดเข้าหากัน แต่ในสภาพที่โครงสร้างดินกระจายตัวออกจากกัน อนุภาคจะชนกันและแยกตัวห่างออกจากกัน

ระบบของแรงภายในระหว่างอนุภาคของดินกระจายตัว

แรงกระทำภายในระหว่างอนุภาคของแร่ดินเหนียวกับน้ำ และความเข้มข้นของสารละลายสามารถอธิบายได้ในเทอมของแรงสองแรงที่กระทำต่อกันระหว่างอนุภาคที่อยู่ใกล้กัน คือ แรงดึงดูดระหว่างแร่ดินเหนียวและแรงผลักระหว่างรอบ ๆ อนุภาคของวงน้ำ ความเข้มข้นของแรงผลักนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนในโพรงน้ำ (Pore water) แรงผลักจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สำหรับแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออน ชนิดของไอออนที่ปรากฏในน้ำจะมีผลต่อแรงผลัก การเพิ่มขึ้นของไอออนรอบวาลเลนซ์จะทำให้แรงผลักลดลงในวงน้ำ จนกระทั่งแรงดึงดูดไม่มีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ การสมดุลของแรงผลักและแรงดึงดูด

สาเหตุหลักที่ทำให้อนุภาคดินเหนียวกระจายตัวเป็นสารแขวนลอยอยู่ในน้ำ ก็เพราะผลลัพธ์จากประจุไฟฟ้าระหว่างอนุภาคดินเป็นแรงผลัก (Interparticle Repulsive Force) ซึ่งกันและกัน แรงผลักระหว่างอนุภาคจะมากหรือน้อยจะแปรผันโดยตรงกับขนาดของชั้นประจุบวก (Double Layer) ที่ห่อหุ้มอนุภาคดินซึ่งมีประจุลบอยู่ที่ผิว การดูดซับน้ำของดินเหนียวจะทำให้ชั้นของประจุบวกมีความหนาเพิ่มขึ้นซึ่งก็จะทำให้แรงผลักเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ประจุที่ใหญ่ขึ้นทำให้ไม่พอดีกับโครงสร้างเดิมที่เคยจับตัวอยู่จึงมีการเคลื่อนที่ห่างออกจากพื้นผิวดินเหนียว ทำให้ชั้นของประจุบวกหนามากขึ้นจึงเกิดการผลักกันระหว่างอนุภาคได้ง่ายขึ้นและเป็นสาเหตุทำให้ดินกระจายตัว (สุภกิจ, 2543)

ความเป็นกรดต่างของดิน

ค่า pH จะแสดงถึงค่าความเป็นกรดต่างของดิน ค่า pH เท่ากับ 7 ดินจะมีคุณสมบัติเป็นกลาง ค่า pH ต่ำกว่า 7 ดินจะมีคุณสมบัติเป็นกรด และถ้าค่า pH สูงเกิน 7 ขึ้นไป ดินจะมีคุณสมบัติเป็นด่าง จากการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติดินกระจายตัวโดยฝ่ายดินด้านวิทยาศาสตร์ กรมชลประทานพบว่า ดินที่มีค่า pH สูงเกิน 8 ขึ้นไป ส่วนใหญ่จะเป็นดินกระจายตัว แต่ดินที่มีค่า pH เป็นกลางหรือเป็นกรดก็พบว่าเป็นดินกระจายตัวได้เหมือนกัน

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินกระจายตัว โดยการตรวจสอบค่าความเป็นกรดต่างจากตัวอย่างดินเป็นจำนวนมาก อร่ามศรี (2541) พบว่า ดินกระจายตัวจะมีค่า pH อยู่ระหว่าง 4.3 ถึง 9.3 และพบว่าดินที่มีค่า pH สูงมากจะยิ่งกระจายตัวมาก

ปริมาณของอนุภาคดินเหนียว

อนุภาคดินส่วนที่เป็นดินเหนียวเป็นส่วนสำคัญที่สุดเพราะเป็นจุดกำเนิดของปฏิกิริยาต่าง ๆ ในดิน เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวมีประจุไฟฟ้า ดังนั้นการแลกเปลี่ยนประจุในดินจะเกิดขึ้นในอนุภาคดินส่วนนี้ ดินกระจายตัวจะประกอบด้วยอนุภาคดินเหนียว Sherard et. al. (1977) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของดินเหนียวกับการกระจายตัวของดิน จากการทดสอบดินจำนวน 195 ตัวอย่าง โดยวิธี Pinhole Test พบว่า ดินเหนียวที่ประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กกว่า 0.005 มม. ในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 10 ไม่มีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติการกระจายตัวของดิน ดังแสดงในตารางที่ 1 เพราะปริมาณของอนุภาคดินเหนียวไม่มากพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้

Ryker (1977) ได้สรุปผลจากการทำงานในโครงการ Oklahoma โดยการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวกับการกระจายตัวของดิน พบว่า ดินจะไม่มีคุณสมบัติของการกระจายตัวเมื่อปริมาณดินเหนียวและดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) น้อยกว่าร้อยละ 12.00 และ 4.0 ตามลำดับ และชี้ให้เห็นว่า พฤติกรรมของดินลักษณะเช่นนี้ถูกควบคุมโดยขนาดของเม็ดดินที่ใหญ่กว่า 0.005 มม. โดยไม่คำนึงถึงอนุภาคของดินเม็ดละเอียด

ตารางที่ 1 ปริมาณอนุภาคของดินเหนียว ในจำนวน 195 ตัวอย่าง โดยวิธี Pinhole test

| เปอร์เซ็นต์ดินเหนียว (เม็ดดินขนาดเล็กกว่า 0.005 มม.) | จำนวนตัวอย่างที่ทดสอบ | |
|---|-----------------------|--------------|
| | กระจายตัว | ไม่กระจายตัว |
| 0 - 5 | 0 | 0 |
| 6 - 10 | 0 | 1 |
| 11 - 15 | 4 | 5 |
| 16 - 20 | 16 | 13 |
| 25 - 30 | 29 | 36 |
| 31 - 40 | 13 | 13 |
| 41 - 50 | 8 | 19 |
| มากกว่า 50 | 10 | 19 |
| รวม | 80 | 115 |

แร่ธาตุดินเหนียว

อนุภาคของดินส่วนที่เรียกว่าดินเหนียว นั้น คือส่วนของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.005 มม. ลงไป ประกอบด้วยแร่ Aluminosilicate ต่าง ๆ เรียกว่า แร่ดินเหนียว ซึ่งมีกลุ่มที่สำคัญอยู่ 2 กลุ่ม คือ Silicate Clay ได้แก่ อิลไลต์ มอนท์โมริลโลไนท์ เวอร์มิคูไลต์ คาโอลิไนท์ และ Oxide Clay ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม แร่ดินเหนียวจะประกอบไปด้วยผลึกเล็ก ๆ ของ Silica Tetrahedral Sheet และ Octahedral Sheet ของอลูมิเนียม แมกนีเซียม ฯลฯ ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของแร่ดินเหนียว ถ้าจำแนกตามคุณสมบัติของผลึก สามารถแบ่งประเภทของแร่ดินเหนียวออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือ

- อิลไลต์
- มอนท์โมริลโลไนท์
- คาโอลิไนท์

Statton and Mitchell (1977) ศึกษาแร่ที่มีในดินเหนียวเขต (Shale) กระจายตัว โดยวิเคราะห์ทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Diffraction พบว่าส่วนประกอบหลัก ได้แก่ แร่มอนท์โมริลโลไนท์และแร่อิลไลต์ ส่วนแร่คาโอลิไนท์มีอยู่เล็กน้อย สำหรับส่วนประกอบรอง ได้แก่ ควอตซ์และเฟลด์สปาร์

สำหรับในประเทศไทย ฝ่ายดินด้านวิทยาศาสตร์ กรมชลประทาน ได้ทำการวิเคราะห์แร่ดินเหนียวโดยวิธี X-Ray Diffraction พบว่า ดินกระจายตัวส่วนใหญ่มีแร่มอนท์โมริลโลไนท์โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินกระจายตัวในภาคกลาง ส่วนภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แร่ดินเหนียวส่วนใหญ่จะเป็นแร่คาโอลิไนท์เป็นแร่หน้า ตามด้วยแร่อิลไลต์และควอตซ์ ในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีแร่ดินเหนียวเป็นพวกคาโอลิไนท์และอิลไลต์เช่นกัน แต่ในบางจุดที่มีแร่ดินเหนียวเป็นมอนท์โมริลโลไนท์มักจะพบเสมอว่าเป็นดินกระจายตัว

ต้นกำเนิดของดินกระจายตัว

ต้นกำเนิดของดินกระจายตัวซึ่งศึกษาและรวบรวมโดย Udomchoke (1991) ค้นคว้าเกี่ยวกับลักษณะการพัดพาและการตกตะกอนของดินกระจายตัวในลักษณะต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

- ดินเหนียวกระจายตัวเกิดจากการพัดพาตกตะกอนจากน้ำทะเล
- ดินเหนียวกระจายตัวเกิดจากการพัดพาตกตะกอนจากน้ำกร่อย
- ดินเหนียวกระจายตัวเกิดจากการพัดพาทับถมด้วยลม
- ดินเหนียวกระจายตัวเกิดจากการฟุ้งร่อนของหินในธรรมชาติ

ในธรรมชาติของการตกตะกอนของดินเหนียวกระจายตัว จะมีปริมาณของดินเม็ดละเอียดสูง และมีความสัมพันธ์กับธาตุโซเดียมในดินสูงเช่นเดียวกัน ดินเหล่านี้จะมีขีดความสามารถโดยขบวนการกัดเซาะสูง จะพบและปรากฏอยู่กับดินตามธรรมชาติและกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นโลก

แหล่งกำเนิดทางธรณีวิทยา

Sherard et. al. (1977) ได้สรุปเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดทางธรณีของดินกระจายตัวว่า ส่วนใหญ่จะมีแหล่งกำเนิดจากการตกตะกอนบริเวณที่ราบซึ่งน้ำท่วมถึง (Floodplain Deposits) ตะกอนทะเลสาบ (Lake Bed Deposits) และการตกตะกอนจากการชะล้างตามพื้นที่ลาดเอียง (Slope Wash)

Decker and Dunnigan (1977) ได้รายงานว่า ดินกระจายตัวในธรรมชาติเป็นสาเหตุให้เกิดความยุ่งยากต่อการเกษตรและโครงสร้างทางชลศาสตร์ และมักจะพบเสมอ ๆ ในเขตแห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้ง แต่ Sherard et. al. (1977) ได้ชี้ให้เห็นว่า ดินกระจายตัวจากหลาย ๆ โครงการ รวมทั้งการศึกษาจากเขื่อนที่พังเสียหายแล้ว พบดินกระจายตัวในเขตชุ่มชื้นด้วยเหมือนกัน ลักษณะของดินกระจายตัวที่พบโดยทั่วไปจะมีสีแดง น้ำตาล เทา เทาปนขาว เหลือง หรือสีผสมระหว่างสีเหล่านี้ ส่วนดินสีค่าซึ่งเป็นดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูง ยังไม่พบว่าเป็นดินกระจายตัว

ดินกระจายตัวในประเทศไทย

ในประเทศไทยจะพบดินกระจายตัวบริเวณที่ราบของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งรวบรวมได้จากข้อมูลการก่อสร้างเขื่อนดินของกรมชลประทาน ซึ่งตรวจพบส่วนที่มีการชำรุดเนื่องจากเกิดรูโพรง ความเสียหายของคลองส่งน้ำ และการกัดเซาะผิวหน้าเนื่องจากฝนตก ในสภาพดินธรรมชาติจะพบดินกระจายตัวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือในลักษณะของกลุ่มตะกอนดินเหนียว ดินกระจายตัวที่พบโดยทั่วไปจะมีสีเหลือง สีน้ำตาลออกเหลือง และสีน้ำตาลถึงแดง ซึ่งเป็นสีธรรมชาติ สำหรับในภาคเหนือและภาคใต้ ดินกระจายตัวที่พบส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของแร่ในหินแกรนิตและหินไนท์ (อร่ามศรี, 2541)

Cole et. al. (1977) ได้ศึกษาการกระจายตัวของดิน จากเขื่อนดินชลประทานหลายเขื่อนของกรมชลประทานที่มีการพิบัติและพบการกัดเซาะ ได้แก่ เขื่อนลำเชียงไกร เขื่อนห้วยสวาย เขื่อนลำสำลาย และเขื่อนอำปือล พบว่ามีปริมาณของโซเดียม แคลิร้อยละ 66 ถึง 80 ระดับการกระจายตัวร้อยละ 29 ถึง 49 มีแร่ธาตุดินเหนียวหลัก ได้แก่ ควอตซ์ คาโอลิไนท์ และมอนท์โมริลโลไนท์ จากดินกระจายตัว 122 ตัวอย่าง

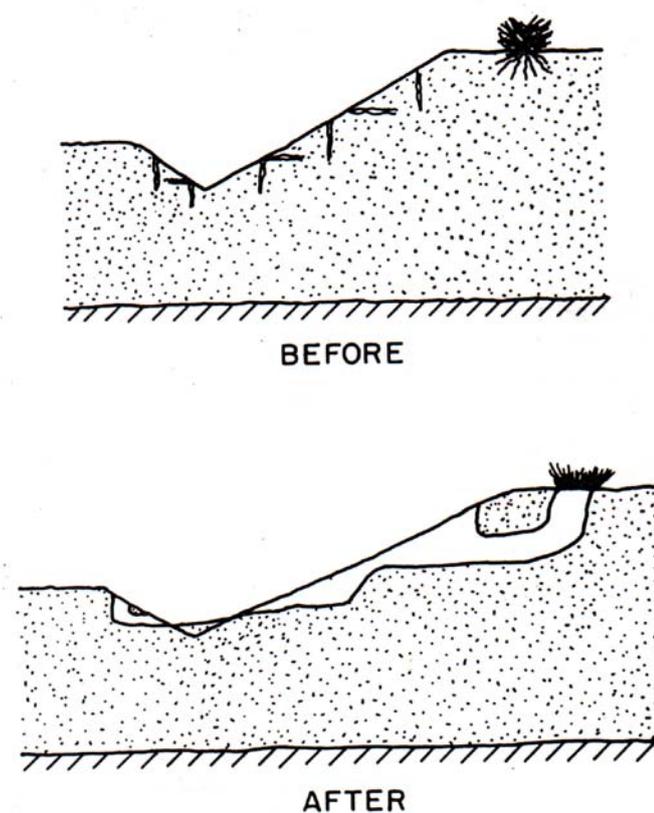
Shieh (1981) ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมของดินกระจายตัวในหลายหน่วยงานก่อสร้างเขื่อนดิน พบว่า แร่ดินเหนียวหลักเป็นแร่คาโอลิไนท์ ร้อยละ 50 ถึง 60 และเป็นแร่มอนท์โมริลโลไนท์และอิลไลต์ ร้อยละ 20 ถึง 25 และชี้ให้เห็นว่า การปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อลดความรุนแรงของการกระจายตัวของดิน สามารถใช้ยิปซัม 1 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร ในการปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าว สำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน การใช้ปูนขาวปริมาณร้อยละ 1.00 ผสมเข้าไปในดิน จะทำให้ดินมีแนวโน้มเปลี่ยนเป็นดินไม่กระจายตัว

ปัญหาการนำดินเหนียวกระจายตัวมาใช้ในงานวิศวกรรม

ดินเหนียวกระจายตัวจัดได้ว่าเป็นดินที่สร้างปัญหาให้กับงานทางด้านวิศวกรรมโยธาที่ต้องใช้ดินเป็นโครงสร้างหลัก เช่น งานเขื่อนดิน และงานคลองส่งน้ำ ซึ่งมักจะพบว่าดินเหนียวกระจายตัวจะเป็นตัวก่อให้เกิดความเสียหายได้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การกัดเซาะที่ผิวหน้า (Surface Erosion) การเกิดรูโพรง (Hole) การกัดเซาะบนลาดดินเป็นร่องน้ำแบบลึก (Gully Erosion) การกัดเซาะพื้นผิวเป็นช่องเปิด (Surface Channelization) การกัดเซาะเป็นรูป v-shape (Surface v-shape) นอกจากนี้อนุภาคดินกระจายตัวที่แขวนลอยอยู่ในแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น อ่างเก็บน้ำ อาจทำให้คุณภาพของน้ำต่ำลงหากมีความขุ่นเกินค่ามาตรฐาน

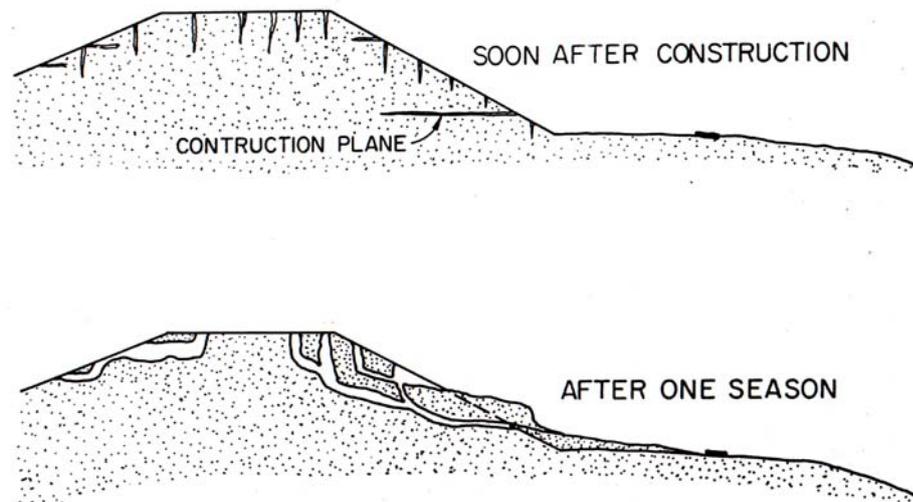
ปัญหาในงานเชื่อมดินที่เกิดจากการนำดินกระจายตัวมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างนั้นมีสาเหตุหลักจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่าง ๆ ในระหว่างการใช้งาน (Repeated Wetting and Drying Cycles) สภาพอากาศที่ร้อนจะทำให้ดินแห้งยุบหดตัว ความแตกต่างของการยุบและหดตัวจากการบดอัดไม่ดีพอจะทำให้เกิดรอยแยกแตกหรือเกิดรูโพรงในดินขึ้น

จากรายงานการศึกษาดินกระจายตัวจากหลายเขื่อนที่มีการพิบัติและมีการกัดเซาะ พบว่า มีปริมาณของโซเดียมสูงเฉลี่ย 66 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ในบางแห่งอาจสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และมีระดับการกระจายตัวสูงปานกลางในระดับ 29 ถึง 49 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคุณสมบัติทางเคมีของดินกระจายตัวดังกล่าวก็พบว่ามีค่าสูงเช่นกัน (SAR และ ESP มากกว่า 2 และ 7 ตามลำดับ) และมีแร่ดินเหนียวหลักเป็นพวกมอนท์โมริลโลไนท์ ส่วนแร่ดินเหนียวชนิดอื่น เช่น กาโอลิไนท์ อิลไลต์ และเวอร์มิคูลไลต์ ก็เป็นดินกระจายตัวได้ ถ้ามีเกลือละลายโซเดียมสูงเมื่อเทียบกับปริมาณเกลือละลายทั้งหมดในดิน ซึ่งส่วนใหญ่จะมีค่าสูงเกิน 80 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป (อร่ามศรี, 2541)



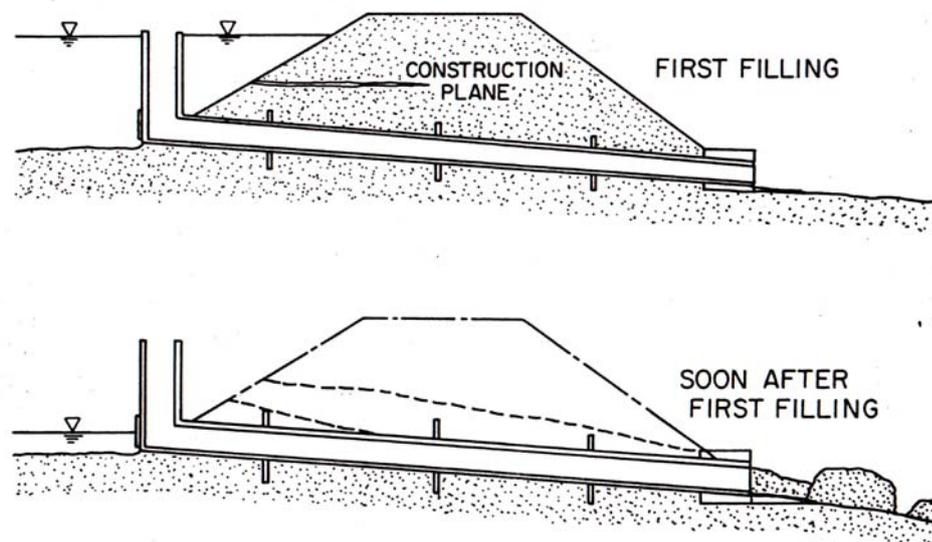
ภาพที่ 3 การวิบัติแบบ Piping Failure ของดินเหนียวกระจายตัวบริเวณ Slope Cut

ที่มา: Haliburton et. al. (1975)



ภาพที่ 4 การวิบัติของลาดดินคันทางซึ่งเกิดจากการนำดินกระจายตัวมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

ที่มา: Haliburton et. al. (1975)



ภาพที่ 5 การวิบัติทั่วไปของเขื่อนดินเนื้อเดียวซึ่งใช้ดินกระจายตัวเป็นวัสดุก่อสร้าง

ที่มา: Haliburton et. al. (1975)

สำหรับในต่างประเทศ Aitchison and Wood (1965) ตรวจพบว่า 8.7 เปอร์เซ็นต์ของเขื่อนที่สร้างขึ้นในออสเตรเลีย พังเสียหายเนื่องมาจากเกิด Piping และในปี ค.ศ. 1972 Sherard et. al. ได้สรุปว่า เขื่อนดินเนื้อเดียวจำนวนมากที่สร้างด้วยดินกระจายตัวเสียหายเนื่องมาจากเกิด Piping หรือเสียหายอย่างมากจากการกัดเซาะตามแนวตั้ง เกิดเป็น Tunnel ภายหลังจากฝนตก Sherard ได้อธิบายอีกว่า การเกิด Piping ในเขื่อนดินเนื้อเดียวจะเริ่มต้นด้วยรอยร้าวเล็ก ๆ แล้วจะถูกกัดเซาะภายใน 2 ถึง 3 ชั่วโมง เกิดเป็น Tunnel ขนาดใหญ่

นอกจากความเสียหายที่เกิดกับเขื่อนดินแล้ว Ryker (1977) กล่าวว่า ลำน้ำที่ขุดขึ้นเพื่อป้องกันน้ำท่วมและเพื่อการชลประทาน รวมทั้งลำน้ำและลำธารธรรมชาติที่ตัดผ่านพื้นที่ซึ่งเป็นดินกระจายตัว มักจะเสียหายอย่างหนักโดยเกิดเป็นรูโพรงและถูกกัดเซาะเป็นร่องลึกตามริมฝั่งและก้นคลอง สำหรับคลองลาดคอนกรีต จากการศึกษาข้อมูลพบว่า มีตัวอย่างมากมายที่คลองลาดคอนกรีตเสียหายจากการเกิด Piping ของดินกระจายตัวข้างใต้ผิวคอนกรีต ความเสียหายเกิดขึ้นโดยน้ำฝนที่ไหลบ่าอยู่บนพื้นดิน ส่วนบนของฝั่งคลองไหลซึมเข้าไปตามรอยร้าวเล็ก ๆ ที่เกิดจากการแห้งของดิน และไหลเข้าไปในคลองผ่านทางรอยต่อของคอนกรีตที่บุฝั่งคลองเมื่อไม่มีน้ำ รูโพรงจากการกัดเซาะจะเกิดขึ้นทันทีที่ได้ผิวคอนกรีตที่บุไว้ คอนกรีตก็จะยุบตัวแตกเสียหาย ความเสียหายต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 3 ถึงภาพที่ 5

การจำแนกดินกระจายตัว

วิธีการทดสอบดินเหนียวกระจายตัวมีอยู่หลายวิธี คือ

1. Emerson Crumb Test
2. Dilution Turbidity Ratio Test
3. Double Hydrometer Test
4. Pinhole Test
5. Sodium Percentage
6. Sodium Absorption Ratio (SAR)
7. Exchangable Sodium Percentage (ESP)
8. Total Dissolved Salts (TDS)

ในการทดสอบการกระจายตัวของดินไม่ควรเลือกทดสอบเพียงวิธีใดวิธีหนึ่ง ถึงแม้ว่าวิธีนั้นจะเป็นวิธีที่ดีที่สุด ถูกต้องมากที่สุด และมีผู้นิยมใช้กันมากที่สุดก็ตาม เพราะการทดสอบในแต่ละวิธีมีข้อจำกัดและวิธีการที่แตกต่างกัน ซึ่งการตรวจสอบที่ดีควรจะมีการทดสอบหลาย ๆ วิธีประกอบกัน เพื่อยืนยันผลจากการทดสอบจะทำให้การวิเคราะห์ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบเพื่อจำแนกและหาระดับการกระจายตัวของดินในห้องปฏิบัติการ โดยวิธี Pinhole Test และวิธี Double Hydrometer Test สำหรับการทดสอบในสนาม ใช้วิธี Field Crumb Test โดยรายละเอียดสำหรับแต่ละการทดสอบสรุปได้ดังนี้

การทดสอบ Crumb Test

เป็นการทดสอบการกระจายตัวของดิน ซึ่งสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว เหมาะสำหรับการทดสอบการกระจายตัวของดินในสนามเพื่อหาขอบเขตพื้นที่ดินกระจายตัว หรือเพื่อเลือกหาบ่อขุดดินสำหรับงานก่อสร้าง เป็นวิธีการที่ Emerson (1967) คิดค้นขึ้น และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

วิธีทดสอบทำได้โดยการใช้หินส่วนเล็ก ๆ ของดินแห้ง ขนาดเท่ากับเมล็ดถั่วซึ่งบิออกมาจากดินที่ต้องการจะทดลองโดยตรง ใส่องไปในปีกเกอร์ใส่ที่บรรจุน้ำกลั่นไว้แล้วประมาณหนึ่งในสาม ส่วนของภาชนะ แล้วสังเกตคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดินหลังจากจุ่มลงไปใต้น้ำแล้วประมาณ 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 6 วิธีทดสอบนี้ได้รับการปรับปรุงในเวลาต่อมาโดย Sherard et. al. (1977) โดยจำแนกดินกระจายตัวออกเป็น 4 ระดับ (เกรด) ดังนี้

| | |
|---------------------------------------|---|
| <i>ระดับที่ 1 ไม่มีปฏิกิริยา</i> | ดินแตกออกเล็กน้อย ไม่มีความชุ่มอยู่ในน้ำเลย จำแนกเป็น Non-Dispersive |
| <i>ระดับที่ 2 มีปฏิกิริยาน้อย</i> | มีความชุ่มเล็กน้อยที่ผิวของก้อนดิน ไม่สามารถเห็นความชุ่มได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า จำแนกเป็น Slightly Dispersive |
| <i>ระดับที่ 3 มีปฏิกิริยาปานกลาง</i> | สามารถเห็นความชุ่มได้ชัดเจน เมื่อเอาก้อนดินใส่องไปในน้ำจะมีความชุ่มเกิดขึ้นบาง ๆ ที่ภาชนะใต้อิน จำแนกเป็น Moderately Dispersive |
| <i>ระดับที่ 4 มีปฏิกิริยาอย่างมาก</i> | ก้อนภาชนะใต้อินมีความชุ่มเกิดขึ้นทั่วไป น้ำในภาชนะเมื่อตั้งทิ้งไว้จะมีความชุ่มทั่วถึงทั้งหมด จำแนกเป็น Highly Dispersive |



หมายเหตุ:

* นำชิ้นส่วนเล็กๆ ของดินเปียกใส่ลงไปในน้ำกลั่นแทนดินแห้ง วิธีนี้ใช้ได้ แต่อาจมีแร่ดินเหนียวพวกอิลไลทและมอนทโมริลโลไนท์ ไคฟอ ๆ กับดินที่มีอินทรีย์สาร (Organic soils)

** เห็นได้อย่างชัดเจนจากการเกิดวงความขุ่นเป็นหมอกละเอียดกระจายไปรอบ ๆ ก้อนดิน ยิ่งกระจายมากเท่าใดก็ยิ่งเป็นดินกระจายตัวมากเท่านั้น

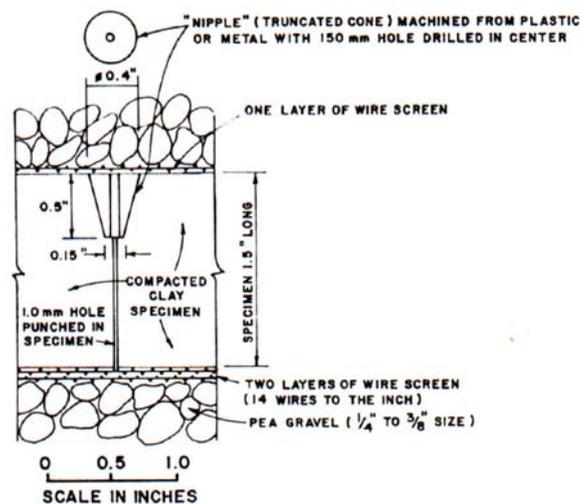
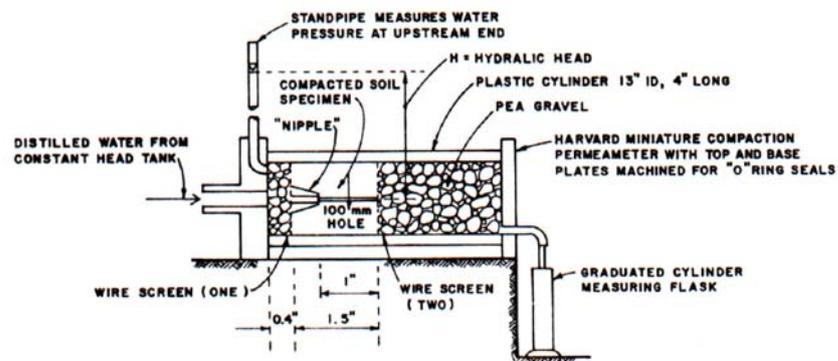
† ถ้ามีคาร์บอเนต สามารถทดสอบได้ง่าย ๆ โดยหยดกรดลงไปจะเกิดฟองฟูขึ้นมา

†† สังเกตได้หลังจากเขย่าแล้ว เมื่อตั้งทิ้งไว้ตะกอนจะตกและน้ำข้างบนจะใส ภายในเวลาไม่ถึง 10 นาที

ภาพที่ 6 แผนภูมิจำแนกดินกระจายตัว โดยวิธี Emerson Crumb Test (Emerson, 1967)

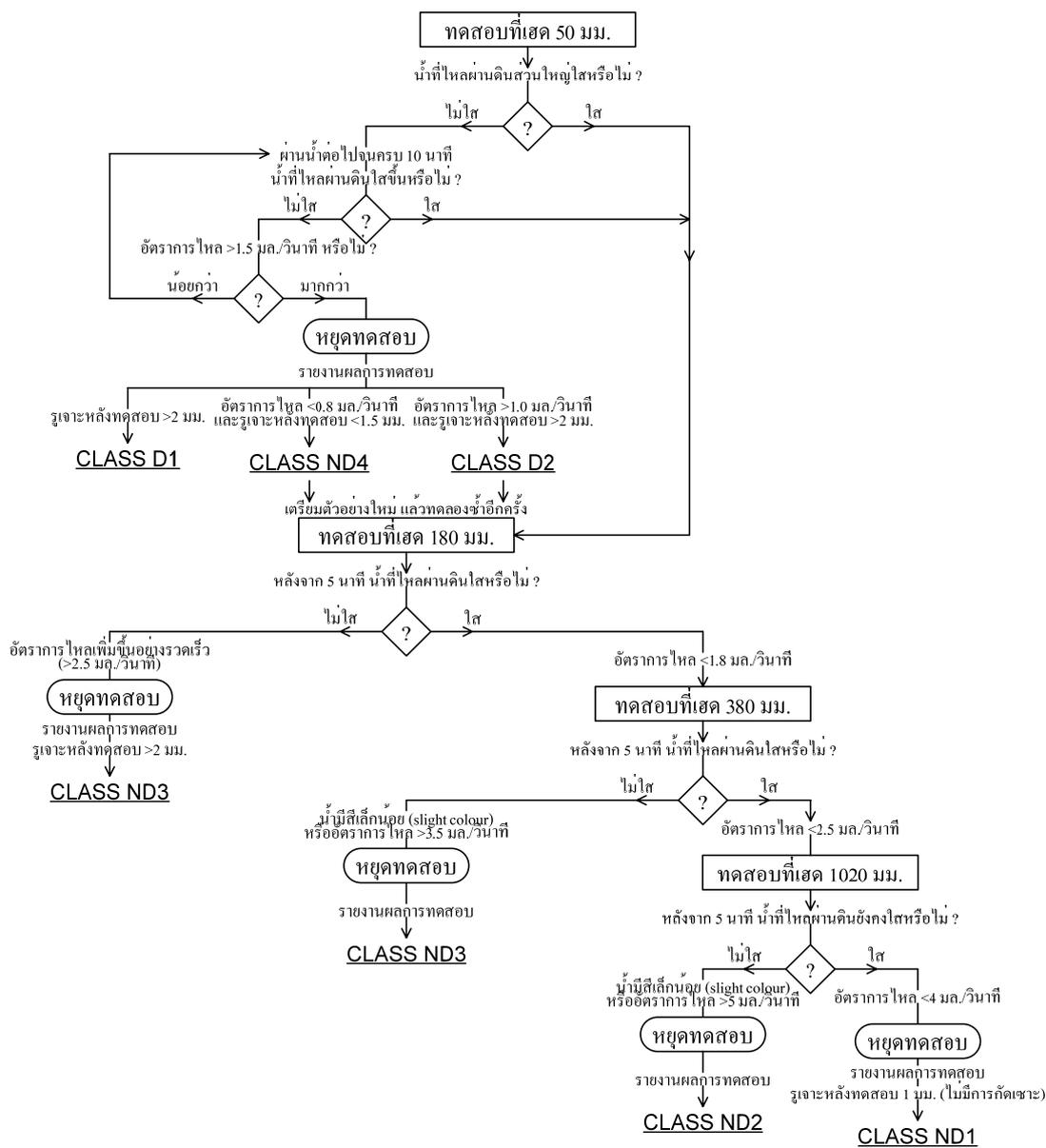
การทดสอบ Pinhole Test

เป็นการทดสอบการกระจายตัวของดินแบบไม่คงสภาพ โดยทำการบดอัดดินแบบมาตรฐานลงในแบบ ซึ่งได้จำลองรูรั่วซึมโดยการเจาะรูเล็ก ๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. หลังจากนั้นจึงปล่อยให้ น้ำไหลผ่านด้วยเฮดต่าง ๆ กัน ผลการทดสอบจะพิจารณาจากการสังเกตอัตราการไหล ความขุ่นของน้ำ และขนาดของรูที่เจาะหลังจากผ่านไป แล้วเมื่อสิ้นสุดการทดลอง การทดสอบนี้คิดค้นขึ้นโดย Sherard et. al. (1976) ลักษณะของเครื่องมือทดสอบแสดงดังภาพที่ 7 และการแยกประเภทดินจากผลการทดสอบของ Sherard สรุปได้ดังตารางที่ 2 สำหรับขั้นตอนการทดสอบอย่างละเอียดสำหรับจำแนกดินกระจายตัวในระดับต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 7 เครื่องมือทดสอบ Pinhole Test และหน้าตัดตามยาวตัวอย่างทดสอบ

ที่มา: Sherard et. al. (1976)



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการจำแนกดินกระจายตัวโดยวิธี Pinhole Test

ที่มา: Sherard et. al. (1976)

ตารางที่ 2 การจำแนกประเภทของดินจากผลการทดสอบ Pinhole Test

| ผลการจำแนก | เสดของน้ำ (มม.) | เวลาทดสอบ (นาที) | อัตราการไหลของน้ำ (มล./วินาที) | สี, ตะกอน, ความขุ่นของน้ำ | ขนาดรูเจาะ หลังทดสอบ (มม.) |
|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| <i>กระจายตัว</i> | | | | | |
| D1 | 50 | 5 | >1.5 | ขุ่นมาก | >2 |
| D2 | 50 | 10 | >1.0 | ขุ่น, มีสีเล็กน้อย | >2 |
| <i>ไม่กระจายตัว</i> | | | | | |
| ND4 | 50 | 10 | <0.8 | มีสีเล็กน้อย, มองเห็นได้ง่าย | <1.5 |
| ND3 | 180 | 5 | >2.5 | มีสีเล็กน้อย, มองเห็นได้ง่าย | >2 |
| | 380 | 5 | >3.5 | มีสีเล็กน้อย | 2 |
| ND2 | 1020 | 5 | >5 | ใส, เกือบไม่มีสี | 2 |
| ND1 | 1020 | 5 | <4 | ใส | 1 |

การทดสอบ Double Hydrometer Test

เป็นการทดสอบหา Degree of Dispersion ตามวิธีการของ SCS Laboratory Test หรือ ASTM D4221-83a เพื่อประเมินค่าความไวของดินต่อการกัดเซาะ วิธีนี้ใช้เปรียบเทียบจากเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียวที่มีขนาด 0.005 มม. ลงไป ซึ่งกระจายตัวอยู่ในน้ำโดยถูกรบกวนทางกลน้อยที่สุดกับเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียวขนาดเดียวกันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำที่ได้เติมสารเคมีจำพวก Dispersing Agent ลงไปด้วย โดยใช้วิธีเดียวกับ Standard Hydrometer Analysis (ASTM D422-63) Degree of Dispersion สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1

$$\text{Degree of Dispersion} = \frac{\% \text{finer than } 0.005 \text{ mm without chemical dispersion}}{\% \text{finer than } 0.005 \text{ mm with chemical dispersion}} \times 100 \quad (1)$$

ตารางที่ 3 ผลการจำแนกดินกระจายตัวโดยใช้เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของดิน

| เปอร์เซ็นต์การกระจายตัว | ผลการจำแนกดินกระจายตัว |
|-------------------------|--|
| 0 - 33 | ไม่มีปัญหาเรื่องการกระจายตัว (Nondispersive) |
| 34 - 67 | เริ่มมีปัญหาการกระจายตัว (Moderately Dispersive) |
| 68 - 100 | ดินมีการกระจายตัวสูง (Highly Dispersive) |

สำหรับการทดสอบโดยวิธีทางเคมี จะทดสอบเฉพาะในบางตัวอย่างเพื่อยืนยันผลการจำแนกดินกระจายตัวในกรณีที่ผลการทดสอบทางกายภาพไม่ชัดเจน ประกอบด้วย อัตราการดูดซับโซเดียม (Sodium Adsorption Ratio, SAR) เปอร์เซ็นต์โซเดียมในดินที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Sodium Percentage, ESP) ปริมาณเกลือละลายทั้งหมด (Total Dissolved Salts, TDS) และเปอร์เซ็นต์โซเดียมในดิน (Sodium Percentage) ซึ่งมีรายละเอียดของการทดสอบ ดังนี้

การทดสอบหาอัตราการดูดซับโซเดียมและเปอร์เซ็นต์โซเดียมในดินที่แลกเปลี่ยนได้

ค่า SAR และ ESP เป็นตัวบ่งชี้ขั้นพื้นฐานในการจำแนกดินกระจายตัว ประจุของโซเดียมใน Saturated Extract ถ้ามากกว่า 40 ppm จะเป็นสาเหตุให้ดินเกิดการกระจายตัว และประจุของแคลเซียมที่มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ใน Saturated Extract จะเป็นสาเหตุให้ดินตกตะกอน ปัจจัยทั้ง 2 จึงมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินโดยตรง

ค่าอัตราการดูดซับโซเดียมในดิน แสดงถึงอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างเกลือละลายโซเดียมในโพรงน้ำของดินกับปริมาณเกลือละลายแคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ 2 (Richards, 1954) สำหรับเปอร์เซ็นต์โซเดียมในดินที่แลกเปลี่ยนได้จะเป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างเกลือละลายโซเดียมในโพรงน้ำของดินกับความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (Cation Exchange Capacity, CEC) ดังสมการที่ 3 (Richards, 1954)

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{(Ca + Mg)/2}} \text{ meq/l} \quad (2)$$

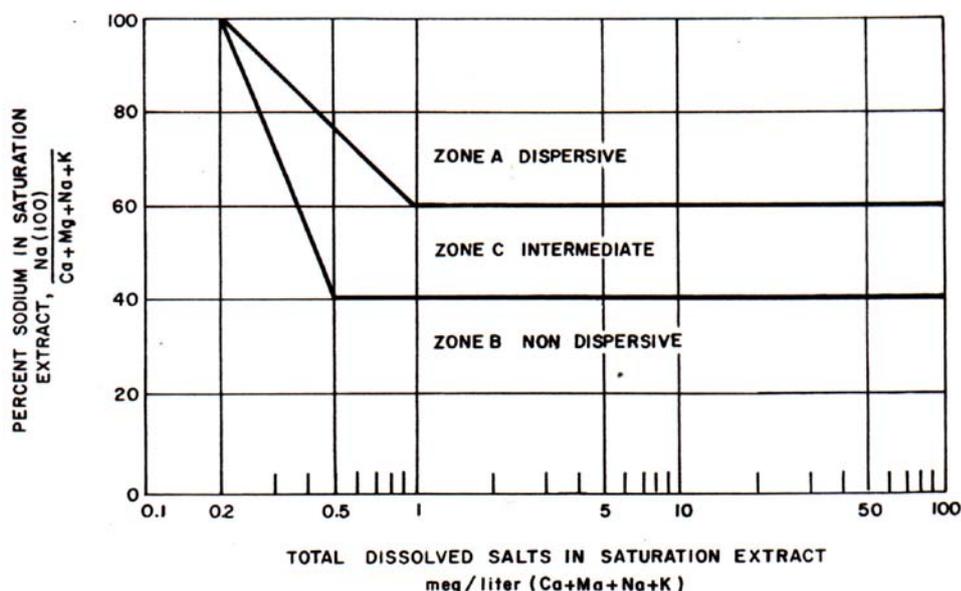
$$ESP = \frac{Na}{CEC} \text{ meq/100 g} \quad (3)$$

Richards (1954) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESP และ SAR ซึ่งพบว่า ค่าทั้ง 2 มีความสัมพันธ์กันในรูปของสมการ Regression ดังแสดงในสมการที่ 4 และภาพที่ 9 สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESP และ SAR ในรูปของ Nomogram จากสมการ Regression แสดงดังภาพที่ 10 ดังนั้นถ้าหากทราบค่าใดค่าหนึ่งก็จะสามารถคำนวณหาอีกค่าหนึ่งโดยประมาณได้

$$ESP = \frac{100(-0.0126 + 0.01475 SAR)}{1 + (-0.0126 + 0.01475 SAR)} \quad (4)$$

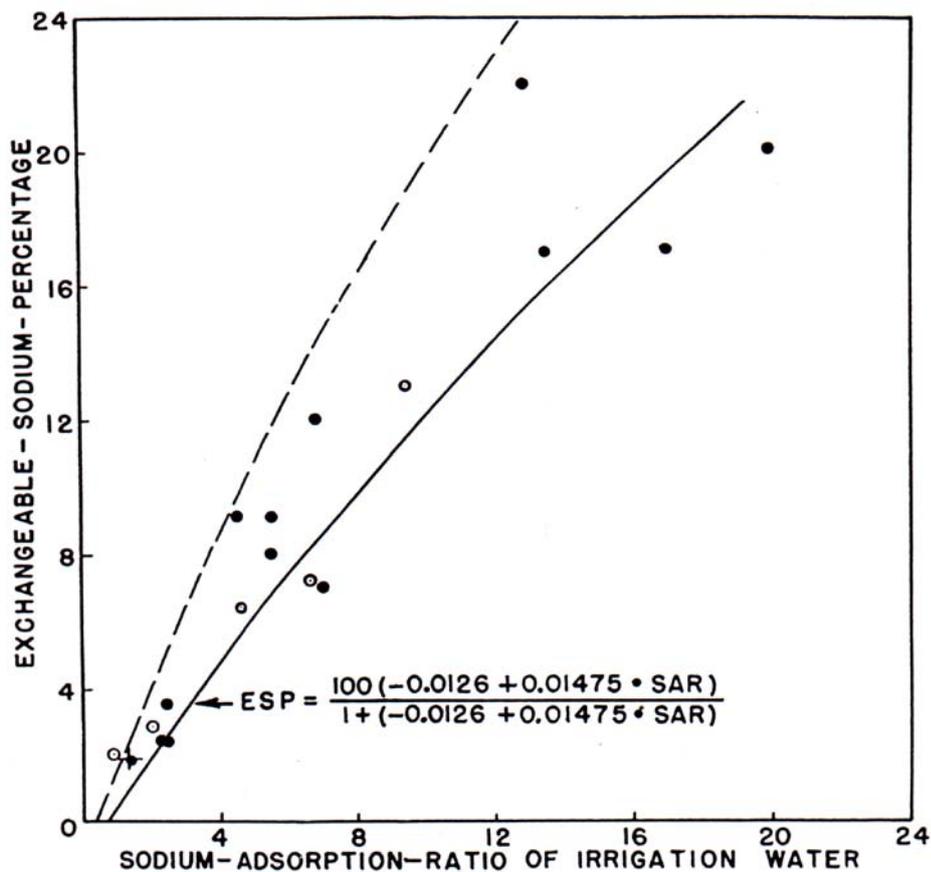
จากรายงานของประเทศออสเตรเลีย กล่าวว่า ดินที่มีค่า SAR มากกว่า 2 มักจะเป็นดินกระจายตัว และถ้าค่า ESP มีค่าอยู่ระหว่าง 7 ถึง 10 ดินจะมีการกระจายตัวปานกลางและอาจเกิด Sinkhole บนเขื่อนดินหรือ Piping ขึ้นได้ และถ้าค่า ESP สูงเกิน 15 จะเกิด Serious Piping

Sherard et. al. (1976) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือละลายโซเดียมกับปริมาณเกลือละลายทั้งหมด (Total Dissolved Salts, TDS) ในน้ำยาซึ่งสกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Soil Saturation Extract) แล้วทำการแบ่งโซนดินที่กระจายตัว ดินที่ไม่กระจายตัว และดินที่อยู่ก้ำกึ่งระหว่างดินทั้ง 2 ดังแสดงในภาพที่ 11 และเมื่อทำการพล็อตค่า SAR ลงไปด้วย จะได้กราฟดังรูปที่ 12



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือละลายโซเดียมกับปริมาณเกลือละลายทั้งหมด

ที่มา: Sherard et. al. (1976)

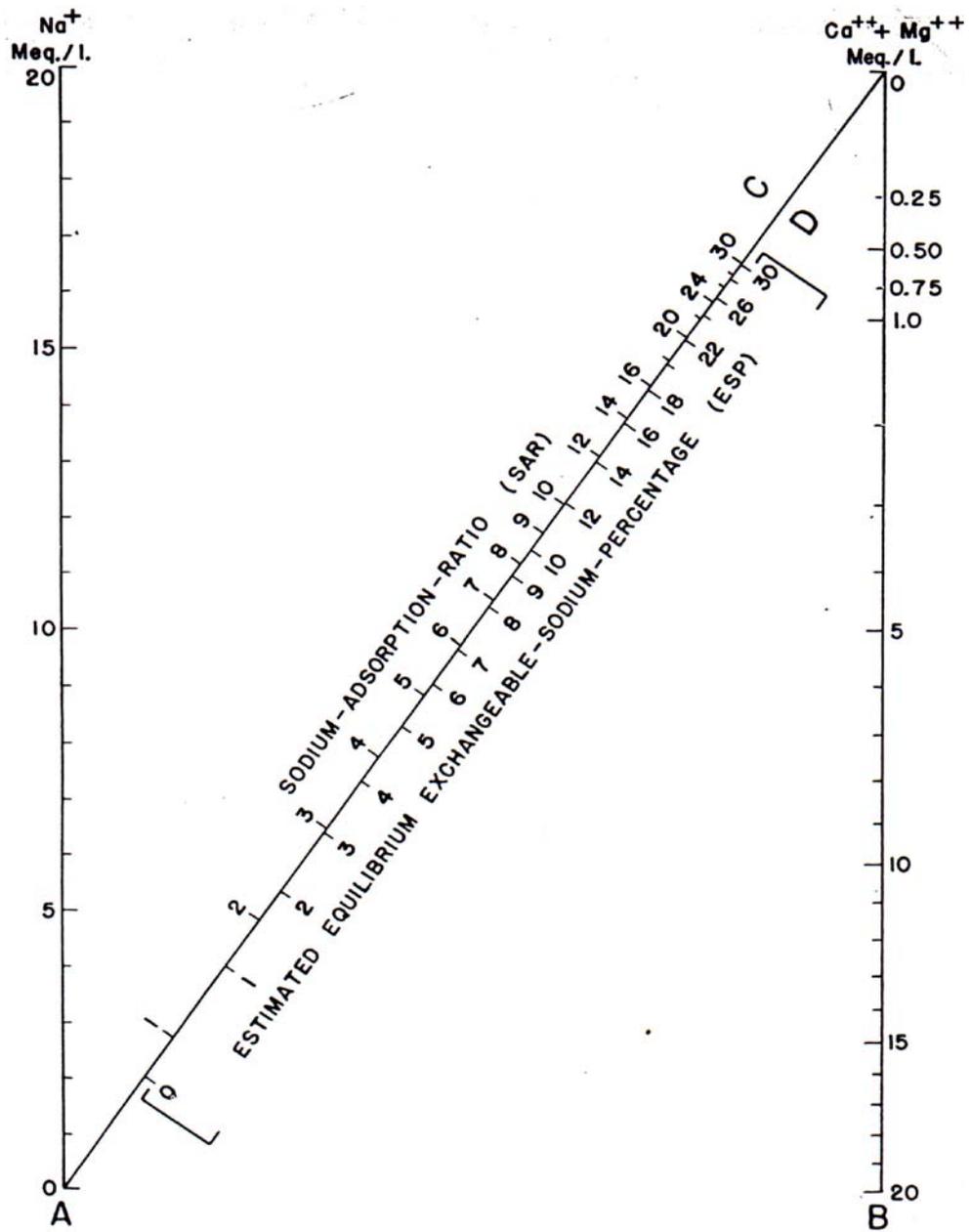


ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESP และ SAR ในรูปของสมการ Regression

ที่มา: Richards (1954)

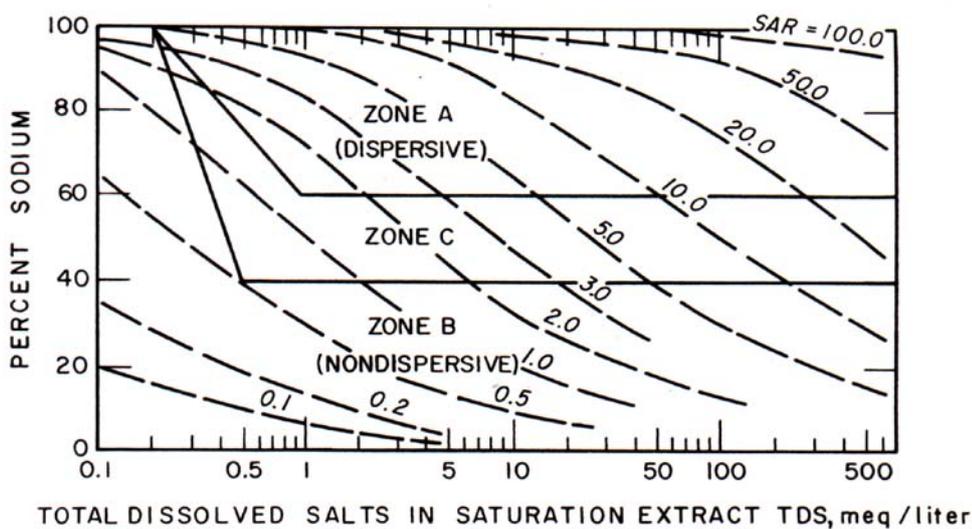
จากการตรวจวิเคราะห์ดินกระจายตัวโดยฝ่ายดินด้านวิทยาศาสตร์ กรมชลประทาน จำนวนกว่า 13,000 ตัวอย่าง พบว่า การแบ่งโซนสำหรับจำแนกดินกระจายตัวตามวิธีของ Sherard และคณะ (1976) ไม่ได้ผล เนื่องจากตรวจพบว่าดินที่มีเปอร์เซ็นต์โซเดียมสูงเกิน 60 เปอร์เซ็นต์ อาจจำแนกเป็นดินกระจายตัวหรือไม่กระจายตัวก็ได้

Bell (1992) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESP กับ CEC ในหน่วย meq ต่อ 100 กรัมของดินเหนียว ดังแสดงในภาพที่ 13



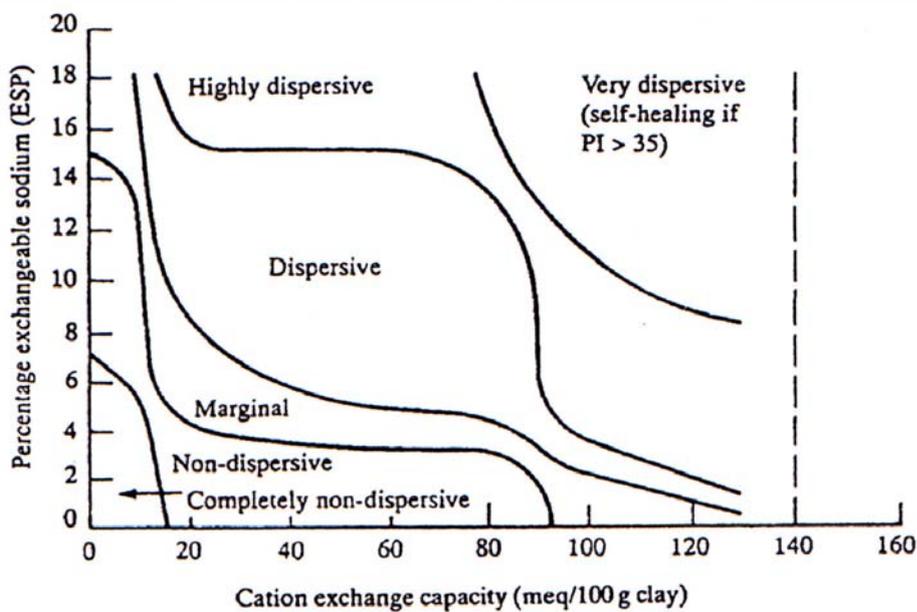
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESP และ SAR ในรูปของ Nomogram

ที่มา: Richards (1954)



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือละลายโซเดียมกับปริมาณเกลือละลายทั้งหมด เมื่อทำการพล็อตค่า SAR ลงไปด้วย

ที่มา: Sherard et. al. (1976)



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESP กับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน

ที่มา: Bell (1992)

วิธีการแก้ปัญหาการกระจายตัวของดิน

ถึงแม้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในงานวิศวกรรมปฐพีและฐานราก จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับดินเหนียวกระจายตัว อย่างไรก็ตาม เราสามารถที่จะนำดินเหนียวกระจายตัวมาใช้งานได้ โดยการควบคุมการใช้งานให้เหมาะสม โดยเฉพาะในโครงการใหญ่ ๆ อาจจะต้องมีการออกแบบโครงสร้างป้องกันเพื่อแก้ปัญหาการกระจายตัวของดินที่ใช้ เช่น การออกแบบชั้นกรองที่มีประสิทธิภาพในงานเขื่อนดิน หรือเพิ่มการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เป็นต้น ทั้งนี้จะต้องตรวจสอบคุณสมบัติดินก่อนและภายหลังการปรับปรุงอย่างระมัดระวัง

ทางเลือกของการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากดินกระจายตัวโดยทั่วไปแล้วจะมีอยู่ 4 ทางเลือก ได้แก่ การควบคุมโดยการปรับปรุงคุณภาพดินโดยตรง การควบคุมโดยการปรับปรุงคุณภาพน้ำ การป้องกันผิวหน้าโครงสร้างดินถม และการออกแบบชั้นกรองที่เหมาะสม (ศุภกิจ, 2543)

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ปูนขาว

โดยทั่วไปการเลือกใช้สารเพิ่มเสถียรภาพนั้น จะต้องคำนึงถึงความสามารถในการปรับปรุงเพื่อให้ดินมีคุณสมบัติตามที่นำไปใช้งานได้โดยปลอดภัย ประสิทธิภาพของการทำงาน การจัดเก็บรักษาวัสดุ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อมีการใช้งานทั้งในระยะสั้นและระยะยาว รวมทั้งค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

ปูนขาว (Lime) เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งในหลาย ๆ ชนิดที่สามารถนำมาปรับปรุงคุณสมบัติของดินทางด้านวิศวกรรมได้ ปูนขาวได้มาจาก Calcareous Materials เช่น Limestone, Chalk โดยปูนขาวที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นมี 2 ชนิด ได้แก่ CaO (Quicklime หรือ Unslaked Lime) และ Ca(OH)₂ (Hydrated Lime หรือ Slaked Lime) สำหรับปูนขาวชนิด CaCO₃ จะใช้ทางด้านการเกษตร (ศุภกิจ, 2537)

1. Quicklime

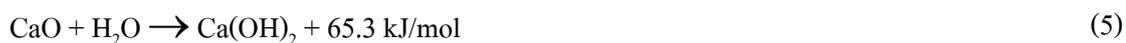
Quicklime จะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นส่วนประกอบหลัก และจะมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นส่วนประกอบรอง Quicklime สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- High Calcium Quicklime; CaO
- Dolomitic Quicklime; CaO + MgO

วิธีการผลิตปูนขาวแบบ High Calcium Quicklime คือการเผา Limestone (CaCO_3) เพื่อขจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีอยู่ในหินที่เป็นวัตถุดิบให้เหลือแต่แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยใช้อุณหภูมิสูงถึง 1650°F (900°C) ซึ่งหลังการเผาจะได้ CaO และ CO_2 ออกมา แต่อาจใช้อุณหภูมิสูงถึง 2000°F (1100°C) เพื่อทำให้เกิดการแตกตัวของ CO_2 ที่สมบูรณ์เต็มที่ สำหรับวิธีการผลิตปูนขาวแบบ Dolomitic Quicklime คือการเผา Dolomitic Limestone ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) โดยต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1350°F (750°C) ซึ่งหลังการเผาจะได้ CaO, MgO และ CO_2 แต่อาจใช้อุณหภูมิสูงถึง 2000°F (1100°C) เพื่อทำให้เกิดการแตกตัวของ CO_2 ที่สมบูรณ์เต็มที่ (บุญชัย, 2539)

คุณภาพของปูนขาวชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้และช่วงเวลาในการเผา Herrin and Mitchell (1961) กล่าวว่า ถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงเกินกว่าความจำเป็นที่ต้องการในการผลิตปูนขาวจะได้ปูนขาวที่เรียกว่า Overburned Quicklime ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับน้ำช้าลง แต่ถ้าใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าพอดี จะทำให้เหลือวัตถุดิบที่ยังเผาผลาญไม่หมด ซึ่งไม่เหมาะในการปรับปรุงคุณภาพดิน

Quicklime เมื่อนำมาผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ผลของปฏิกิริยาจะทำให้เกิด Hydrated Lime หรือ Slaked Lime และจะมีความร้อนเกิดขึ้นดังสมการที่ 5 ซึ่งนอกจากจะให้ความร้อนแล้วยังทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นด้วย (Hausmann, 1990)



2. Hydrated Lime

Hydrated Lime ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ Quicklime กับน้ำ สามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิด คือ

- Hydrated high-calcium lime; $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Normal hydrated or monohydrated dolomitic lime; $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{MgO}$
- Pressure hydrated or dihydrated dolomitic lime; $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$

ขนาด Particle size ของปูนขาวจะมีขนาดเล็กมาก ซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดประมาณ 1 ใน 10 เท่า ของขนาด Particle size ของปูนซีเมนต์

ปูนขาวประเภท Hydrated Lime จะมีข้อดีกว่าปูนขาวประเภท Quicklime เนื่องจากเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะคายความร้อนออกมาน้อยกว่า มีฤทธิ์กัดกร่อนเครื่องจักรน้อยกว่า และเป็นอันตรายต่อผู้ใช้น้อยกว่า แต่ในการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นปูนขาวประเภท Hydrated Lime จะต้องใช้ปริมาณปูนขาวมากกว่าปูนขาวประเภท Quicklime เมื่อเปรียบเทียบในงานเดียวกัน (Hausmann, 1990)

การปรับปรุงโดยใช้ปูนขาว หรือการทำ Lime Treatment นั้น มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในการแก้ไขปัญหาดินกระจายตัวในงานวิศวกรรมเขื่อนดิน ทั้งนี้การใช้ปูนขาวมีข้อดีคือ สามารถลดการกระจายตัวของดินได้ดีและการทำงานที่สะดวก (Workability) เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างดิน น้ำ และสารเคมีเกิดขึ้นต่อเนื่องอย่างช้า ๆ และเมื่อผสมด้วยสัดส่วนที่เหมาะสมดินยังคงมีความยืดหยุ่นในขณะที่บดอัดลงบนลาดดินตัวเขื่อน การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Cation Exchange) แคลเซียมไอออนซึ่งมีวาเลนซ์สูงกว่าจากปูนขาวจะแทนที่โซเดียมไอออนบนพื้นผิวดินเหนียว ปูนขาวจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำในดินตลอดจนความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการจับตัวกันและทำให้ชั้นของประจุบวก (Double Layer) ที่ห่อหุ้มอนุภาคดินหดรัดตัวแคบเข้า ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคดินลดลง ส่งผลให้ดินกระจายตัวน้อยลงหรืออาจไม่กระจายตัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมดุลของการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากปริมาณปูนขาวที่เติมลงไปอย่างเหมาะสม

โดยทั่วไปปริมาณของปูนขาวที่ใช้ในการลดระดับการกระจายตัวจะอยู่ระหว่างร้อยละ 1 ถึง 2 โดยน้ำหนักดินแห้ง ดินเหนียวแม้จะมีการปรับปรุงด้วยปริมาณปูนขาวเพียงเล็กน้อย ก็มีผลทำให้ดินนั้นมีความเปราะเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มของการแตกร้าวได้ง่าย (Sherard et. al., 1977)

Haliburton et. al. (1975) อธิบายถึงผลของการใช้ปูนขาวเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินกระจายตัวโดยตั้งสมมติฐานว่า ประจุไฟฟ้าโซเดียมที่มีอยู่รอบ ๆ อนุภาคของดินมีการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า ผลของการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าทำให้ดินจับตัวกันเป็นก้อน โดยเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของดินเหนียวและเกิดการหดรัดตัวแคบเข้าของวงน้ำ ค่าความเป็นกรดต่างจะมากขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 12.4 และมีความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการจับตัวกันของเม็ดดิน

ปฏิกิริยาระหว่างดินกับปูนขาว

การใช้ปูนขาวไฮเดรตสำหรับปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีขั้นพื้นฐานขึ้นใน 4 ลักษณะ คือ Cation Exchange, Flocculation (Agglomeration), Carbonation และ Pozzolanic Reaction (Rosser and Moore, 1980; Hausmann, 1990)

1. Cation Exchange

เมื่อนำปูนขาวมาผสมกับดินเหนียวเปียกจะทำให้ดินเหนียวเปียกนั้นร่วนขึ้น สามารถแยกเป็นเม็ด ๆ ได้ง่าย เนื่องจากเกิดการแทนที่หรือแลกเปลี่ยนกันของ Cation ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดินกับ Ca^{2+} จากปูนขาว โดย Ca^{2+} จะเข้าไปแทนที่ไอออนของธาตุโลหะในดิน เช่น Na^+ , H^+ ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่ผิวของเม็ดดิน (Clay Particle)

ลำดับชั้นโดยทั่วไปของความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของ Cation ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดิน ซึ่งกำหนดขึ้นโดย Lyotropic Series มีดังนี้คือ $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{NH}_4^+ \ll \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} \ll \text{Al}^{3+}$ โดยที่ Cation แต่ละตัวมักจะแทนที่ Cation ที่อยู่ทางซ้ายของตัวเองใน Lyotropic Series การเพิ่มปูนขาวลงในดิน ทำให้เกิด Ca^{2+} จำนวนมาก จึงทำให้เกิดการจับตัวกันระหว่าง Ca^{2+} ที่ผิวของเม็ดดิน โดยที่ Ca^{2+} เหล่านี้จะเชื่อมประสานโยงใยกันจนปกคลุมเม็ดดิน ทำให้ไอออนอื่น ๆ ที่มีอยู่ที่ผิวของเม็ดดินเคลื่อนที่ห่างออกไปพร้อม ๆ กับน้ำที่อยู่ในชั้น Double layer จะลดลง ทำให้เม็ดดินเข้าใกล้กันและน้ำภายในเม็ดดินลดน้อยลง

อัตราการแทนที่ของ Cation จะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแร่ดินเหนียว ความเข้มข้นของสารละลาย และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วแร่ดินเหนียว Kaolinite จะถูกแทนที่โดยทันทีทันใด ส่วน Illite อาจใช้เวลาไม่กี่ชั่วโมงจึงจะแทนที่ทั้งหมด เพราะว่า Exchange Capacity นั้นอยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคดินเหนียว นอกจากนี้ Illite ยังมีขนาดเล็กกว่า Kaolinite สำหรับ Montmorillonite นั้นจะใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นอีกเพราะ Exchange Capacity นั้นอยู่ระหว่าง Interlayer นอกจากนี้ยังมีขนาดเล็กกว่า Illite อีกด้วย

2. Flocculation (Agglomeration)

การเกิด Flocculation นั้น จะทำให้ขนาดของเม็ดดิน โตขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดดินเหนียวส่วนใหญ่เป็นแผ่นบาง ๆ (Platy Structure) ซึ่งเมื่อเข้าใกล้กันอย่างอิสระจะวางตัวในลักษณะของ Random Arrangement ทำให้เกิดเป็นมุมหรือเหลี่ยมซึ่งเป็นผลดีต่อการต้านทานแรงกระทำจากภายนอก การที่ขนาดของเม็ดดินโตขึ้นนั้นเนื่องจาก เมื่อเพิ่มปูนขาวเข้าไปทำให้ปริมาณ Ca^{2+} ของน้ำในช่องว่างของมวลดินมีความเข้มข้นของไอออนสูงขึ้น ดังนั้นจะเกิด Cation Exchange ของแร่ดินเหนียวซึ่งจะทำให้วงน้ำ Double Layer หดตัวแคบเข้าและจะเกิดแรงดึงดูดกันเป็น โครงสร้างแบบระเกะระกะ ซึ่งสอดคล้องกับ Ruenkairergsa (1982) ที่กล่าวไว้ว่า เมื่อผสมปูนขาวลงไปดิน Ca^{2+} จะเข้าไปเกาะติดอยู่รอบ ๆ เม็ดดิน ทำให้ได้สารผลิตภัณฑ์ใหม่คือ $Ca(OH)_2$ และผลักให้ Fe_2O_3 , Al_2O_3 และ SiO_2 เคลื่อนที่ห่างออกจากเม็ดดิน จากนั้นเม็ดดินจะเกิดประจุไฟฟ้าที่มีแรงดึงดูดให้เม็ดดินเคลื่อนที่เข้าหากัน

Diamond and Kinter (1965) กล่าวว่า เนื่องจากน้ำที่อยู่ในชั้น Double Layer บางลง จึงทำให้เกิดการ Flocculation และเกิดการรวมตัวกันของเม็ดดิน (Agglomeration) ซึ่งเป็นผลทำให้ค่า Liquid Limit ลดลง Plastic Limit เพิ่มขึ้น และ Plasticity Index ลดลง ปฏิกริยา Flocculation และ Agglomeration นี้ มีผลต่อค่า Plasticity, Shrinkage และ Workability ของดินผสมปูนขาว แม้ว่าเราจะใช้ปูนขาวเป็นปริมาณเล็กน้อยก็ตาม นอกจากนี้ยังพบอีกว่าปฏิกริยา Cation Exchange และปฏิกริยา Flocculation-Agglomeration นี้ไม่ได้เป็นปฏิกริยาหลักที่ทำให้กำลังของดินเหนียวผสมปูนขาวพัฒนาขึ้นมากนัก

เนื่องจากการเกิดปฏิกริยานี้ จะทำให้ความเหนียวของดินลดลงซึ่งทำให้ดินร่วนขึ้น ดังนั้นปูนขาวจึงมีประโยชน์ที่จะนำมาใช้กับวัสดุที่มีความเป็นพลาสติกสูง ๆ และดินที่มีปริมาณความชื้นสูง เช่น ดินเหนียว ซึ่งยากต่อการนำมาใช้งานเพราะบดอัดลำบาก ซึ่งหากนำมาผสมกับปูนขาวจะทำให้บดอัดง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ปูนขาวในการลดค่า Plasticity Index ของดินก่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์หรือแอสฟัลท์ได้อีกด้วย

ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งก็คือ เมื่อต้องการผสมซีเมนต์หรือแอสฟัลท์กับดินเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวหรือดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง ๆ ให้มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น ซึ่งจะได้ผลดีก็ต่อเมื่อวัสดุดังกล่าวสามารถเข้าไปห่อหุ้มหรือเกาะติดอยู่ที่เม็ดดินมากที่สุดเท่านั้น หากเราใช้ปูนขาวผสมลงไปก่อนก็จะทำให้ดินร่วนขึ้น ทำให้ซีเมนต์หรือแอสฟัลท์เข้าไปห่อหุ้มหรือเกาะติดเม็ดดินได้อย่างเต็มที่

3. Lime Carbonation

ปฏิกิริยา Lime Carbonation เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในปูนขาวทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศ แล้วเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) กับน้ำ ดังสมการที่ 6



แคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา Pozzolanic ลดลง ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบของ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ซ้ำลง อันจะเป็นผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินเหนียวผสมปูนขาวช้าลงกว่าปกติได้ นอกจากนี้ยังพบว่าในตัวอย่างของดินที่ป้องกันไม่ให้ปูนขาวเกิดปฏิกิริยา Carbonation กับอากาศนั้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มนาน ๆ จะให้กำลังสูงกว่าตัวอย่างดินที่บ่มแล้วปล่อยให้ปูนขาวทำปฏิกิริยากับอากาศได้ ดังนั้น จึงไม่เป็นที่พึงประสงค์ให้เกิดปฏิกิริยา Carbonation ขึ้นในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการผสมกับปูนขาว โดยต้องเก็บปูนขาวอย่างมิดชิดอย่าให้สัมผัสกับอากาศก่อนนำไปใช้งาน

4. Cementation (Pozzolanic Reaction)

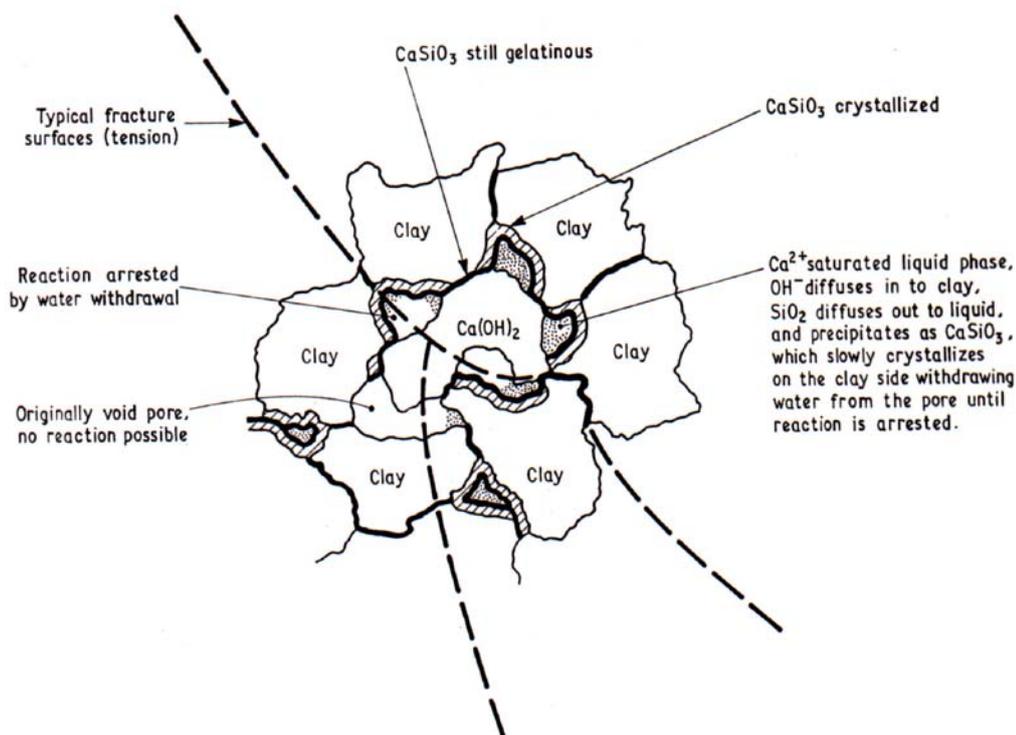
ปฏิกิริยา Cementation หรือ Pozzolanic นั้นเป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและ Soil Silica หรือ Alumina ซึ่งก่อให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติการประสานตัวซึ่งกันและกัน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้กำลังของดินเหนียวผสมปูนขาวเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อมีการเติมปูนขาวลงในดิน ค่าความเป็นกรดต่างจะสูงขึ้นเป็นผลอันเนื่องมาจากปูนขาว การเพิ่มปูนขาวจำนวนเล็กน้อย (มากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) ในดินจะเพิ่มค่าความเป็นกรดต่างขึ้นจนมีค่าประมาณ 12 และที่สภาวะ pH ที่สูงเช่นนี้ การชะละลาย (Solubility) ของ Silica และ Alumina ในดินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย Silica ที่ละลายตัวออกจากโครงสร้างของอนุภาคดินเหนียวมาทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} เกิดเป็นสารประกอบใหม่ ได้แก่ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งเป็นสารที่จะแข็งตัวตามเวลาและจะเชื่อมประสานเม็ดดินเข้าด้วยกัน ส่งผลให้ดินมีกำลังสูงขึ้น ดังสมการที่ 7 และ 8



สารที่เกิดปฏิกิริยากับปูนขาวแล้วได้สารประกอบชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติในการยึดเหนี่ยวเม็ดดินนี้รู้จักกันในชื่อสาร Pozzolans ดังนั้นชนิดและปริมาณของสาร Pozzolans จะเป็นตัวควบคุมปฏิกิริยาดังกล่าว สาร Pozzolans ที่พบ ได้แก่ Fly ash, Volcanic ash เป็นต้น

Ingles (1970) กล่าวว่าสารละลาย CSH จะทำหน้าที่หล่อหุ้มเม็ดดินและเชื่อมเม็ดดินให้เกาะติดกัน ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การเกาะตัวของสาร CSH ในโครงสร้างดินเหนียวผสมปูนขาว

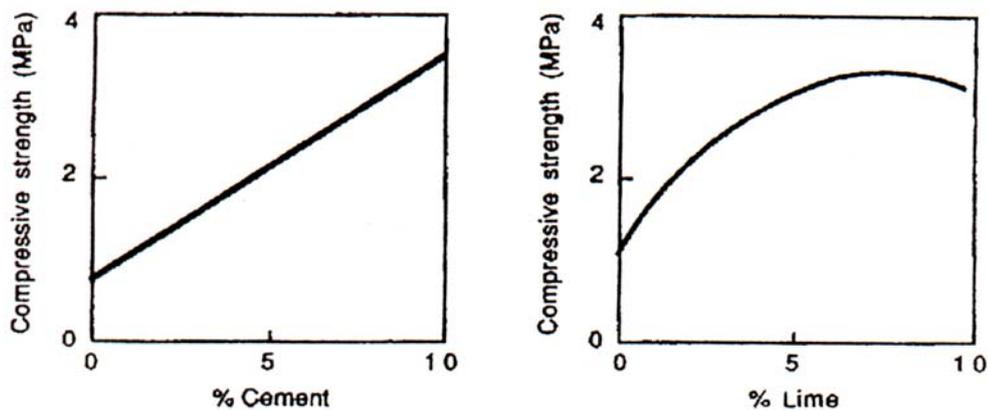
ที่มา: Ingles (1970)

สาร CSH ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างดินผสมปูนขาวเป็นสารชนิดเดียวกับสารที่เกิดในดินผสมซีเมนต์ แต่ต่างกันที่สาร CSH ในดินผสมปูนขาวเกิดจากปฏิกิริยา Pozzolanic ระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาในดิน ส่วนสาร CSH ในดินผสมซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์กับน้ำ

ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสาร CAH โดยพื้นฐานแล้วจะเกิดขึ้นทันที และจะเกิดที่จุดต่อระหว่างขอบและผิวหน้าของดินเดิม สำหรับสารประกอบ CSH จะเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่า แรงยึดเกาะซึ่งเกิดจากสารประกอบ CAH จะไม่มีความแข็งแรงเหมือนกับแรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ของสารประกอบ CSH

Ruenkairergsa (1982) กล่าวว่า การเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับดิน ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอาจจะเพิ่มขึ้นได้ไม่เต็มที่ หากมีสารประกอบอื่น ๆ อยู่ในดิน เช่น ปริมาณสารอินทรีย์และซัลเฟต สารอินทรีย์และซัลเฟตจะทำให้ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง โดยจะไปแบ่ง Ca^{2+} มาจากปฏิกิริยา Pozzolanic ซึ่งมีผลทำให้อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง นอกจากนี้ สารประกอบของเหล็ก เช่น Fe_2O_3 ที่เคลือบอยู่ในโครงสร้างของดินก็สามารถไปหน่วงการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลงได้เช่นกัน

ปฏิกิริยา Pozzolanic ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้กำลังของดินเหนียวผสมปูนขาวเพิ่มขึ้น แต่จากปริมาณของซิลิกาที่อยู่จำกัดค่าหนึ่ง ถ้ามีการใช้ปูนขาวเพิ่มขึ้นจนมากกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยากับซิลิกาในดิน ปูนขาวที่เพิ่มขึ้นนี้จะไม่ทำให้กำลังเพิ่มขึ้น และอาจทำให้กำลังลดลงด้วย ซึ่งแตกต่างกับดินเหนียวผสมซีเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 15



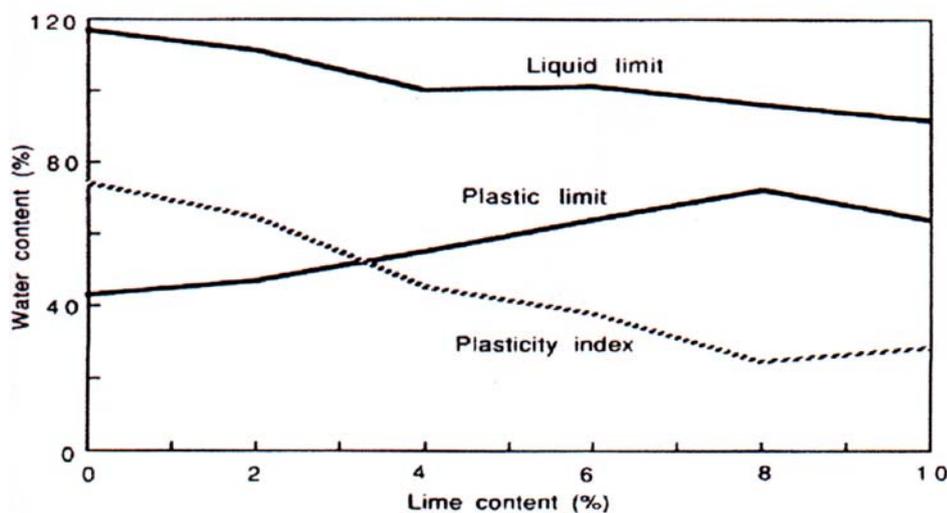
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Strength กับปริมาณสารเชื่อมประสาน

ที่มา: Hausmann (1990)

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินผสมปูนขาว

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อผสมปูนขาวลงในดินเหนียวที่มีความชื้นนั้น จะทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินดีขึ้น เช่น เพิ่มกำลังของดิน ลดการยุบตัว ปรับปรุง Workability (ลดค่า Plasticity Index) ลดการบวมตัวและการหดตัว เพิ่มค่า Permeability ซึ่งทำให้ลดการเกิด Excess Pore Pressure เนื่องจากแรงกระทำ เป็นต้น (Hausmann, 1990; Broms and Boman, 1978)

การผสมปูนขาวลงในดินเหนียวจะทำให้โครงสร้างดินเกิดการ Flocculation ซึ่งจะทำให้ค่า Plasticity Index ของดินลดลง (Sherwood, 1993) โดยค่า Plastic Limit ของดินเหนียวจะเพิ่มขึ้นทันทีเมื่อผสมปูนขาว และอัตราการเพิ่มนี้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมจนถึงจุด ๆ หนึ่งที่เรียกว่า จุด Lime Fixation Point ซึ่งเป็นจุดที่เมื่อผสมปูนขาวลงไปปริมาณที่มากกว่าจุดนี้ไป ค่า Plastic Limit จะไม่เพิ่มขึ้นหรือเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของค่า Plastic Limit ในช่วงแรก ๆ สำหรับค่า Liquid Limit นั้น อาจลดลงหรือเพิ่มขึ้นก็ได้ โดยทั่วไปดินที่มีค่า Plasticity สูง ค่า Liquid Limit จะลดลงเมื่อปริมาณปูนขาวมากขึ้น แต่ในดินที่มีค่า Plasticity ต่ำ ค่า Liquid Limit อาจเพิ่มขึ้นก็ได้ ดังแสดงในภาพที่ 16 (Herrin and Mitchell, 1961; Hausmann, 1990)

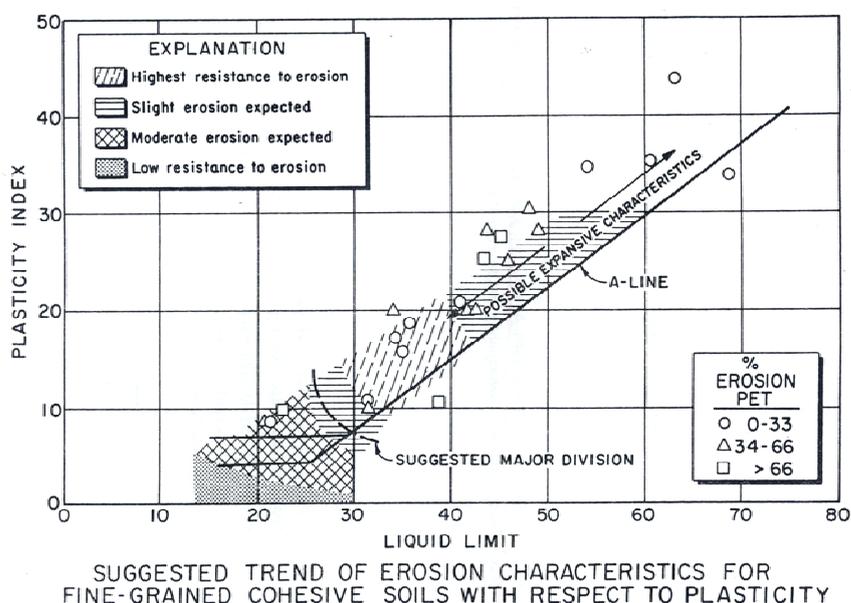


ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลง Plasticity ของดินเมื่อผสมปูนขาว

ที่มา: Hausmann (1990)

การเปลี่ยนแปลงค่า Plasticity Index จะขึ้นกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างดินเหนียวกับปูนขาว การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นมากภายในชั่วโมงแรก ๆ ที่ผสมปูนขาวและการเปลี่ยนแปลงทางด้าน Plasticity จะสิ้นสุดภายใน 2 ถึง 3 วัน ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่า Plasticity Index เมื่อเวลาในการบ่มมาก ๆ ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงบ้างแต่น้อยกว่าในช่วงแรก ๆ โดยทั่วไปแล้วค่า Plasticity Index เมื่อใช้ปูนขาว Quicklime จะลดลงเร็วกว่าเมื่อใช้ปูนขาว Hydrated Lime

Gibbs and Holtz (1962) อ้างโดย Haliburton et. al. (1975) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อการกัดเซาะกับความเหนียวของดินจากการทดสอบ Atterberg's limit และได้เสนอเส้นแนวโน้มของการกัดเซาะสำหรับดินเม็ดละเอียด ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อการกัดเซาะกับความเหนียวของดิน

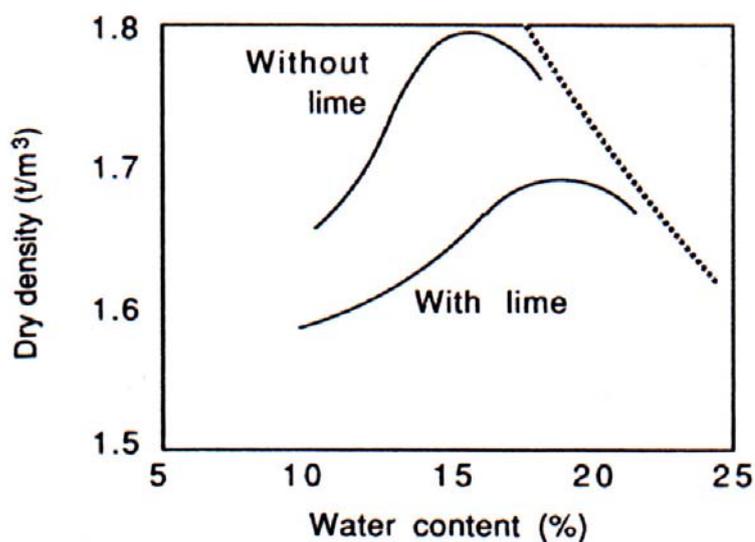
ที่มา: Haliburton et. al. (1975)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านอัตราส่วนขนาดละเอียดของเม็ดดิน เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ สิ่งแรกที่เกิดขึ้นในดินเม็ดละเอียดเมื่อมีการผสมปูนขาวคือ จะทำให้ดินรวมตัวกันเป็นก้อนเป็นผลให้เม็ดดินหยาบขึ้นและร่วนขึ้นกว่าเดิม โดยที่เมื่อเวลาบ่มมากขึ้น ความสามารถในการรวมตัวก็จะมากขึ้นด้วย เม็ดดินเหนียวที่ละเอียดจะเป็นเม็ดดินที่สามารถเปลี่ยนขนาดของเม็ดดินโดยปูนขาวได้มากที่สุด เพราะสามารถที่จะทำปฏิกิริยากับปูนขาวได้มากกว่าดินที่มีเม็ดใหญ่กว่า

ปูนขาวมักจะไปลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่เกิดขึ้นในดิน เมื่อมีปูนขาวในดินมากขึ้น ค่า Shrinkage Limit ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่า Shrinkage Rate จะลดลง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าปูนขาวมีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดลงของการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change)

Ingles and Metcalf (1972) กล่าวว่า กำลังหลักที่เพิ่มขึ้นของดินเหนียวผสมปูนขาวจะเกิดจากปฏิกิริยา Pozzolanic ระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปูนขาวกับซิลิกาและอลูมินาจากดิน ซึ่งจะได้สาร CSH และ CAH ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในระยะยาว ส่งผลให้กำลังของดินผสมปูนขาวพัฒนาต่อเนื่องไปในระยะยาวด้วย

Hausmann (1990) กล่าวว่า ดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว ค่าความหนาแน่นแห้งของส่วนผสมดินเหนียวและปูนขาวจะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นแห้งของดินตามธรรมชาติเมื่อบดอัดด้วยพลังงานที่เท่ากัน และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมก็จะมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ปริมาณของปูนขาวที่มีผลต่อกราฟการบดอัดดิน

ที่มา: Hausmann (1990)

องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณสมบัติของดินผสมปูนขาว

1. คุณสมบัติของดิน

Lu et. al. (1957) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของดินที่เลือกมาปรับปรุงคุณภาพพบว่า ดินที่เหมาะสมที่จะใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาว คือ ดินประเภท Clayey Soil และ Silty Soil

Hilt and Davidson (1960) ได้อธิบายในทำนองเดียวกันว่า ดินที่มีส่วนประกอบของแร่ดินเหนียว Montmorillonite และ Kalinite จะให้ผลดีในการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวมากกว่าแร่ดินเหนียว Illite

Eades and Grim (1960) ได้ศึกษาถึงปฏิกิริยาระหว่าง Hydrated Lime กับแร่ดินเหนียวบริสุทธิ์ พบว่า แร่ Kaolinite จะให้ความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อผสมปูนขาวลงไปร้อยละ 4 ถึง 6 และความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นทันทีที่ผสมปูนขาวลงไป ส่วน Illite และ Montmorillonite จะต้องผสมปูนขาวลงไปมากกว่าร้อยละ 6 จึงจะทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การที่ Kaolinite ให้ความแข็งแรงได้รวดเร็วนั้น เนื่องจากอนุภาคปูนขาวสามารถเข้าไปเกาะติดบริเวณขอบหรือมุมของเม็ดดินได้ในทันที ส่วนแร่ Illite และ Montmorillonite อนุภาคปูนขาวต้องแทรกเข้าไประหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวที่อึดตัวเสียก่อน

Broms (1986) กล่าวว่า การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยปูนขาวจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อดินเหนียวที่ปรับปรุงมีปริมาณของ Clay Content ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 และค่า Plasticity Index ไม่น้อยกว่า 10

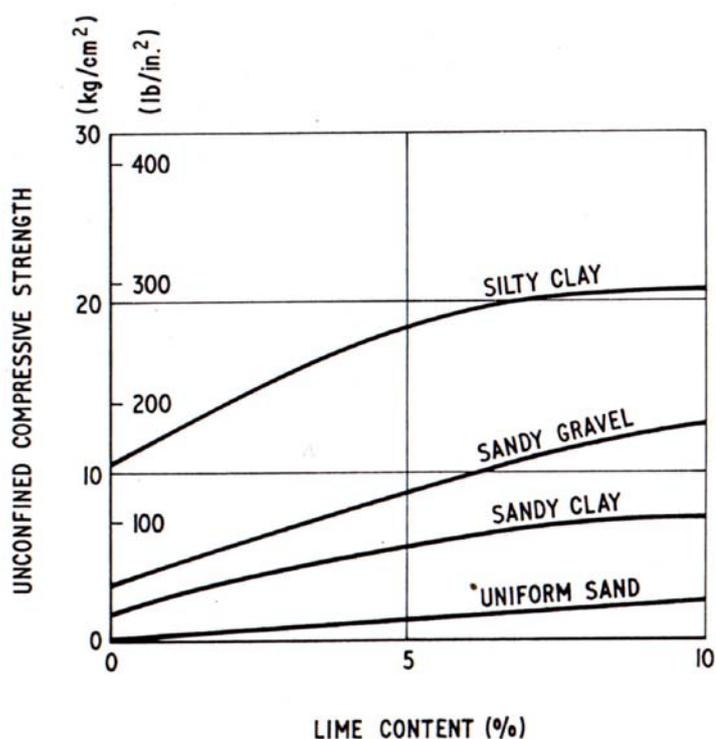
คุณสมบัติตามธรรมชาติของดินมีผลต่อปฏิกิริยา Pozzolanic จากการศึกษพบว่า ปริมาณของสารอินทรีย์ในดินจะมีผลทำให้ปฏิกิริยา Pozzolanic เกิดช้าลง เนื่องจากสารอินทรีย์นั้นมี Base Exchangeable Capacity สูง คือมีค่าสูงถึง 150 ถึง 500 meq ต่อ 100 กรัม ดังนั้นเมื่อผสมปูนขาวลงไป ในดินเหนียวที่มีอินทรีย์สารอยู่ Ca^{2+} จะถูกนำไปใช้กับ Exchange Capacity ของอินทรีย์สาร จึงเป็นการลดปริมาณของปูนขาวที่จะไปทำปฏิกิริยา Pozzolanic ทำให้ Lime Reactivity มีค่าลดลง แต่เมื่อผสมปูนขาวลงไป จนมีปริมาณเพียงพอสำหรับ Exchange Capacity ของอินทรีย์สารแล้ว ปฏิกิริยา Pozzolanic ก็จะเกิดขึ้น นอกจากนี้อนุภาค Organic Cation จะเกาะกับผิวของอนุภาคดินเหนียวและ Organic Cation นี้จะไม่สามารถถูกแทนที่โดย Cation อื่นได้ทั้งหมด

2. ชนิดและปริมาณของปูนขาว

ชนิดของปูนขาวมีผลต่อปฏิกิริยา Pozzolanic ที่เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่า ในดินเหนียวที่มีแร่ดินเหนียวพวก Monmorillonite และ Illite ปูนขาวประเภท Dolomitic Quicklime จะให้กำลังสูงกว่าปูนขาวประเภท Hydrated Lime แต่สำหรับดินเหนียวที่มีแร่ดินเหนียวพวก Kalinite นั้น ทั้ง Dolomitic Quicklime และ Hydrated Lime จะให้กำลังสูงขึ้นพอ ๆ กัน

Dumbleton (1962) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการเพิ่มของกำลังเมื่อปริมาณสารเชื่อมประสานมากขึ้น ของดินเหนียว London Clay ผสมปูนขาวและซีเมนต์ พบว่า กรณีดินผสมปูนขาว การเพิ่มของกำลังจะเป็นเส้นโค้งแตกต่างจากดินเหนียวผสมซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง

Ingles and Metcalf (1972) กล่าวว่า กำลังของดินเหนียวผสมปูนขาวจะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมจนถึงปริมาณปูนขาวหนึ่ง เมื่อเพิ่มปูนขาวเข้าไปอีกกำลังของดินจะลดลงหรือไม่เพิ่มขึ้นมากนัก ซึ่งเรียกปริมาณปูนขาวนี้ว่า Optimum Lime Content โดยอัตราการเพิ่มของกำลังในดินแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ของปริมาณปูนขาวต่อกำลังของดินบางชนิด

ที่มา: Ingles and Metcalf (1972)

Ingles and Metcalf (1972) กล่าวว่า ปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ดินจะขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการใช้งานด้วย โดยสามารถแบ่งจุดประสงค์การใช้งานออกได้เป็น 2 ระดับ คือ Modification ซึ่งหมายถึง การปรับปรุงคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน เช่น ลด Plasticity ปรับปรุง Workability และการเพิ่มขนาดคละของเม็ดดิน ซึ่งจะใช้ปูนขาวในปริมาณน้อย และ Stabilization ซึ่งหมายถึง การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เช่น เพิ่มกำลัง ลดการยุบตัว ซึ่งจะใช้ปูนขาวในปริมาณมาก

Laguros et. al. (1965) ได้ให้คำแนะนำว่า ก่อนที่จะปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาว ควรนำดินชนิดนั้นมาทดลองผสมกับปูนขาวก่อน เนื่องจากปริมาณปูนขาวที่ใช้มากเกินไปจะก่อให้เกิดความต้องการจะทำให้ดินมีกำลังลดลงและค่า Plasticity Index ไม่เป็นไปตามความคาดหมาย

3. ปริมาณน้ำในการผสม

ปริมาณน้ำในดินเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยา Hydration ของปูนขาวชนิด Quicklime และปฏิกิริยา Pozzolanic ของดินกับปูนขาว ปริมาณน้ำในขณะเริ่มผสมจะมีความสัมพันธ์กับกำลังของดินผสมปูนขาว โดยกำลังจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำเริ่มต้นมากขึ้น ซึ่งอาจสมมติฐานได้ว่า น้ำส่วนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาที่ยังคงเหลืออยู่ จะทำให้เกิดแรงดันน้ำภายในช่องว่างเม็ดดินเมื่อมีแรงภายนอกกระทำ ทำให้กำลังลดต่ำลง อย่างไรก็ตาม ถ้าปริมาณน้ำในดินน้อยเกินไปก็อาจทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปไม่สมบูรณ์ ทำให้กำลังต่ำกว่าได้

4. วิธีการปรับปรุงและความหนาแน่นจากการบดอัด

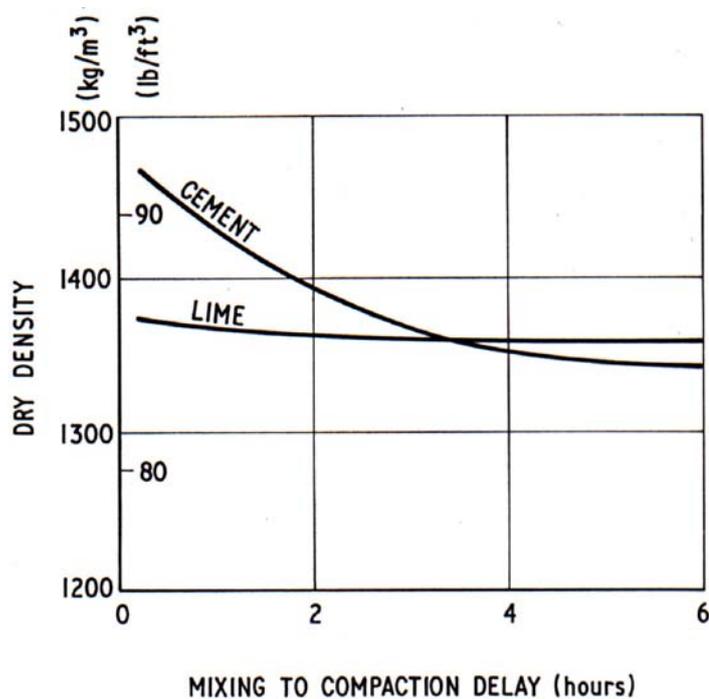
Davidson et. al. (1961) กล่าวว่า การผสมปูนขาวให้เข้ากับดินนั้น จะสามารถทำให้ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวเพิ่มขึ้นได้ ถ้ามีการผสมที่ถูกต้อง ซึ่งการผสมที่ใช้กันมี 2 แบบ คือ

- Slurry Mixture หมายถึง การคลุกปูนขาวกับดิน โดยการละลายปูนขาวกับน้ำให้เป็นน้ำขุ่น ๆ ก่อน แล้วฉีดพ่นสารละลายลงบนดิน สารละลายนี้เมื่อฉีดพ่นลงไปแล้วควรมีปริมาณน้ำเท่ากับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินนั้น ๆ

- Powder Mixture หมายถึง การคลุกปูนขาวกับดิน โดยผสม Air-dried Soil กับปูนขาว การผสมนี้ทั้งดินและปูนขาวจะแห้ง เมื่อผสมเข้ากันแล้ว จึงเพิ่มน้ำเท่ากับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

ผลการทดสอบความแข็งแรงโดย Davidson et. al. (1961) พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดิน Silty Soil กับปูนขาว แบบ Slurry Mixture และแบบ Powder Mixture โดยใช้เวลาบ่มเท่ากัน พบว่าแบบ Slurry Mixer จะให้ความแข็งแรงสูงกว่าแบบ Powder Mixture

Ingles and Metcalf (1972) กล่าวว่า เนื่องจากปฏิกิริยาการเพิ่มกำลังของดินผสมปูนขาวไม่ได้เกิดขึ้นในทันทีเมื่อทำการผสมเหมือนกับกรณีของดินผสมซีเมนต์ ดังนั้นผลกระทบจากความล่าช้าในการบดอัดดินผสมปูนขาวจึงมีไม่มากนัก ดังแสดงในภาพที่ 20

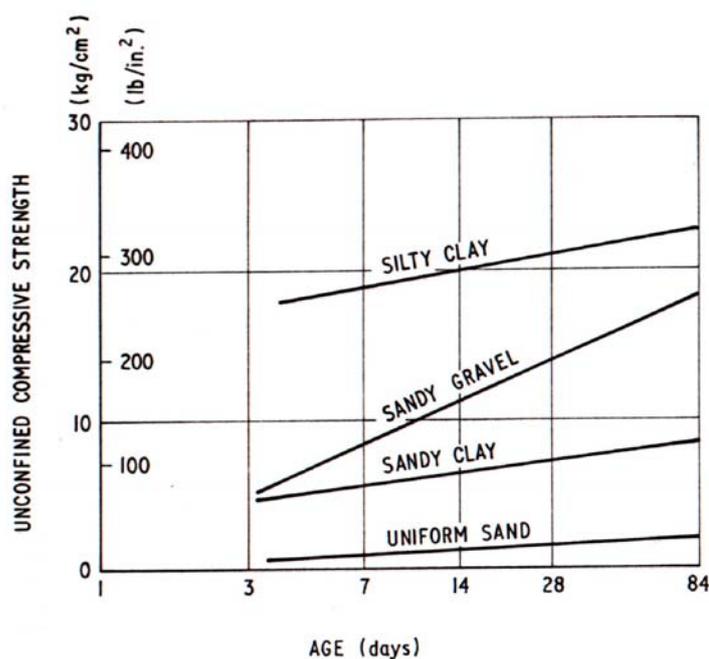


ภาพที่ 20 ผลกระทบของความล่าช้าในการบดอัดของดินผสมปูนขาวเทียบกับดินผสมซีเมนต์

ที่มา: Ingles and Metcalf (1972)

5. วิธีการและระยะเวลาในการบ่ม

Ingles and Metcalf (1972) กล่าวว่า กำลังของดินผสมปูนขาวจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยการพัฒนากำลังของดินผสมปูนขาวจะมีความแตกต่างกันตามชนิดของดิน ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การพัฒนากำลังตามอายุการบ่มของดินผสมปูนขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ที่มา: Ingles and Metcalf (1972)

Broms (1986) กล่าวว่า ในระหว่างการบ่มดินผสมปูนขาว อุณหภูมิและค่าความเป็นกรดต่างที่สูงจะช่วยเร่งปฏิกิริยาเคมีให้เร็วขึ้นเนื่องจากความสามารถในการชะละลายแร่ในดินเหนียวเพิ่มขึ้น โดยการเติมปูนขาวไปเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้นมากกว่า 12

ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ปูนขาว

แนวทางในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Lime Treatment ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

ก. กำหนดแปลงที่จะเลือกดินและแปลงที่จะผสมดินกับปูนขาว

การวางแผนการใช้ดินในบ่อขี้มจะทำให้สามารถควบคุมคุณภาพและปริมาณของดินผสมได้เป็นอย่างดี การเลือกแปลงผสมที่ดีจะทำให้การทำงานสะดวก เช่น อยู่ใกล้แหล่งน้ำ ข้อควรระวังประการสำคัญคือ ต้องเป็นบริเวณที่น้ำท่วมไม่ถึง และไม่อยู่ในบริเวณที่มีลมแรงเพราะจะทำให้ควบคุม

สัดส่วนผสมที่ถูกต้องได้ยาก สำหรับขนาดของแปลงดินผสมปูนขาวมักจะกำหนดตามความเหมาะสมของพื้นที่ทำงานที่มีอยู่ ซึ่งตามปกติจะมีขนาดความกว้าง 15 ถึง 20 เมตร ยาว 60 ถึง 80 เมตร และหนาประมาณ 30 ถึง 40 เมตร ต่อการทำ Lime Treatment หนึ่งแปลง

ข. การศึกษาคุณสมบัติดินและปูนขาว

ก่อนนำดินไปใช้งานควรมีการศึกษาคุณสมบัติของดินว่ามีระดับของการกระจายตัวเป็นอย่างไร เพื่อใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติดินด้านต่าง ๆ ทั้งก่อนและหลังผสมปูนขาว นอกจากนี้จะต้องมีการวิเคราะห์คุณภาพปูนขาวเพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณที่ใช้ผสม การวางแผนการให้น้ำตลอดจนวางแผนในขั้นตอนต่าง ๆ

ค. การผสมปูนขาว

การทำ Trial Mixes ในห้องปฏิบัติการเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อกำหนดสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมสำหรับการผสมในหน้างาน เมื่อได้ค่าสัดส่วนการผสมแล้วจึงทำแปลงทดลองแปลงแรก (Test Section) เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการผสมการปรับปรุงคุณภาพดินและการบดอัดก่อนการปฏิบัติงานจริง ข้อควรให้ความเอาใจใส่เป็นพิเศษคือจะต้องมีการเตรียมดินโดยการย่อยดินโดยเฉพาะก้อนดินขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงและกระจายปูนขาวให้ทั่วถึง จากนั้นจึงทำการผสมโดยใช้เครื่องจักรผสมปูนขาวกับดินที่ได้เตรียมไว้ให้คลุกเคล้าอย่างสม่ำเสมอ และเติมน้ำด้วยการฉีดพ่นให้กระจายไปทั่ว ๆ แล้วจึงทำการผสมวัสดุทั้งหมดให้ได้รับการคลุกเคล้าอย่างสม่ำเสมอต่อไป

ง. การวิเคราะห์คุณสมบัติดินที่ผสมแล้วและการนำดินไปใช้งาน

ภายหลังจากผสมดินในแปลงและบ่มทิ้งไว้ประมาณ 1-2 วันแล้ว ควรมีการเก็บตัวอย่างดินไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อยืนยันคุณสมบัติของวัสดุก่อนนำไปใช้งาน การตั้งหน่วยทดสอบคุณสมบัติการกระจายตัวของดินในสนามจะช่วยให้การทำงานคล่องตัวดียิ่งขึ้นหากจะต้องมีการปรับแก้ส่วนผสมก็สามารถทำได้ทันที หรือสามารถนำไปใช้งานได้ทันทีที่ทราบผล ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วหากการทำ Trial Mixes มีการวิเคราะห์อย่างละเอียดถูกต้องและใช้ดินในแปลงที่กำหนด คุณสมบัติของดินที่ผสมในแปลงก็จะเป็นไปตาม Mix Design ที่ได้ออกแบบไว้ การนำดินไปใช้งานทันทีจะเป็นผลดีอย่างมากต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม เช่น กำลังรับแรงเฉือนและความชื้นน้ำของดิน เป็นต้น

เมื่อดินผสมปูนขาวที่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์ที่กำหนดแล้ว ก็สามารถนำไปใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ มีข้อควรระวังในระหว่างการทำงานคือต้องไม่บดอัดดินมากเกินไป (Over-rolling) เพราะจะเป็นสาเหตุให้วัสดุเกิดการแยกตัวหรืออาจเกิดการหลุดลอกเป็นชั้น ๆ ในลักษณะ Surface Shearing ภายหลังจากผสมหากยังไม่ใช้งาน หรือภายหลังจากบดอัดแล้วแต่ยังไม่มีการอัดทับจะต้องฉีดพ่นน้ำบ่มดินไว้เพื่อให้ปฏิกิริยาเป็นไปอย่างสมบูรณ์

การควบคุมโดยการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

เป็นวิธีการลดดินที่กำลังกระจายตัวหรือฟุ้งกระจายตัวอยู่ในน้ำ โดยการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น Ferrous Sulphate, Aluminum Sulphate และ Raw Gypsum ทำให้ดินที่ลอยตัวอยู่ในน้ำจับตัวกันเป็นก้อนและตกตะกอน

Grant et. al. (1977) ได้รายงานถึงการใส่แคลเซียมซัลเฟตผสมกับน้ำในทางเข้าอ่างเก็บน้ำพบว่า อนุภาคของดินเหนียวที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจะค่อย ๆ จับตัวคละกัน (Flocculate) และตกตะกอนในระหว่างนั้นการกัดเซาะผิวของหน้าดินก็จะลดลงและทำให้ผิวหน้ายึดติดแน่นมากขึ้น

การป้องกันผิวหน้าโครงสร้างดินถม

เป็นการป้องกันผิวหน้าที่สัมผัสกับน้ำและอากาศโดยตรง ไม่ให้เม็ดดินถูกพัดพาไปกับน้ำได้โดยง่าย เพื่อป้องกันการที่ผิวหน้าดินแห้งและเกิดการแตกร้าวซึ่งจะเป็นผลให้เกิดการกัดเซาะได้ การป้องกันผิวหน้าโครงสร้างดินถม ถ้าใช้ดินกระจายตัวทำนบดินโดยไม่ได้ทำ Lime Treatment ของส่วนผิวหรือเปลือกเขื่อน ทำนบดินนั้นอาจมีแนวโน้มที่จะเกิด Tunnel Erosion ได้ ถ้าหากมีรอยแตกเกิดขึ้น ดังนั้นจำเป็นต้องรักษาระดับความชื้นของวัสดุที่ลาดเขื่อนไว้ไม่ให้ผิวหน้าดินแห้งและแตกร้าวสำหรับลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำให้ใช้ Silty Sand หนาประมาณ 1 เมตร และปิดทับหน้าด้วย Top Soil แล้วปลูกหญ้า (Cole et. al., 1977)

Videl (1969), Schlosser and Long (1974) ได้ศึกษาการเสริมกำลังของลาดดินเพื่อป้องกันการพังทลายของดิน โดยพบว่ารากของพืชมีส่วนช่วยให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินสูงขึ้น ซึ่งได้ผลเหมือนกับการจำลองรูปแบบ Fiber-Soil Reinforcement ของ Wu (1976)

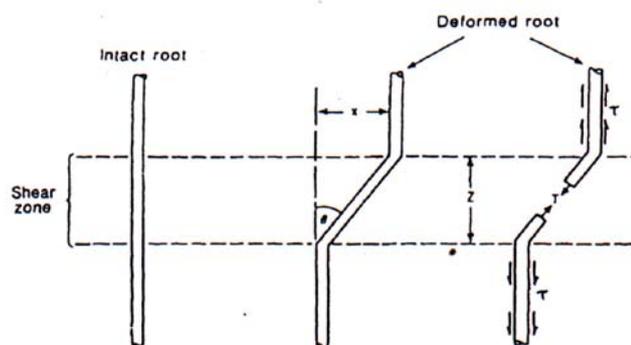
การคาดคะเนกำลังต้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของรากพืช สามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการที่ 9

$$S_R = S + \Delta S_R \quad (9)$$

เมื่อ ΔS_R = กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยราก
 $2S_R$ = กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยราก
 S = กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมราก

Wu (1976) ได้ศึกษาและพัฒนาทฤษฎีของการจำลองรูปแบบการเสริมกำลังของดินด้วยรากพืชที่ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินสูงขึ้น

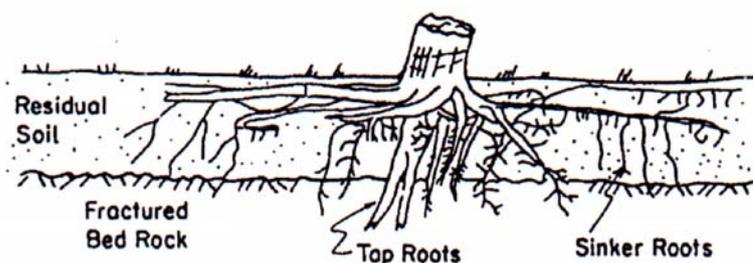
Gray and Leiser (1982) ได้พัฒนาทฤษฎีดังกล่าวเหมือนกัน โดยจำลองรูปแบบในลักษณะที่เรียกว่า Limit state model โดยสมมติว่ารากเป็นวัสดุยืดหยุ่นในระยะเวลาที่เกิดแรงเฉือน และรากอยู่ในแนวตั้งกับระนาบการเกิดแรงเฉือน ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 การจำลองรูปแบบการเสริมกำลังของดินด้วยรากในแนวตั้งฉาก

ที่มา: Wu (1976)

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรากบริเวณที่เกิดแรงเฉือน จะเป็นการพัฒนาทำให้เกิดแรงดึงในรากมากขึ้น และมุมของการเกิดแรงดึงทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นโดยตรง ซึ่งแนวความคิดนี้เป็นการจำลองตามสภาพของรากต้นไม้จริงทั้งรากแก้วและรากฝอย ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 รากแก้วและรากฝอยของต้นไม้

ที่มา: Wu (1976)

ทฤษฎีการจำลองรูปแบบการเสริมกำลังของดินด้วยรากนี้เป็นการสมมติให้รากเรียงตัวและตั้งฉากกับระนาบการเกิดแรงเฉือน โดยที่รากทุก ๆ รากมีการรับแรงดึงอย่างสม่ำเสมอ และจะได้กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยราก ดังสมการที่ 10

$$\Delta S_R = T_R (A_R/A)(\sin\theta + \cos\theta \tan\phi) \quad (10)$$

- เมื่อ
- ΔS_R = กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยราก
 - T_R = กำลังรับแรงดึงของราก
 - A_R = พื้นที่หน้าตัดของรากที่อยู่ในพื้นที่หน้าตัดของดิน
 - A = พื้นที่หน้าตัดของดิน
 - θ = มุมของแรงเฉือนที่บิดไปของราก หรือเท่ากับ $\tan^{-1}(x/z)$
 - x = ระยะการเคลื่อนที่ของการเฉือน
 - y = ความหนาบริเวณที่เกิดแรงเฉือน
 - ϕ = มุมเสียดทานภายในของดิน

สำหรับในประเทศไทยได้มีการทดลองปลูกหญ้าแฝก (Vetiver Grass) เพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำตามแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เพื่อช่วยป้องกันการพังทลายของดินและอนุรักษ์ความชุ่มชื้นไว้ในดิน โดยเฉพาะในพื้นที่ลาดชันซึ่งเป็นผลให้พื้นที่นั้นปรับสภาพลดความลาดชันลงเป็นพื้นที่ขั้นบันไดดิน (Bench Terrace) สูง 3 ถึง 4 เมตร ซึ่งสรุปว่าหญ้าแฝกเป็นตัวนำให้เกิดการสร้างบันไดดินโดยธรรมชาติในลักษณะค่อยเป็นค่อยไป เนื่องจากหญ้าแฝกมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถแตกกอโดยการแตกหน่อที่ข้อของลำต้นหรือเหง้าเหนือดินได้ตลอดเวลาเมื่อตะกอนดินมา

ทับถมแถวหญ้าแฝก ลดการสูญเสียดินจากการชะล้าง 3 ถึง 5 เท่า จากที่ไม่มีหญ้าแฝก จึงทำให้หญ้าแฝกตั้งกอใหม่ที่อยู่ระดับผิวดินตลอดไป ขณะเดียวกันหญ้าแฝกมีระบบรากฝอยที่ยังลึกลงไปตามแนวความลึกของดิน เกาะยึดติดดินให้เกิดความมั่นคงแข็งแรง ประกอบกับหญ้าแฝกเป็นพืชที่มีความไวต่อแสง จึงเจริญเติบโตอย่างปล้องออกดอกได้ตลอดปี ทำให้แถวของหญ้าแฝกมีการเจริญเติบโตในลักษณะยกตัวสูงขึ้นอยู่เหนือระดับผิวดินที่สูงขึ้นตลอดเวลา เหมือนเป็นชั้นบันไดที่มีชีวิตสามารถยกสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกว่าความลาดชันของพื้นที่จะถูกปรับให้อยู่ในแนวระดับ

โดยสรุปแล้วหญ้าแฝกมีคุณสมบัติหลายประการที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการอนุรักษ์ดินและน้ำ ดังนี้

1. หญ้าแฝกมีการแตกกอจำนวนมากและเบียดเสียดกันอย่างหนาแน่น กอแข็งแรงและตั้งตรง จึงสามารถปลูกติดต่อกันให้เป็นแถวกระดานเรียงหนึ่งได้ง่าย เปรียบเสมือนกำแพงด้านทานตะกอนดินที่ถูกน้ำกัดเซาะและพัดพามาให้ตกทับถมด้านหน้าแถวหญ้าแฝก และช่วยลดความเร็วของกระแสน้ำทำให้น้ำสามารถไหลซึมไปในดิน
2. ลำต้นเหนือดินจะมีข้อถี่ซึ่งเกิดจากการแตกของปล้อง เมื่อหญ้าแฝกมีอายุใกล้ออกดอกจะแตกหน่อและรากใหม่ ออกมาเสมอ เมื่อมีตะกอนดินทับถมจึงสามารถตั้งกอใหม่ได้
3. สามารถตัดแต่งต้นและใบให้แตกหน่อใหม่เขียวสดอยู่เสมอ ต้นและใบใช้เป็นวัสดุคลุมดินรักษาความชุ่มชื้นและเพิ่มธาตุอาหารพืชให้แก่ดินเมื่อย่อยสลายแล้วเช่นเดียวกับปุ๋ยหมัก หากหญ้าแฝกแก่ต้นและใบจะแห้ง และเมื่อถูกไฟเผาจะแตกหน่อใหม่ขึ้นมาทันทีไม่จำเป็นต้องปลูกใหม่
4. หญ้าแฝกมีรากที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วเส้นโต จะหยั่งลึกลงไปในดินและแตกแขนงเป็นรากฝอยประสานกันแน่นเหมือนตาข่ายหรือร่างแหเกาะยึดกันจนมีความแข็งแรง เมื่อปลูกหญ้าแฝกติดต่อกันระบบรากจะเป็นเสมือนม่านใต้ดินช่วยชะลอการไหลซึมของน้ำใต้ดิน ทำให้ความชื้นในดินเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการกัดเซาะของน้ำ ทำให้เกิดร่องน้ำขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่จากด้านล่างของแนวลาดชันขึ้นมาถึงด้านบน แต่เมื่อถึงแนวหญ้าแฝกก็จะหยุดเพียงแค่นั้น

Hengchaovanich (1998) ได้ศึกษาการเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก (Vetiveria Zizanioides) โดยศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม เช่น การควบคุมการกัดเซาะ กำลังของดินเสริมรากหญ้าและดินธรรมชาติ และกำลังรับแรงดึง ด้วยการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงในสนามของดินซึ่งเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกและไม่ได้เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก จากการทดลองพบว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้นที่ระดับความลึก 25 ซม. จากผิวดินมีค่ามากที่สุด และจะลดลงตามระดับความลึก โดยค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง จะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของรากหญ้าแฝก

ส่วนกำลังรับแรงดึงของรากจะอยู่ในช่วงระหว่าง 40 ถึง 180 เมกะปาสกาล โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากอยู่ในช่วงระหว่าง 0.2 ถึง 2.2 มม. และค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึงของรากเท่ากับ 75 เมกะปาสกาล โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเท่ากับ 0.7 ถึง 0.8 มม. ซึ่งมีค่าประมาณ 1 ใน 6 เท่า ของเหล็กกล้าละมุน และเปรียบเทียบกับรากต้นไม้ชนิดอื่น ๆ พบว่าสูงกว่ามาก

การออกแบบชั้นกรองที่เหมาะสม

การออกแบบชั้นกรองสามารถทำได้โดยการคัดเลือกขนาดละเอียดของทราย เพื่อทำหน้าที่กรองอนุภาคดินเหนียวเม็ดเล็ก ๆ และการควบคุมคุณภาพของการบดอัด ซึ่งการบดอัดที่ดีจะทำให้ดินที่บดอัดแน่นขึ้นรวมถึงมีโครงสร้างที่แข็งแรงเนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น สามารถควบคุมและลดการแตกร้าวได้

จากการศึกษาของ Sherard et. al. (1977) พบว่า การใช้ Sand Filter ซึ่งมีส่วนของ Fine Sand ขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 40 อยู่ด้วย จะสามารถป้องกัน Piping ได้ โดยจะช่วยอุดรู (Seal) และควบคุมการรั่วที่เกิดขึ้น Filter จะไม่สามารถปิดกั้นอนุภาคดินเหนียวเม็ดเล็ก ๆ ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ แต่อนุภาคของ Silt ซึ่งถูกพามาด้วยน้ำจะไม่สามารถผ่านเข้าไปใน Sand Filter ได้ จะยังคงอยู่ใน Leakage Channel ส่วนบนของ Filter แล้วย่อย ๆ อุดรูรั่ว

อร่ามศรี และสมบุญ (2534) ได้ทำการศึกษาวิจัยและทดลองใช้วัสดุสังเคราะห์ประเภทจีโอเทกซ์ไทล์ขนาด Pore Size ต่าง ๆ กันเป็นวัสดุกรองในเขื่อนดินที่ใช้ดินกระจายตัวในการก่อสร้างเพื่อหาวิธีป้องกันการเกิดหลุมยุบ (Sink Hole) ภายในเขื่อนดิน โดยการบดอัดดินกระจายตัวในแบบเล็ก ๆ ที่ความแน่นและความชื้นตามมาตรฐานวิศวกรรม แล้วเจาะรูขนาดเล็ก ๆ ปลดปล่อยน้ำไหลผ่านที่เสดต่าง ๆ กันตามที่กำหนด และใช้แผ่นจีโอเทกซ์ไทล์เป็นชั้นกรองก่อนปล่อยน้ำออกมา พบว่า

ในช่วงระยะเวลาแรก ๆ ที่ผ่านน้ำเข้าไป น้ำที่ไหลผ่านออกมามีลักษณะขุ่น เป็นตะกอนแขวนลอย ต่อมาน้ำจะค่อย ๆ ใสขึ้น ๆ จนในที่สุดใสสะอาด ไม่มีอนุภาคของดินถูกกัดเซาะออกมาด้วย ขณะเดียวกันได้บันทึกอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านออกมาด้วย พบว่า อัตราการไหลของน้ำในระยะแรก ๆ ค่อนข้างเร็ว และจะค่อย ๆ ช้าลง ๆ จนในที่สุดอัตราการไหลของน้ำค่อนข้างคงที่ และจะเป็นเช่นนี้ ตลอดเวลา เมื่อสิ้นสุดการทดลองได้นำตัวอย่างดินที่บดอัดไว้ในแบบมาผ่าดู พบว่า อนุภาคดินส่วนหนึ่งสะสมอยู่ในรูที่เจาะไว้ และส่วนหนึ่งสะสมอยู่ที่ผิวของแผ่นจีโอเท็กซ์ไทล์ซึ่งใช้เป็นวัสดุรองดิน กระจายตัวไม่ให้ไหลออกไปกับน้ำได้ จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สามารถใช้แผ่นจีโอเท็กซ์ไทล์เป็น วัสดุรองสำหรับเขื่อนดินที่ก่อสร้างขึ้นโดยใช้ดินที่มีการกระจายตัวสูง ซึ่งจะทำให้การพัดพาอนุภาค ดินเหนียวออกไปจากเขื่อนดินเกิดขึ้นน้อยลง และยังช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรูโพรงในเขื่อนดินได้อีกด้วย ถ้าก่อสร้างอย่างถูกวิธี

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

1.1 ตัวอย่างดินกระจายตัวได้จากการสุ่มเก็บโดยใช้ส่วนมือ บริเวณขอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ในตำแหน่งที่ใกล้กับผิวน้ำมากที่สุดในแนวราบ และทำการเจาะสำรวจในแนวตั้งให้ลึกที่สุดเท่าที่จะสามารถเจาะได้ เพื่อเป็นตัวแทนของดินตามธรรมชาติในบริเวณนั้น ๆ ได้แก่

- 1.1.1 อ่างเก็บน้ำอุครธานีเหนือและใต้ รวมทั้งกองดินถมที่อยู่ข้างอ่าง
- 1.1.2 อ่างเก็บน้ำกาฬสินธุ์และอ่างเก็บน้ำขุดใหม่ที่อยู่ในบริเวณข้างเคียง
- 1.1.3 อ่างเก็บน้ำมุกดาหาร
- 1.1.4 อ่างเก็บน้ำสกลนคร
- 1.1.5 อ่างเก็บน้ำนครพนม
- 1.1.6 อ่างเก็บน้ำหนองคาย

1.2 ปูนขาวที่ใช้เป็นปูนไฮม์ (Hydrated Lime) ชนิดผงละเอียดแห้ง ที่มีคุณสมบัติและส่วนประกอบทางเคมีถูกต้องตามมาตรฐาน มอก. 241-2520 หรือมาตรฐาน ASTM C-25 โดยมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะใช้ในการทดสอบ ดังนี้

- 1.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว
- 1.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรง
- 1.2.3 การทดสอบความซึมผ่านของน้ำ
- 1.2.4 การปรับปรุงคุณภาพดินกระจายตัวโดยวิธีทางเคมี

1.3 วัสดุใยสังเคราะห์ที่ใช้เป็นจีโอเทกไทล์ ที เอส 50 ของบริษัทโพลีเฟลท์ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งมีขนาดรูเปิดประสิทธิผล (Effective Opening Size) เท่ากับ 0.10 มม. สำหรับทำหน้าที่เป็นตัวกรอง (Filters) อนุภาคของดินเหนียวที่ถูกพัดพามากับน้ำในการทดสอบ ดังนี้

- 1.3.1 การทดสอบความซึมผ่านของน้ำ
- 1.3.2 การศึกษาความเป็นไปได้ของการควบคุมคุณภาพการบดอัดดินร่วมกับการใช้วัสดุใยสังเคราะห์ เพื่อป้องกันการกัดเซาะที่ผิวน้ำของดิน

1.4 Sodium hexametaphosphate (Calgon) 40 กรัมต่อลิตร สำหรับการทดสอบ Standard Hydrometer Test สารละลายของเกลือชนิดนี้ ถ้าเป็นกรดจะค่อย ๆ เปลี่ยนกลับหรือ Hydrolyze back ไปเป็น Orthophosphate form ซึ่งจะช่วยลดการกระจายตัวของดิน

1.5 สารละลาย NaOAc (pH ประมาณ 8.2) สารละลาย NH₄OAc (pH ประมาณ 7.0) และ เอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน

1.6 สารละลาย NH₄OAc (pH ประมาณ 7.0) สำหรับหาเปอร์เซ็นต์โซเดียมในดินที่แลกเปลี่ยนได้ และ Extractable ของประจุบวกในดิน ซึ่งประกอบด้วยโซเดียม โปแตสเซียม แคลเซียม และ แมกนีเซียม

1.7 น้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่ปราศจากไอออน

2. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

2.1 อุปกรณ์ทดสอบการกระจายตัวของดิน

2.2 อุปกรณ์ทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน

2.3 อุปกรณ์ทดสอบสถานภาพของดิน

2.4 อุปกรณ์วัดความลาดเอียงของพื้นที่

2.5 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

2.6 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรง

2.7 เครื่องมือทดสอบความซึมผ่านของน้ำแบบใช้แรงดันเข้าช่วย

2.8 เครื่องปั่นดินไฟฟ้า (Stirring Apparatus) ซึ่งมีมอเตอร์หมุนแกนปั่นด้วยความเร็วไม่น้อยกว่า 10,000 รอบต่อนาที

2.9 เครื่องชั่งละเอียด ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม

2.10 ตู้อบปรับอุณหภูมิได้ถึง 110 องศาเซลเซียส

2.11 เครื่องวัดความขุ่นของน้ำ (Turbidimeter) แบบ Nephelometry วัดได้ละเอียดถึง 0.01

NTU

2.12 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด่างของน้ำ (pH meter) วัดได้ละเอียดถึง 0.01

2.13 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity meter) รุ่น TOA CM-20E วัดได้ละเอียดถึง 0.01 ds/m. (mmhos/cm)

2.14 เครื่องเขย่า (Shaker) และเครื่องเหวี่ยง (Centrifuge)

2.15 เครื่อง Flame Photometer รุ่น CORNING 410 สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณ โซเดียม และ โปแตสเซียมในดิน

วิธีการ

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ขั้นแรก เริ่มจากการสำรวจภาคสนาม เพื่อประเมินระดับการกระจายตัวและแบ่งพื้นที่ย่อย ๆ สำหรับการศึกษาวิจัยในเบื้องต้น รวมทั้งจะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินเพื่อทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานและจำแนกชนิดของดิน ขั้นที่สอง เป็นการทดสอบความสามารถในการกระจายตัวของดิน (Soil Dispersivity) โดยการทดสอบทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกดินกระจายตัว รวมทั้งจัดโซนดินกระจายตัวภายในวิทยาเขต ในขั้นตอนนี้จะได้มีการสำรวจภาคสนามขั้นรายละเอียด (Detailed Investigation) และทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของดินกระจายตัว ขั้นสุดท้าย เป็นการหาแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมที่สุด สำหรับดินที่มีระดับของการกระจายตัวต่าง ๆ กัน โดยอาศัยแนวความคิดของการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี (Chemical Modification) และการควบคุมคุณภาพการบดอัดดิน (Compaction Control) ร่วมกับการป้องกันการกัดเซาะลาดดิน (Soil Erosion Control) สำหรับขั้นตอนการดำเนินการวิจัยตลอดโครงการ โดยสังเขป แสดงดังภาพที่ 24

ในที่นี้จะขอแบ่งพื้นที่ในวิทยาเขตออกเป็น 6 พื้นที่ย่อย ๆ โดยยึดเอาพื้นที่บริเวณอ่างเก็บน้ำซึ่งพบการกัดเซาะมากกว่าในบริเวณอื่น ๆ เป็นหลัก เพื่อให้สะดวกและง่ายต่อการอ้างอิงถึง ดังนี้

พื้นที่ 1 พื้นที่อุดรธานี ประกอบด้วยอ่างอุดรธานีเหนือและใต้ กองดินถมข้างอ่าง ถนนและพื้นที่ใกล้เคียง

พื้นที่ 2 พื้นที่กาฬสินธุ์ ประกอบด้วยอ่างกาฬสินธุ์เดิม อ่างกาฬสินธุ์ได้ที่ขุดใหม่ ถนนและพื้นที่ใกล้เคียง

พื้นที่ 3 พื้นที่มุกดาหาร ประกอบด้วยอ่างมุกดาหาร ถนนและพื้นที่ใกล้เคียง

พื้นที่ 4 พื้นที่สกลนคร ประกอบด้วยอ่างสกลนคร และพื้นที่ใกล้เคียง

พื้นที่ 5 พื้นที่นครพนม ประกอบด้วยอ่างนครพนม และพื้นที่ใกล้เคียง

พื้นที่ 6 พื้นที่หนองคาย ประกอบด้วยอ่างหนองคาย และพื้นที่ใกล้เคียง

สำหรับรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย สรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การสำรวจภาคสนามเบื้องต้นและผลการทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดิน

1. สำรวจภาคสนามในเบื้องต้น (Preliminary Investigation) เพื่อสำรวจการกัดเซาะ โดยรอบอ่างเก็บน้ำและดินคันทางของถนน ประเมินแนวโน้มการเป็นดินกระจายตัวในบริเวณต่าง ๆ รวมทั้งกำหนดตำแหน่งสำหรับเจาะสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยในเบื้องต้นจะดำเนินการ ดังต่อไปนี้

1.1 เปรียบเทียบสีของน้ำในแต่ละอ่างด้วยสายตา และวัดความขุ่นของน้ำโดยใช้เครื่องวัดความขุ่น

1.2 สำรวจการกัดเซาะโดยรอบอ่างเก็บน้ำและดินคันทางของถนน โดยใช้เทปวัดระยะ โดยเฉพาะตำแหน่งที่เกิดการกัดเซาะถี่และมีขนาดใหญ่

1.3 ทดสอบการกระจายตัวของดินในเบื้องต้น โดยวิธี Crumb Test และเก็บตัวอย่างดินส่วนหนึ่งสำหรับทดสอบเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการ

1.4 ประเมินแนวโน้มของดินกระจายตัวบริเวณต่าง ๆ ในภาพรวม

1.5 กำหนดตำแหน่งสำหรับเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดิน โดยใช้ส่วนมือ บนแผนที่วิทยาเขต และทำหมุดในสนาม

2. เจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยสุ่มเก็บตัวอย่างโดยใช้ส่วนมือ บริเวณขอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ในตำแหน่งที่ใกล้กับผิวน้ำมากที่สุดในแนวราบ และทำการเจาะสำรวจในแนวตั้งให้ลึกที่สุดเท่าที่จะสามารถเจาะได้ เพื่อเป็นตัวแทนของดินตามธรรมชาติในบริเวณนั้น ๆ สำหรับศึกษาคุณสมบัติขั้นพื้นฐาน (Basic Properties) และคุณสมบัติการกระจายตัวของดิน (Dispersivity Properties) ดังนี้

2.1 คุณสมบัติขั้นพื้นฐาน ได้แก่ การทดสอบหาสถานภาพของมวลดิน (Atterberg's limits) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity) และการทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน (Grained Size Distribution) เพื่อจำแนกดินทางวิศวกรรมในระบบ USCS

ขั้นตอนที่ 2 ขอบเขตของดินกระจายตัวในวิทยาเขตจากผลการจำแนกดินกระจายตัวในห้องปฏิบัติการ และการสำรวจภาคสนามขั้นรายละเอียด

2.2 คุณสมบัติการกระจายตัวของดิน แบ่งเป็นการทดสอบโดยวิธีทางกายภาพและการทดสอบโดยวิธีทางเคมี การทดสอบแบบแรก ได้แก่ การทดสอบ Double Hydrometer Test การทดสอบ Pinhole Test และการทดสอบ Crumb Test ส่วนการทดสอบแบบหลัง ได้แก่ การหาปริมาณเกลือละลายทั้งหมด (Total Dissolved Salts, TDS) และเปอร์เซ็นต์โซเดียมในดิน (Sodium Percentage) การหาอัตราการดูดซับโซเดียมในดิน (Sodium Adsorption Ratio, SAR) การหาเปอร์เซ็นต์โซเดียมในดินที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Sodium Percentage, ESP) และการหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (Cation Exchange Capacity, CEC) โดยการทดสอบแบบหลังนี้ จะเลือกทดสอบเฉพาะในบางตัวอย่างเท่านั้นเมื่อผลการทดสอบแบบแรกไม่ชัดเจน

3. สำรวจภาคสนามขั้นรายละเอียด (Detailed Investigation) สำหรับงานสนามในขั้นตอนนี้ จะทำการวัดความลาดชันตามขอบอ่างเก็บน้ำ หากความแน่นของดินบริเวณขอบอ่าง และวัดระดับการกัดเซาะเฉพาะการกัดเซาะที่เป็นร่องน้ำแบบลึก (ความถี่ของการเกิดร่องน้ำแบบลึก, ความกว้างและความลึกของร่องน้ำแบบลึก และปริมาณของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ) เท่านั้น รวมทั้งหากความลึกของอ่างเก็บน้ำทุก ๆ อ่าง และวัดค่าความชุ่มชื้นของน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับวางแผนแก้ปัญหาดินกระจายตัวในขั้นตอนที่ 3 ต่อไป จากคุณสมบัติขั้นพื้นฐานและคุณสมบัติการกระจายตัวของดิน รวมทั้งการสำรวจภาคสนามขั้นรายละเอียด จะทำให้สามารถหาขอบเขต (Zoning) ของดินกระจายตัวในวิทยาเขตได้อย่างถูกต้อง

4. ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินกระจายตัวเปรียบเทียบกับดินไม่กระจายตัว โดยการสุ่มเลือกตัวอย่างดินบริเวณอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ เพื่อหาตัวแทนของดินที่กระจายตัวและดินที่ไม่กระจายตัว เพื่อนำมาใช้ทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังและความซึมผ่านของน้ำ ดังนี้

4.1 ทดสอบคุณสมบัติด้านการบดอัดดินระหว่างดินกระจายตัวกับดินไม่กระจายตัว เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมระหว่างดินกับปูนขาวในแบบมาตรฐาน สำหรับทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรงและการทดสอบความชื้นน้ำ และแบบขนาดเล็กสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

4.2 ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) โดยผสมดินกับปูนขาวที่ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 10 วัน โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดทุก ๆ 2 วัน เปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้ผสมปูนขาว ตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดสอบที่อายุการบ่มและปริมาณปูนขาวหนึ่ง ๆ จะใช้อย่างน้อย 3 ตัวอย่างทดสอบขึ้นไป

4.3 ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) โดยผสมดินกับปูนขาวที่ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 10 วัน โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทุก ๆ 2 วัน เปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้ผสมปูนขาว เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เพียงแต่จะใช้ตัวอย่างทดสอบที่อายุการบ่มและปริมาณปูนขาวหนึ่ง ๆ เพียงตัวอย่างเดียวเท่านั้น ต่อหน่วยแรงกดที่กระทำตั้งฉากกับตัวอย่างดินอย่างน้อย 3 หน่วยแรง

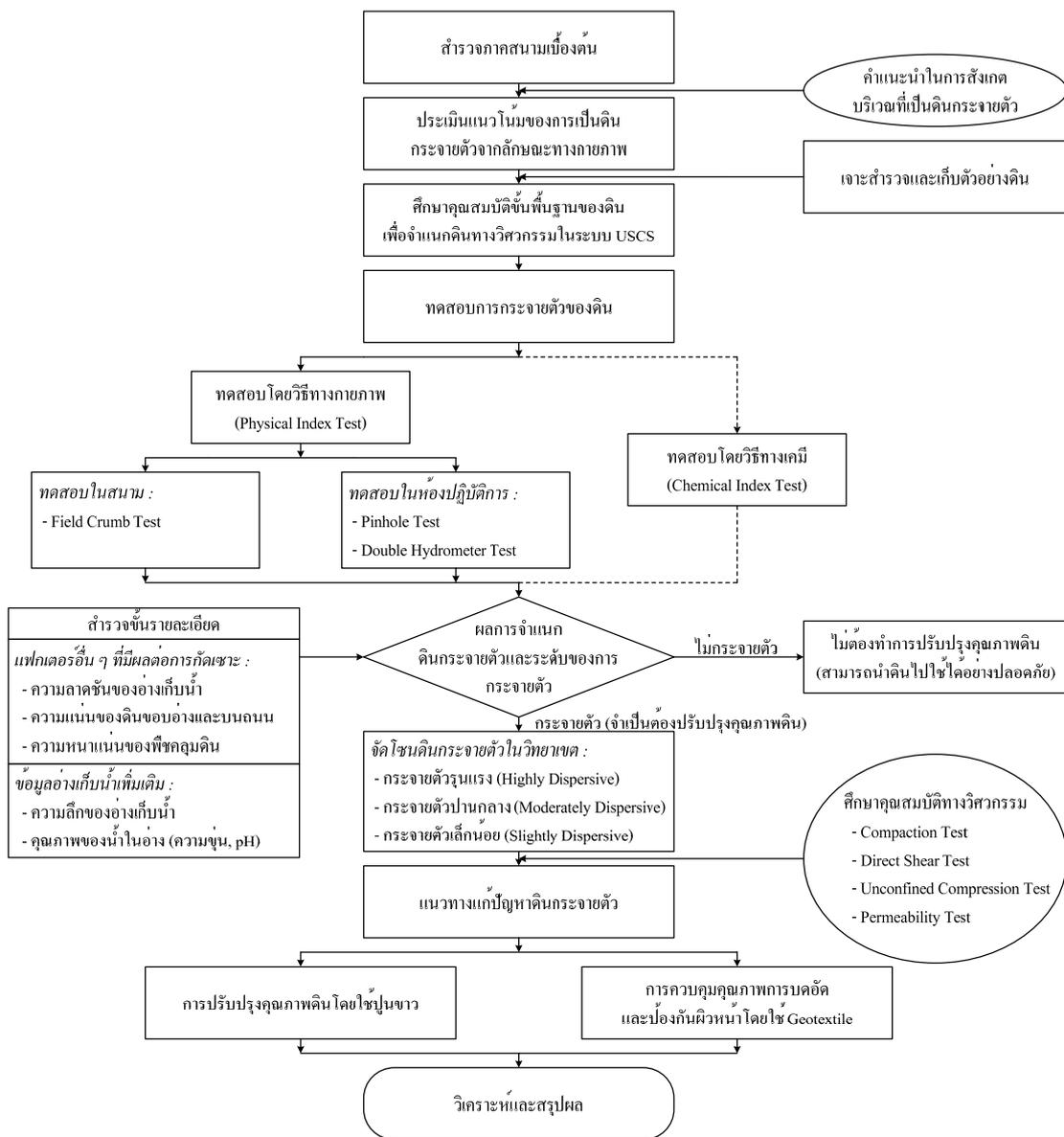
4.4 ทดสอบความซึมน้ำของดิน (Hydraulic Conductivity) โดยบดอัดดินผสมปูนขาวที่ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง ลงในแบบมาตรฐาน แล้วปล่อยให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำเป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบแบบความดันคงที่โดยใช้แรงดันเข้าช่วย (Constant Pressure Head) เพื่อลดเวลาในการทดสอบลง เปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้ผสมปูนขาว ในที่นี้จะหาสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำรวมทั้งวัดความชุ่มของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินออกมา เป็นจำนวน 10 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่างทดสอบ สำหรับดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัว

ขั้นตอนที่ 3 แนวทางแก้ปัญหาการกระจายตัวของดินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

5. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดินผสมปูนขาวที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง เปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้ผสมปูนขาว ซึ่งจะช่วยให้ทราบคุณสมบัติของดินทั้งก่อนและหลังผสมปูนขาว เพื่อกำหนดอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างดินกับปูนขาวที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพให้ดินไม่เกิดกระจายตัว และยังคงรักษาคุณสมบัติที่ดีด้านอื่น ๆ เอาไว้ การทดสอบทางเคมีที่ใช้ในขั้นตอนนี้ ประกอบด้วยอัตราการดูดซับโซเดียมในดิน เปอร์เซ็นต์โซเดียมในดินที่แลกเปลี่ยนได้ และความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน

6. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุสังเคราะห์ประเภทจีโอเท็กซ์ไทล์ สำหรับทำหน้าที่เป็นวัสดุกรอง (Filters) โดยทำการบดอัดดินลงในแบบของ Pinhole Test ให้มีความแน่นใกล้เคียงกับสภาพในสนาม (Lower bound) และในห้องปฏิบัติการ (Upper bound) โดยใช้วัสดุกรองสำหรับกรองตะกอนของดินที่จะไหลออกมากับน้ำ จำนวน 1 ชั้น และ 3 ชั้น เปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีวัสดุกรอง ผลการ

ทดสอบจะพิจารณาจากอัตราการไหลและความชุ่มของน้ำที่ไหลออกมาระหว่างดินกระจายตัวกับดินไม่กระจายตัว เมื่อบดอัดโดยใช้ปริมาณน้ำแตกต่างกัน แต่ใช้เฮดในการทดสอบเท่ากันในทุก ๆ ตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 24 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยตลอดโครงการ

สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

สถานที่ทำการวิจัยและเก็บข้อมูล

ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และห้องปฏิบัติการวิเคราะห์วัสดุ
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

ห้องปฏิบัติการกลุ่มงานดินด้านวิทยาศาสตร์ สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน จังหวัด
นนทบุรี

ระยะเวลาที่ใช้ในการทำวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาวิจัยตั้งแต่สำรวจภาคสนามครั้งแรกที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ประมาณราวเดือนธันวาคม พ.ศ. 2548 จนถึงเดือนมีนาคม
พ.ศ. 2551 รวมระยะเวลาทั้งสิ้นประมาณ 2 ปี 4 เดือน

ผลและวิจารณ์

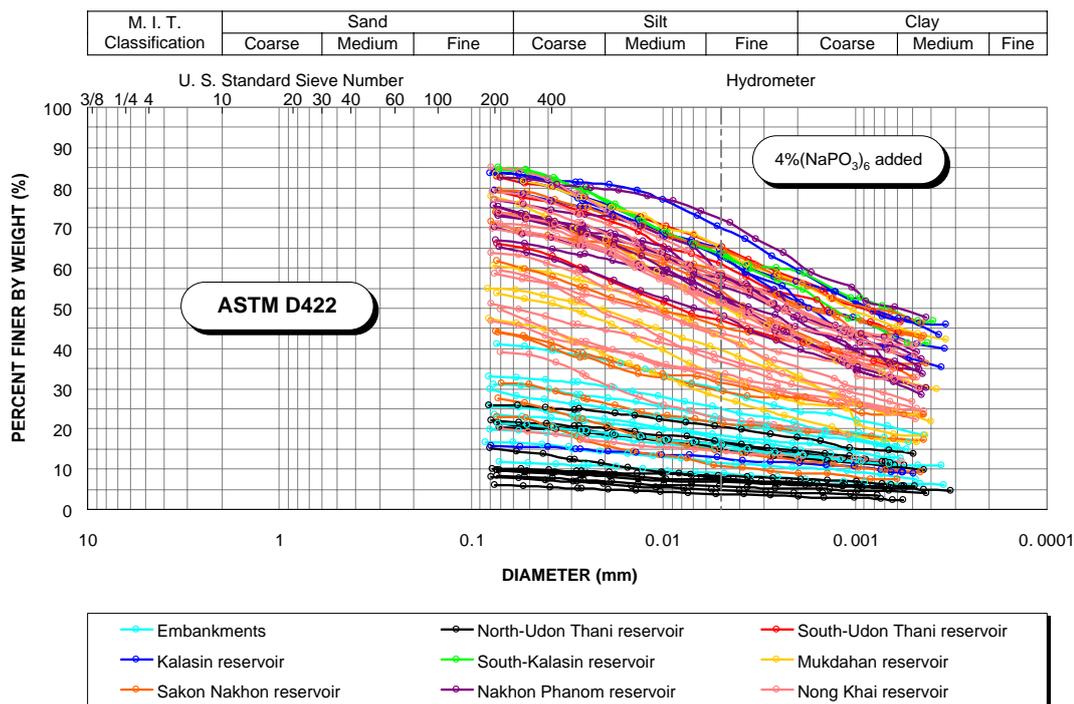
ผลทดสอบการกระจายตัวของดิน

1. ผลทดสอบการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Double Hydrometer Test (DHT)

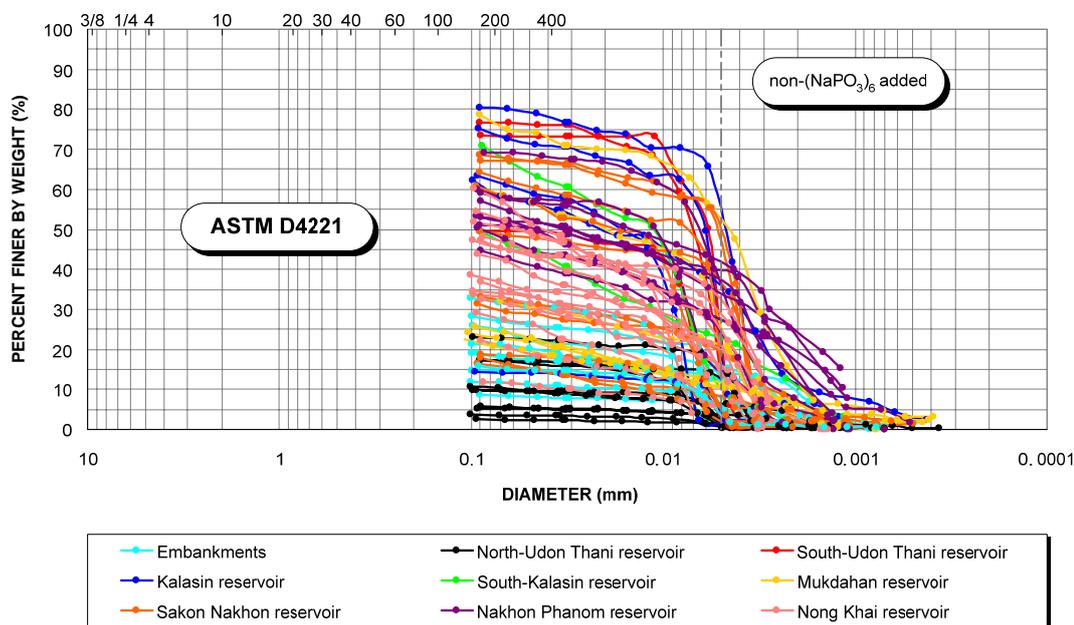
ผลการทดสอบหาขนาดของเม็ดดินโดยวิธี Standard Hydrometer Test (ASTM D422) แยก รายอ่างเก็บน้ำ แสดงดังภาพที่ 25(ก) กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดงให้เห็นว่า อ่างเก็บน้ำ แต่ละอ่างมีการกระจายตัวที่แตกต่างกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า ตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มม.) อยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 6 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึงประมาณ 85 เปอร์เซ็นต์ ที่น่าสังเกตคือ กองดินถมข้างอ่างอุตราธานีเหนือและใต้ซึ่งยังไม่รู้ว่าเป็นดินที่ได้จากการขุดอ่างใด เมื่อ พิจารณาจากการกระจายขนาดของเม็ดดินแล้วพบว่า ขนาดเม็ดดินอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน คืออยู่ ระหว่าง 6 ถึง 41 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความลึกของชั้นดินที่เก็บจากสนาม ส่วนใหญ่จำแนกเป็น ดินทรายปนดินเหนียว (SC) ส่วนอ่างมุกดาหาร อ่างกาฬสินธุ์ และอ่างกาฬสินธุ์ใต้ จะมีเปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. สูงมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนใหญ่จำแนกเป็น ดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง (CH) สำหรับอ่างสกลนครมีการกระจายขนาดของเม็ดดินอยู่ในช่วง กว้างที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอ่างเก็บน้ำอื่น ๆ และดินบริเวณนี้มีความหลากหลาย จำแนกได้เป็นทั้ง ดินทรายปนดินเหนียวและดินเหนียวที่มีความเหนียวสูงในสัดส่วนเท่า ๆ กัน

ภาพที่ 26 แสดงวิธีการหาระดับการกระจายตัวของดิน (Degree of Dispersion, DDS) จาก การทดสอบ Double Hydrometer Test (ASTM D4221) โดยเปรียบเทียบสัดส่วนอนุภาคดินเหนียวที่มี ขนาดตั้งแต่ 0.005 มม. ลงไป กับอนุภาคดินเหนียวขนาดเดียวกันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ ซึ่งเติมสาร Dispersing Agent ลงไปด้วย สำหรับระดับการกระจายตัวของดินเริ่มต้นบริเวณอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 27

ผลการทดสอบ Double Hydrometer Test แยกตามระดับการกระจายตัวและเปอร์เซ็นต์ของ ดินเหนียว แสดงดังตารางที่ 4 ผลการทดสอบพบว่า 44 ใน 71 ตัวอย่าง จำแนกเป็นดินกระจายตัว ใน จำนวนนี้มีอยู่ 7 ตัวอย่าง ที่มีเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวน้อยกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ แล้วจำแนกเป็นดิน กระจายตัว ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการจำแนกดินในระบบ USCS ของทั้ง 7 ตัวอย่าง พบว่า 6 ใน 7 ตัวอย่าง เป็นดินทรายปนดินเหนียว ที่เหลืออีก 1 ตัวอย่าง จำแนกเป็นดินที่มีอักษรคู่ คือ SP-SC ซึ่งไม่ น่าจะแสดงพฤติกรรมกระจายตัวได้

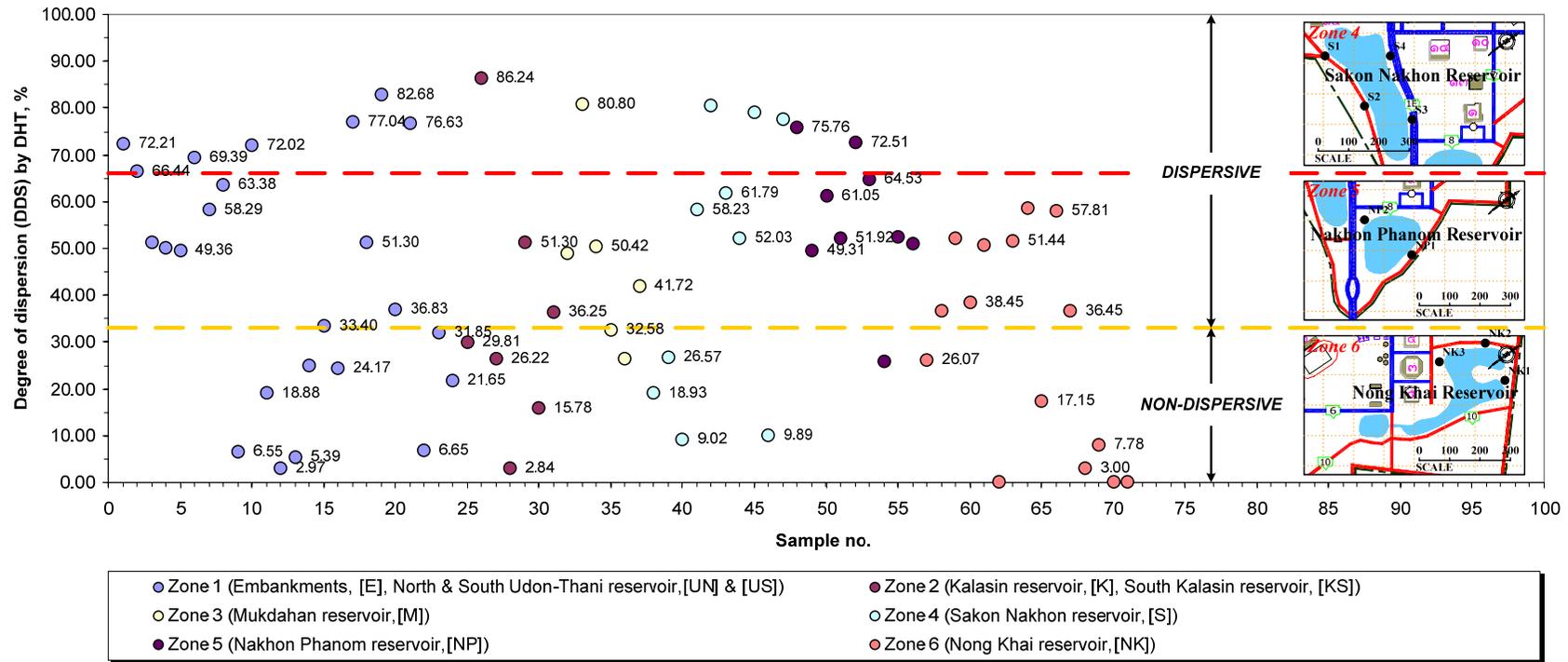


(ก) กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน (เติมสาร *Dispersing Agent*)



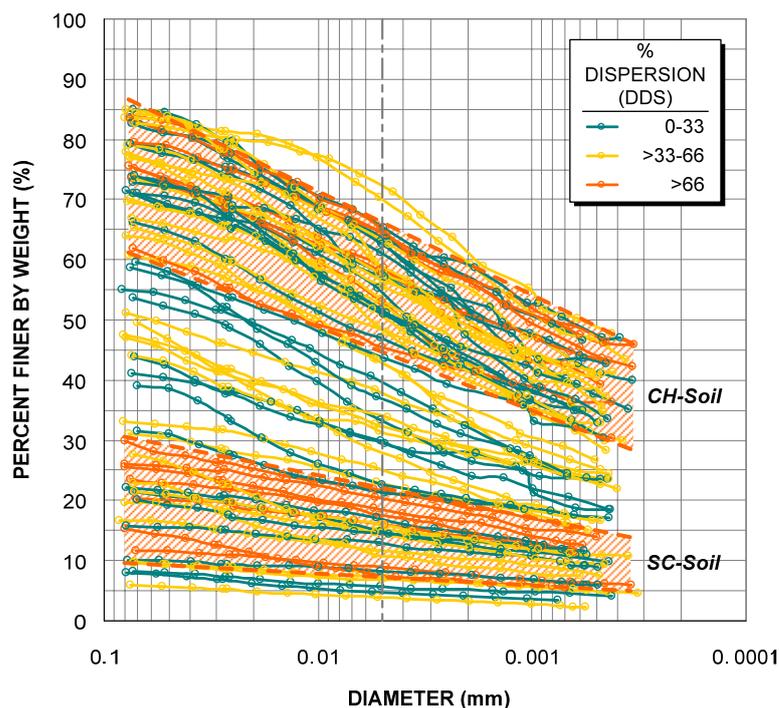
(ข) กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน (ไม่เติมสาร *Dispersing Agent*)

ภาพที่ 25 ผลการทดสอบ Double Hydrometer Test ตามมาตรฐาน ASTM D4221 บริเวณกองดินถม และรายอ่างเก็บน้ำ



ภาพที่ 27 บริเวณอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ (Zoning) ภายในวิทยาเขต ซึ่งแบ่งไว้เบื้องต้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงถึง และระดับการกระจายตัวเริ่มต้นของดินจากผลการทดสอบ

Double Hydrometer Test



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายขนาดของเม็ดดินกับระดับของการกระจายตัว จากการจำแนกโดยวิธี Double Hydrometer Test

ผลการทดสอบ Double Hydrometer Test แยกตามระดับการกระจายตัวของดินในรูปของกราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน (Gradation Curves) แสดงดังภาพที่ 28 และตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของเม็ดดิน เฉพาะตัวอย่างที่มีการกระจายตัวรุนแรง (DDS มากกว่า 66 เปอร์เซ็นต์) พบว่า บริเวณอ่างอุธรธานีเหนือและกองดินถมข้างอ่างนี้เท่านั้น ที่จำแนกดินทางวิศวกรรมในระบบ USCS แล้ว ได้เป็นดินทรายปนดินเหนียว ในขณะที่บริเวณอ่างเก็บน้ำอื่น ๆ จำแนกได้เป็นดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง ในภาพที่ 28 จึงแบ่งพื้นที่แรงเสียดทานสำหรับดินที่มีระดับการกระจายตัวรุนแรงออกเป็น 2 ส่วน คือ ดินกระจายตัวรุนแรงที่เป็นดินทรายปนดินเหนียว (SC-Soil) กับดินกระจายตัวรุนแรงที่เป็นดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง (CH-Soil)

อย่างไรก็ตาม สำหรับดินที่มีระดับการกระจายตัวต่ำกว่า 66 เปอร์เซ็นต์ (ดินที่ไม่กระจายตัวและดินที่กระจายตัวปานกลาง) จะไม่สามารถแยกความแตกต่างโดยใช้การกระจายขนาดของเม็ดดินได้ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า Gradation Curve ของแต่ละตัวอย่างจะกระจายตัวอยู่ในช่วงกว้าง โดยไม่สามารถแบ่งส่วนพื้นที่ย่อย ๆ สำหรับดินที่ไม่กระจายตัวและดินที่กระจายตัวปานกลางได้

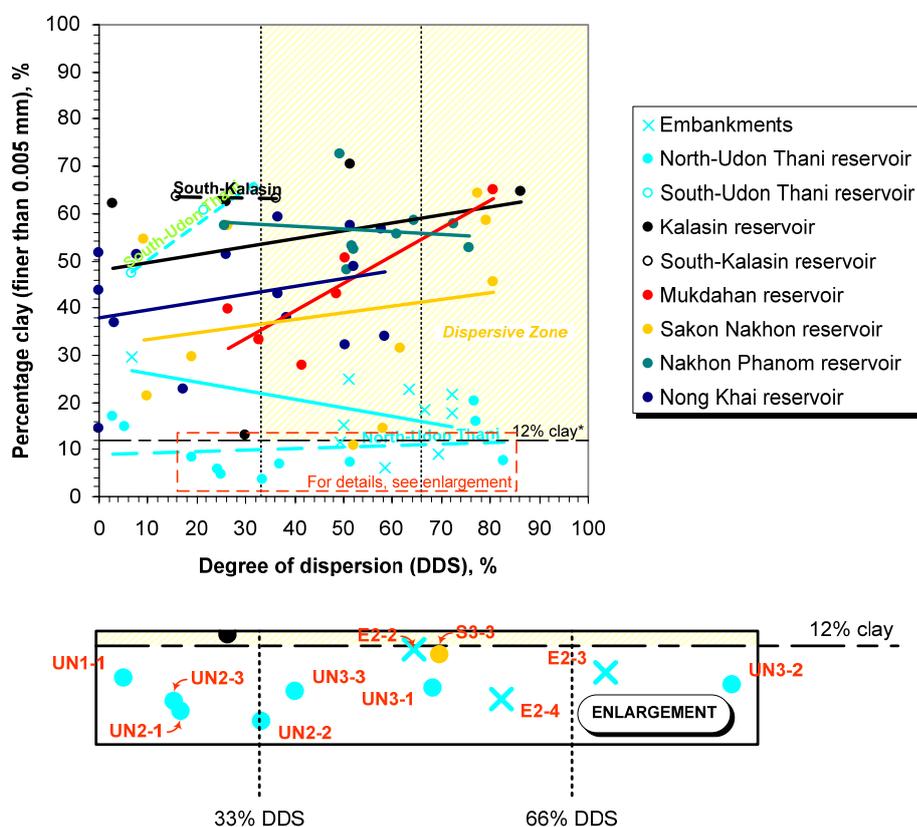
ตารางที่ 5 ระดับการกระจายตัวของดิน โดยการทดสอบ DHT เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของเม็ดดิน เฉพาะตัวอย่างที่มีการกระจายตัวรุนแรง

| อ่างเก็บน้ำ/ กองดินถม | สัญลักษณ์ ตัวอย่าง | ผลการจำแนกดิน ในระบบ USCS | เปอร์เซ็นต์ดินเหนียว ^{1/} | | เปอร์เซ็นต์การ กระจายตัว |
|--------------------------|-----------------------|------------------------------|--|---|-----------------------------|
| | | | ไม่เติมสาร (NaPO ₃) ₆ | เติมสาร (NaPO ₃) ₆ | |
| กองดินถม | E1-1 | SM | 15.63 | 21.64 | 72.21 |
| | E1-2 | SC | 12.18 | 18.33 | 66.44 |
| | E2-3 | SC | 6.25 | 9.00 | 69.39 |
| | E3-3 | SC | 12.68 | 17.60 | 72.02 |
| อุทธรานีเหนือ | UN2-4 | SC | 12.38 | 16.06 | 77.04 |
| | UN3-2 | SC | 6.30 | 7.62 | 82.68 |
| | UN3-4 | SC | 15.61 | 20.38 | 76.63 |
| ภาพสินธุ์ | K3-1 | CH | 55.59 | 64.46 | 86.24 |
| มุกดาหาร | M2-1 | CH | 52.62 | 65.12 | 80.80 |
| สกลนคร | S2-4 | CH | 36.56 | 45.44 | 80.46 |
| | S4-2 | CH | 46.38 | 58.66 | 79.07 |
| | S4-4 | CH | 50.00 | 64.41 | 77.63 |
| นครพนม | NP1-1 | CH | 40.00 | 52.80 | 75.76 |
| | NP1-5 | MH | 42.00 | 57.92 | 72.51 |

หมายเหตุ^{1/} เปอร์เซ็นต์ดินเหนียว คือ เม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.005 มม.

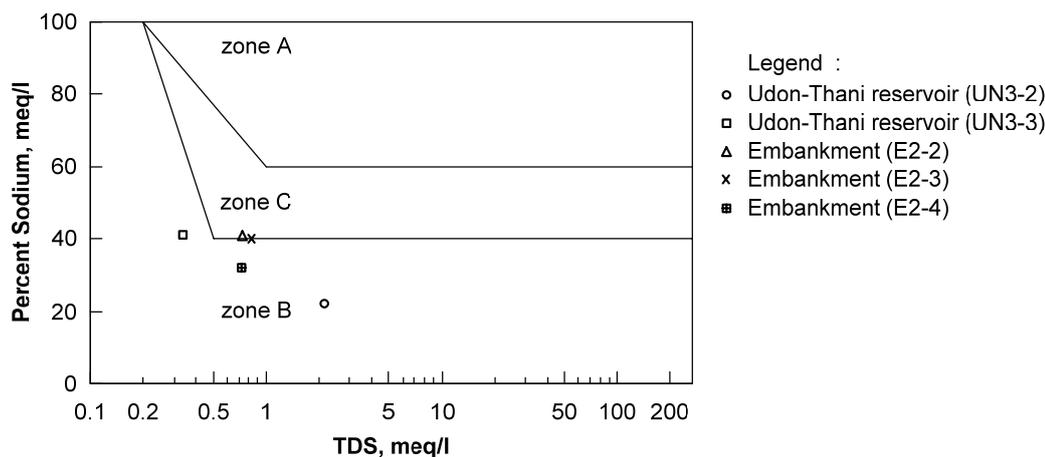
จากภาพที่ 29 แสดงให้เห็นว่า ระดับการกระจายตัวของดินบริเวณอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ โดยการทดสอบ DHT มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงกว้าง ตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 86.24 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาเป็นรายอ่างเก็บน้ำจะพบว่า บริเวณกองดินถม อ่างอุทธรานีเหนือ และอ่างมุกดาหาร มีระดับการกระจายตัวเฉลี่ยสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ และกระจุกตัวอยู่ในช่วงระดับการกระจายตัวสูง ๆ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียว (เม็ดดินขนาดเล็กกว่า 0.005 มม.) กับระดับการกระจายตัว พบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันโดยตรงที่น่าสนใจคือ เปอร์เซ็นต์ดินเหนียวที่น้อยกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ ไม่น่าจะทำให้เกิดการกระจายตัวของดิน เนื่องจากปริมาณดินเหนียวไม่มากพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ (อร่ามศรี, 2541) อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาจากระดับการกระจายตัวจะพบว่า มีอยู่ 7 ตัวอย่าง ที่ดินกระจายตัว โดย 2 ใน 7 เป็นดินที่กระจายตัวรุนแรง แม้ว่าจะมีเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวน้อยกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ ก็ตาม ดังนั้นจึงใช้การทดสอบทางเคมีช่วยจำแนกดินในกลุ่มนี้เพิ่มเติม ดังแสดงในภาพที่ 30

จากความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของโซเดียมในดินต่อปริมาณเกลือละลายทั้งหมด (Total Dissolved Salts, TDS) ของตัวอย่างดินอ่างอุทราธานีเหนือ และกองดินถม ในภาพที่ 30 แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างเพียง 2 ใน 5 เท่านั้น ที่มีแนวโน้มเป็นดินกระจายตัว (โซน C)



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียว (Percentage Clay) กับระดับการกระจายตัวของดิน บริเวณกองดินถมและรายอ่างเก็บน้ำ

สำหรับปริมาณดินที่เก็บได้จากสนามของตัวอย่างที่เหลืออีก 2 ตัวอย่าง (UN3-1 และ S3-3) มีไม่มากพอที่จะทดสอบหาเปอร์เซ็นต์โซเดียมในดินและปริมาณเกลือละลายทั้งหมดได้ ดังนั้นจึงใช้การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์โซเดียมในดินที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Sodium Percentage, ESP) แทน ซึ่งจะใช้ตัวอย่างดินในปริมาณที่ไม่มากนัก ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทั้ง 2 มีค่า ESP เป็น 2.90 และ 3.00 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า ไม่น่าจะเป็นดินกระจายตัว เพราะค่า ESP ต่ำกว่า 7 อย่างไรก็ตาม ควรมีการวิเคราะห์หลาย ๆ ด้านประกอบกันทั้งทางกายภาพและทางเคมี อย่างน้อย 3 ใน 5 การทดสอบที่ให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน (อร่ามศรี, 2541; Sherard et. al., 1977)



Note : Zone A : Dispersive
 Zone B : Nondispersive
 Zone C : Intermediat

$$\text{Percent Sodium (meq/l)} = \frac{\text{Na (100)}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}}$$

$$\text{TDS} = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}$$

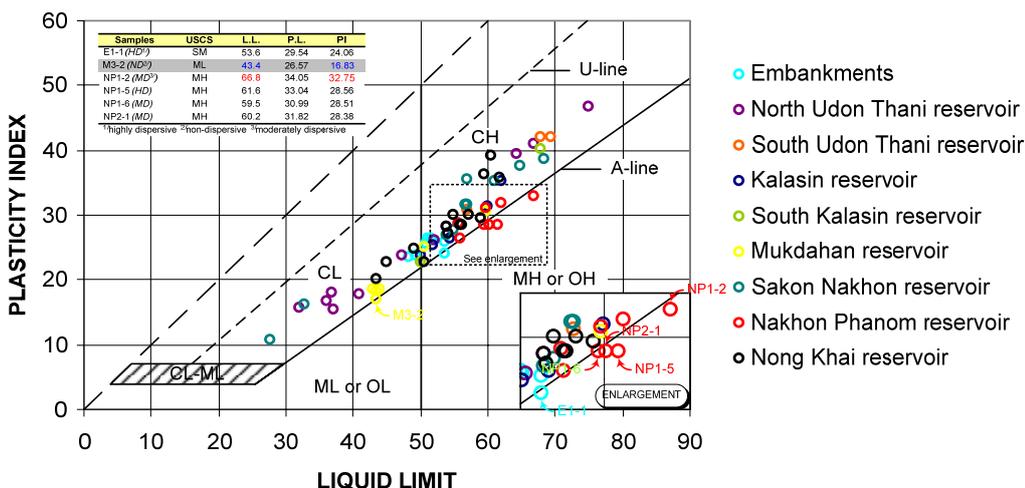
= Total Dissolved Salts

ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โซเดียมต่อปริมาณเกลือละลายทั้งหมดของตัวอย่างดิน
 อ่างอุรธานีเหนือ และกองดินถม (Sherard et. al., 1976)

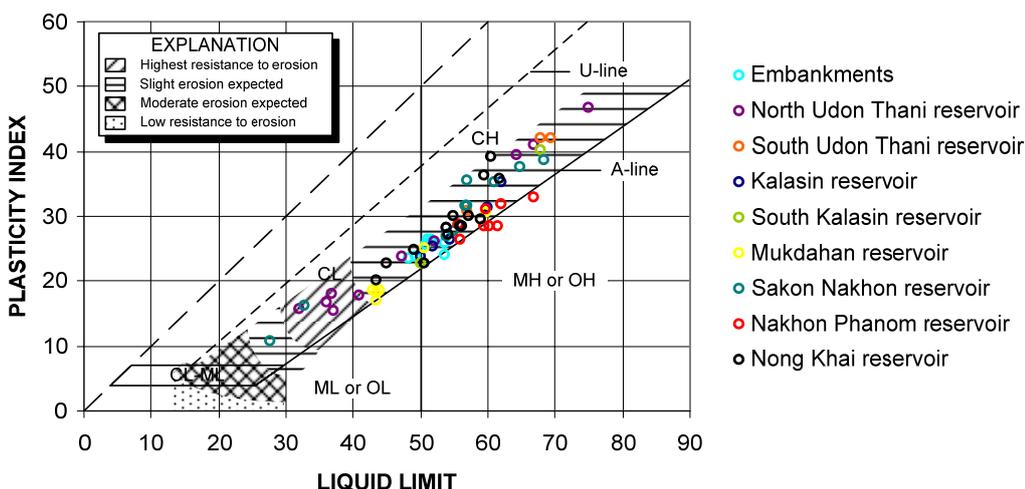
2. สถานภาพของดินโดยการทดสอบ Atterberg's limits

ผลการทดสอบ Atterberg's limits เมื่อพล็อตลงในแผนภูมิความเหนียวของดิน (Plasticity Chart) ในภาพที่ 31(ก) บ่งชี้ว่า ดินในเกือบทุกตัวอย่างพล็อตอยู่เหนือ A-line และส่วนใหญ่จะมีค่าพิคัดความเหลว (Liquid limit, L.L.) สูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ จึงเป็นดินที่มีความเหนียวสูง และมีค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity Index, PI) เฉลี่ยเท่ากับ 28.07 ดินส่วนใหญ่จำแนกเป็นดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง (CH) ซึ่งพบอยู่โดยทั่วไปในเกือบทุก ๆ อ่างเก็บน้ำ ยกเว้นอ่างอุรธานีเหนือและกองดินข้างอ่างเท่านั้น ที่จำแนกเป็นดินทรายปนดินเหนียว (SC) และดินที่มีอัครคู (SW-SC และ SP-SC) ส่วนดินเหนียวที่มีความเหนียวต่ำ (CL) และดินทรายปนดินตะกอนทราย (SM) พบอยู่บ้างในบางความลึกเท่านั้น

ภาพที่ 31(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อการกัดเซาะของดินกับ Atterberg's limits พบว่า ไม่ว่าดินจะกระจายตัวหรือไม่ก็ตาม ไม่สามารถแยกความแตกต่างโดยใช้ผลทดสอบจาก Atterberg's limits ได้ (Sherard et. al., 1976) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาพื้นที่เรเงา ซึ่งทำการศึกษาโดย Gibb and Holtz (1962) อ้างโดย Haliburton et. al. (1975) แสดงให้เห็นว่า ดินจะถูกกัดเซาะและมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการขยายตัว (Expansive Characteristics) เมื่อสัมผัสกับน้ำ



(ก) แผนภูมิความเหนียวของดินจากผลทดสอบ Atterberg's limits



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อการกัดเซาะของดินกับ Atterberg's limits

ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่าง Atterberg's limits กับความสามารถในการต้านทานต่อการกัดเซาะของดินบริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ (Gibb and Holtz, 1962)

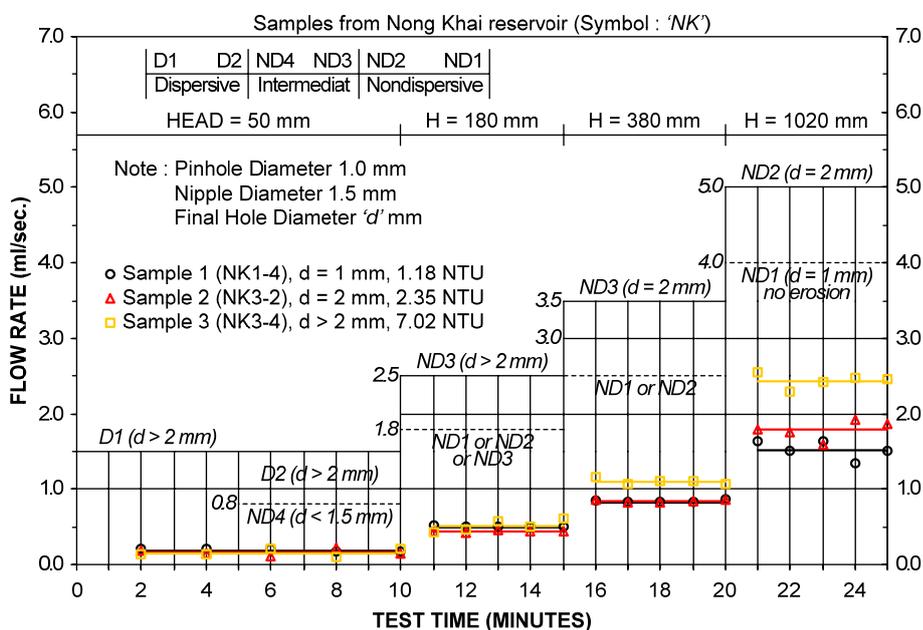
3. ผลทดสอบการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Pinhole Test

ภาพที่ 32(ก) ถึง 32(ข) แสดงผลการทดสอบ Pinhole Test ของตัวอย่างดินอย่างต่าง ๆ และบริเวณกองดินถม สำหรับตัวอย่างดินอ่างหนองคาย ตัวอย่างทดสอบแรกพบว่า อัตราการไหลของน้ำที่เสด 1020 มม. น้อยกว่า 4 มล. ต่อ วินาที ขนาดของรูเจาะหลังทดสอบมีขนาดเท่าเดิม (1 มม.) และ

น้ำที่ไหลออกมาใส จึงจำแนกเป็น ND1 สำหรับตัวอย่างที่ 2 และ 3 ถึงแม้ว่าอัตราการไหลจะต่ำกว่า 4 และ 1.8 มล. ต่อ วินาที ที่เฮด 1020 และ 180 มม. แต่เมื่อพิจารณาขนาดของรูเจาะหลังทดสอบพบว่า มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 2 และ 4 เท่าของรูเจาะเริ่มต้น ประกอบกับน้ำมีความขุ่นเพิ่มขึ้น (2.35 และ 7.02 NTU) ดังนั้นจึงจำแนกเป็น ND2 และ ND3 ตามลำดับ สำหรับอ่างเก็บน้ำอื่น ๆ ก็พิจารณาผลการ จำแนกดินกระจายตัวในลักษณะอย่างเดียวกัน

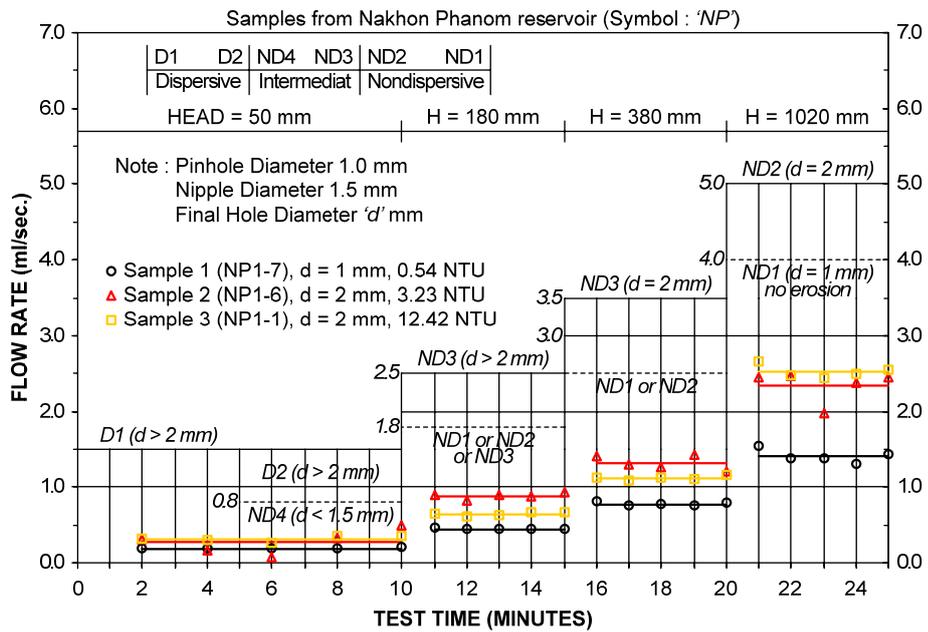
ภาพที่ 33 แสดงเครื่องมือทดสอบ Pinhole Test แบบมาตรฐานและตำแหน่งของตัวอย่างและ วัสดุอื่น ๆ ในแบบ ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นเองเพื่อใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้โดยเฉพาะ สำหรับภาพที่ 34 แสดง ตัวอย่างดินผ่านยาวและตัวอย่างน้ำหลังทดสอบที่เฮดของน้ำนั้น ๆ และเพื่อให้เห็นภาพของการกัด-เซาะได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ภาพที่ 35 แสดงขนาดรูเจาะหลังทดสอบประกอบผลการจำแนกดินกระจายตัว

ผลจากการทดสอบ Pinhole Test จำนวน 63 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับผลทดสอบ Double Hydrometer Test พบว่า ดินซึ่งได้รับการบดอัดแบบมาตรฐาน ตั้งแต่ 95 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป สามารถลด ปัญหาการกัดเซาะที่เกิดจากการกระจายตัวของดินลงได้ และจะให้ผลการทดสอบส่วนใหญ่เป็น ND1 (ไม่เกิดการกัดเซาะ) ดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7

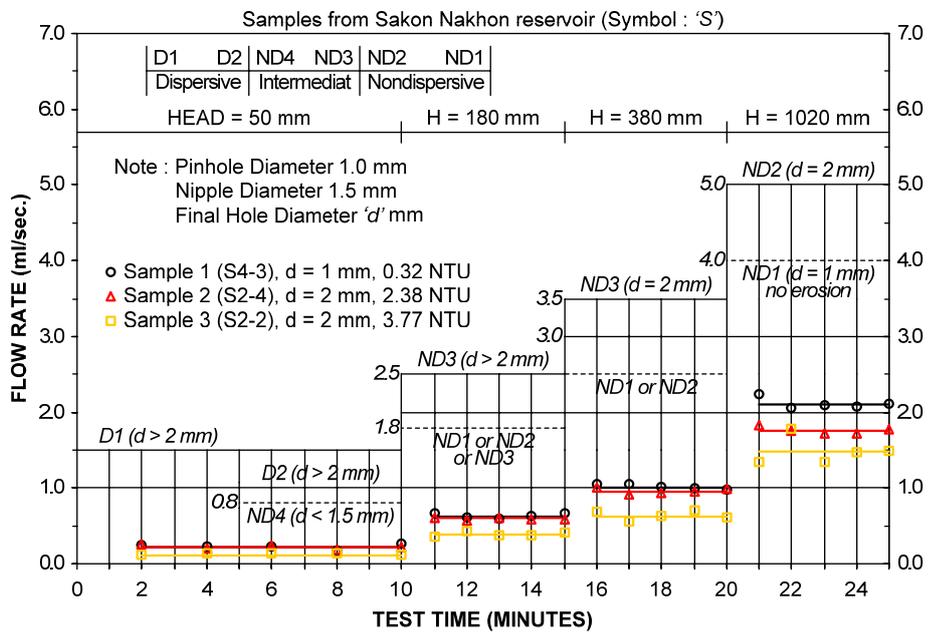


(ก) ผลทดสอบ Pinhole Test ของตัวอย่างดินอ่างหนองคาย

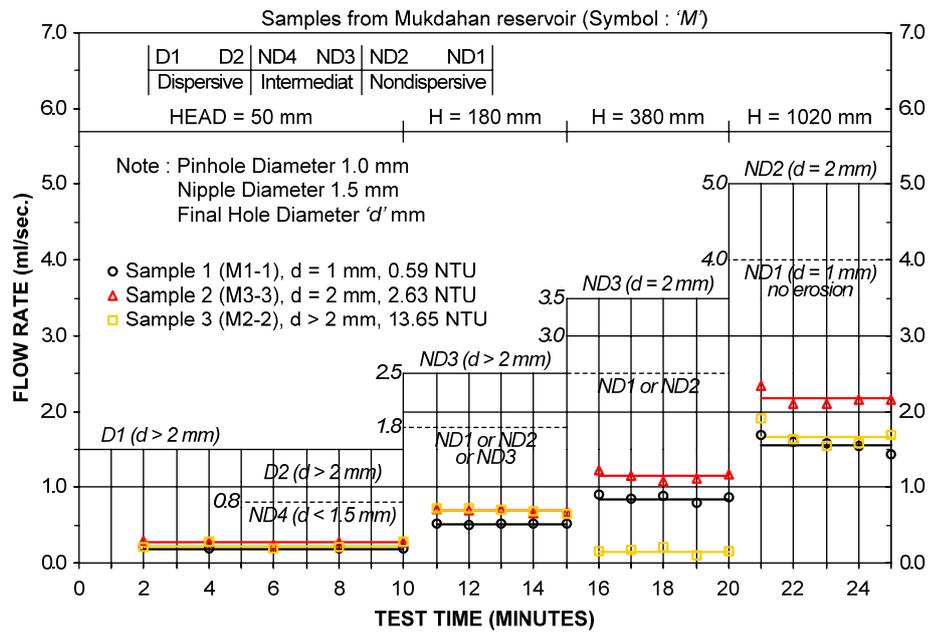
ภาพที่ 32 อัตราการไหลของน้ำผ่านรูเจาะดินขนาด 1 มม. จากการทดสอบ Pinhole Test ของ ตัวอย่างดินบริเวณกองดินถม และอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ



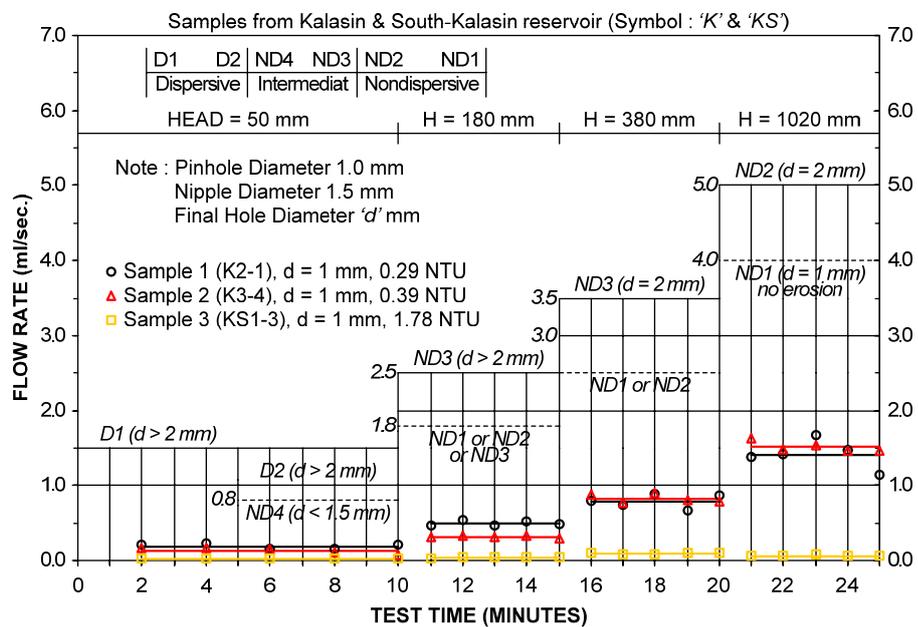
(ข) ผลทดสอบ Pinhole Test ของตัวอย่างคินอ่างนครพนม



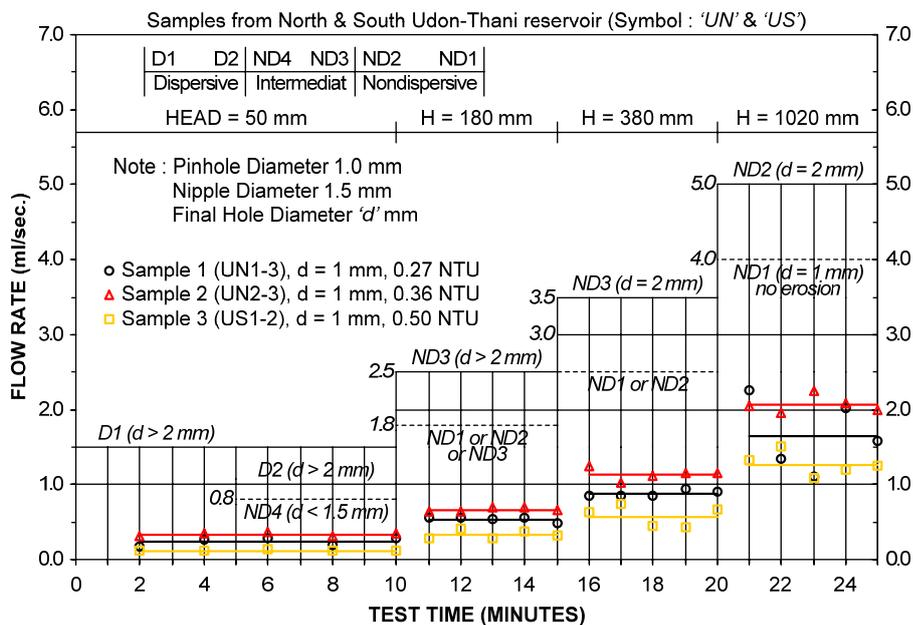
(ค) ผลทดสอบ Pinhole Test ของตัวอย่างคินอ่างสกลนคร



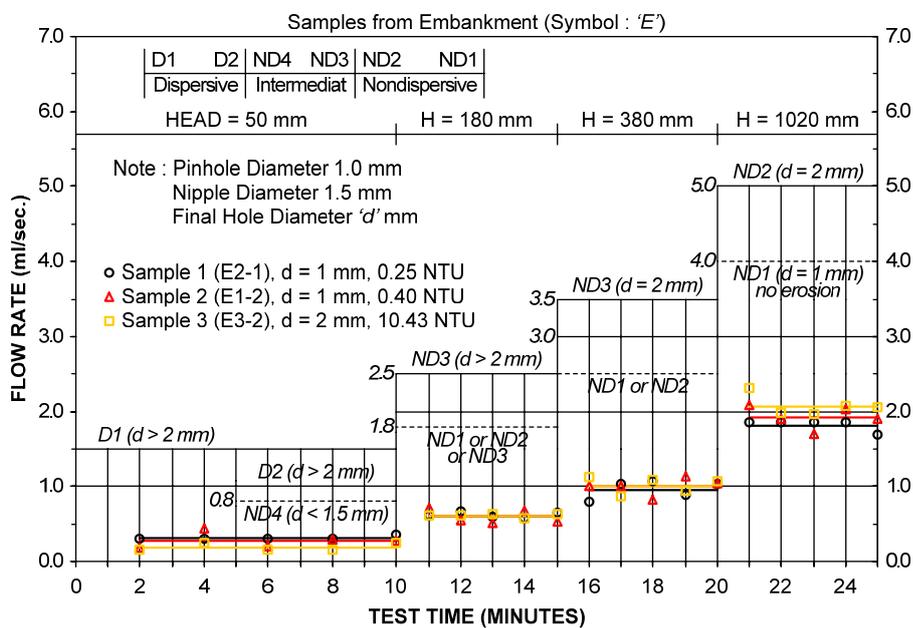
(ง) ผลทดสอบ Pinhole Test ของตัวอย่างดินอ่างมุกดาหาร



(จ) ผลทดสอบ Pinhole Test ของตัวอย่างดินอ่างกาฬสินธุ์และอ่างกาฬสินธุ์ใต้



(ก) ผลทดสอบ Pinhole Test ของตัวอย่างดินอ่างอุทธรธานีเหนือและใต้



(ข) ผลทดสอบ Pinhole Test ของตัวอย่างดินบริเวณกองดินถม



(ก) รูปด้านหน้า



(ข) รูปด้านบน



(ค) รูปด้านข้าง



ภาพที่ 33 เครื่องมือทดสอบ Pinhole Test แบบมาตรฐาน และตำแหน่งของวัสดุ (ดินบดอัด กรวดกลม และ wire-mesh) ในแบบ



(ก) ตัวอย่างดินผ่ำตามยาว ก่อนนำเข้าเตาอบ



(ข) ตัวอย่างน้ำ สำหรับนำไปวัดความชุ่ม

ภาพที่ 34 (ก) ตัวอย่างดินผ่ำตามยาว เพื่อวัดขนาดรูเจาะหลังทดสอบ และ (ข) ตัวอย่างน้ำหลังทดสอบ ที่เสกของน้ำนั้น ๆ สำหรับนำไปวัดความชุ่ม ประกอบการพิจารณาผลการจำแนกดิน



(ก) ขนาดรูเจาะหลังทดสอบเท่าเดิม (ND1)



(ข) ขนาดรูเจาะหลังทดสอบเท่าเดิม (ND1)

(บน) ตัวอย่างดินอ่างอุรธานีเหนือ (UN1-3)

(ล่าง) ตัวอย่างดินอ่างกาฬสินธุ์ใต้ (KS1-3)



(ค) ขนาดรูเจาะหลังทดสอบ เท่ากับ 2 มม. (ND2)



(รูปขยาย)

ตัวอย่างดินบริเวณกองดินถม (E3-2)



(ง) ขนาดรูเจาะหลังทดสอบ มากกว่า 2 มม. (ND3)



(รูปขยาย)

ตัวอย่างดินอ่างมุกดาหาร (M2-2)

ภาพที่ 35 ขนาดรูเจาะหลังทดสอบของตัวอย่างดินบริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ กับผลการจำแนกดินกระจายตัวโดยวิธี Pinhole Test

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลการจำแนกดินกระจายตัว โดยวิธี Double Hydrometer Test และ Pinhole Test ของตัวอย่างทดสอบ จำนวน 63 ตัวอย่าง

| อ่างเก็บน้ำ/ กองดินถม | ผลการจำแนกดินกระจายตัว (ตัวอย่าง) | | | |
|--------------------------|-----------------------------------|--------------|-------------------------|----------------------------|
| | Double Hydrometer Test (DHT) | | Pinhole Test | |
| | กระจายตัว | ไม่กระจายตัว | กระจายตัว ^{1/} | ไม่กระจายตัว ^{2/} |
| กองดินถม | 6 | 1 | - | 7 |
| อุดรธานีเหนือ | 3 | 5 | - | 8 |
| อุดรธานีใต้ | - | 2 | - | 2 |
| กาฬสินธุ์ | 2 | 3 | - | 5 |
| กาฬสินธุ์ใต้ | 1 | 1 | - | 2 |
| มุกดาหาร | 4 | 2 | 1 | 5 |
| สกลนคร | 5 | 4 | - | 9 |
| นครพนม | 8 | 1 | 1 | 8 |
| หนองคาย | 8 | 7 | 2 | 13 |
| รวม | 37 | 26 | 4 | 59 |

หมายเหตุ ^{1/} กระจายตัวปานกลาง (ND3 และ ND4)

กระจายตัวรุนแรง (D1 และ D2)

^{2/} ไม่กระจายตัว (ND1 และ ND2)

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบผลการจำแนกดินกระจายตัว โดยวิธี Double Hydrometer Test และ Pinhole Test แยกตามระดับการกระจายตัว

| อ่างเก็บน้ำ/ กองดินถม | ผลการจำแนกดินกระจายตัว (ตัวอย่าง) | | | | | | | | |
|--------------------------|---|-----------|-------------|--------------|----|-----|-----|-----|-----|
| | ระดับการกระจายตัว (เปอร์เซ็นต์) ^{1/} | | | Pinhole Test | | | | | |
| | มากกว่า 66 | 33 ถึง 66 | น้อยกว่า 33 | D2 | D1 | ND4 | ND3 | ND2 | ND1 |
| กองดินถม | 3 | 3 | 1 | - | - | - | - | 1 | 6 |
| อุดรธานีเหนือ | 2 | 1 | 5 | - | - | - | - | - | 8 |
| อุดรธานีใต้ | - | - | 2 | - | - | - | - | - | 2 |
| กาฬสินธุ์ | 1 | 1 | 3 | - | - | - | - | - | 5 |
| กาฬสินธุ์ใต้ | - | 1 | 1 | - | - | - | - | - | 2 |

ตารางที่ 7 (ต่อ)

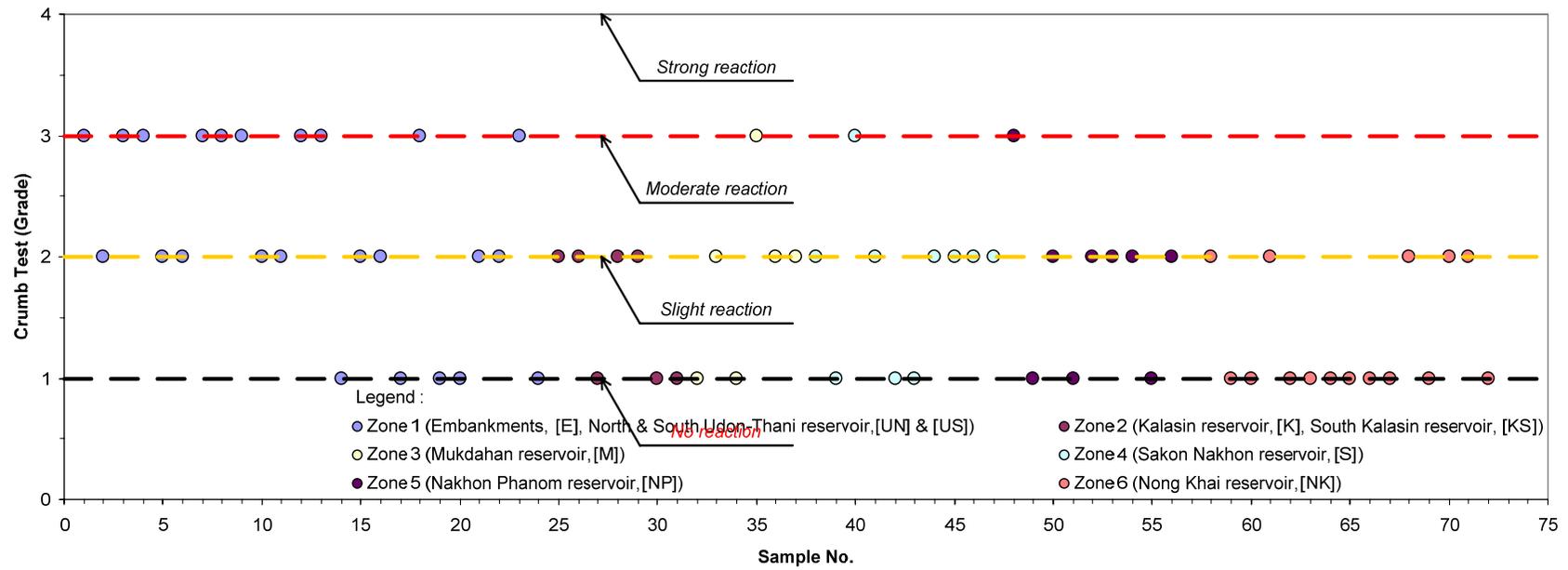
| อ่างเก็บน้ำ/ กองดินถม | ผลการจำแนกดินกระจายตัว (ตัวอย่าง) | | | | | | | | |
|--------------------------|---|-----------|-------------|--------------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | ระดับการกระจายตัว (เปอร์เซ็นต์) ^{1/} | | | Pinhole Test | | | | | |
| | มากกว่า 66 | 33 ถึง 66 | น้อยกว่า 33 | D2 | D1 | ND4 | ND3 | ND2 | ND1 |
| มุกดาหาร | 1 | 3 | 2 | - | - | - | 1 | 2 | 3 |
| สกลนคร | 3 | 2 | 4 | - | - | - | - | 2 | 7 |
| นครพนม | 2 | 6 | 1 | - | - | - | 1 | 1 | 7 |
| หนองคาย | - | 8 | 7 | - | - | - | 2 | 3 | 10 |
| รวม | 12 | 25 | 26 | - | - | - | 4 | 9 | 50 |

หมายเหตุ ^{1/} เป็นระดับการกระจายตัวของดิน โดยการทดสอบ Double Hydrometer Test

4. ผลทดสอบการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Crumb Test

ดินทุกตัวอย่างซึ่งทดสอบโดยวิธี Crumb Test (Emerson, 1964) จะเกิดการทลายตัว (Slake) ในน้ำ จนหมดภายในเวลาไม่กี่วินาที ด้วยอัตราที่แตกต่างกัน ส่วนการทดสอบ Crumb Test โดยวิธีของ Sherard et. al. (1976) จะจำแนกดินกระจายตัวออกได้เป็นเกรด 1 และเกรด 2 เป็นส่วนใหญ่ โดยไม่มีตัวอย่างใดจำแนกได้เป็นเกรด 4 ดังแสดงในภาพที่ 36

สาเหตุที่ดินเกิดการทลายตัวในน้ำ เนื่องจากผลลัพท์จากประจุไฟฟ้าระหว่างอนุภาคของเม็ดดินเป็นแรงผลัก (Repulsive Force) ซึ่งกันและกัน การที่ระบบของแรงลัพท์ระหว่างอนุภาคเม็ดดินกับน้ำเป็นแรงผลัก อาจพิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ แรงผลักเพิ่มขึ้น ในขณะที่แรงดึงดูดคงที่หรือลดลง แรงผลักระหว่างอนุภาคจะมากหรือน้อยจะแปรผันโดยตรงกับขนาดของชั้นประจุบวก (Double Layer) ที่ห่อหุ้มอนุภาคของเม็ดดินซึ่งมีประจุลบอยู่ที่ผิว การดูดซับน้ำของดินเหนียว จะทำให้ชั้นประจุบวกมีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้แรงผลักเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน (ศุภกิจ, 2543) ซึ่งหากดินกระจายตัวนั้นมีโซเดียมอออนเป็นองค์ประกอบอยู่ใน โครงสร้างด้วยแล้ว ก็จะเป็นตัวเสริมแรงผลักระหว่างอนุภาค ทั้งนี้เนื่องจากโซเดียมอออนจะดูดซับน้ำเข้ามาล้อมรอบตัวเอง ขนาดประจุที่ใหญ่ขึ้นทำให้ไม่พอดีกับโครงสร้างเดิมที่เคยจับตัวอยู่ จึงมีการเคลื่อนที่ห่างออกจากพื้นผิวดินเหนียว ทำให้ชั้นของประจุบวกมีความหนาเพิ่มขึ้น เกิดการผลักรันระหว่างอนุภาคได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ดินกระจายตัว



ภาพที่ 36 ระดับการกระจายตัวของดิน (เกรด) บริเวณอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ซึ่งจำแนกโดยวิธี Crumb Test (Sherard et. al., 1976)

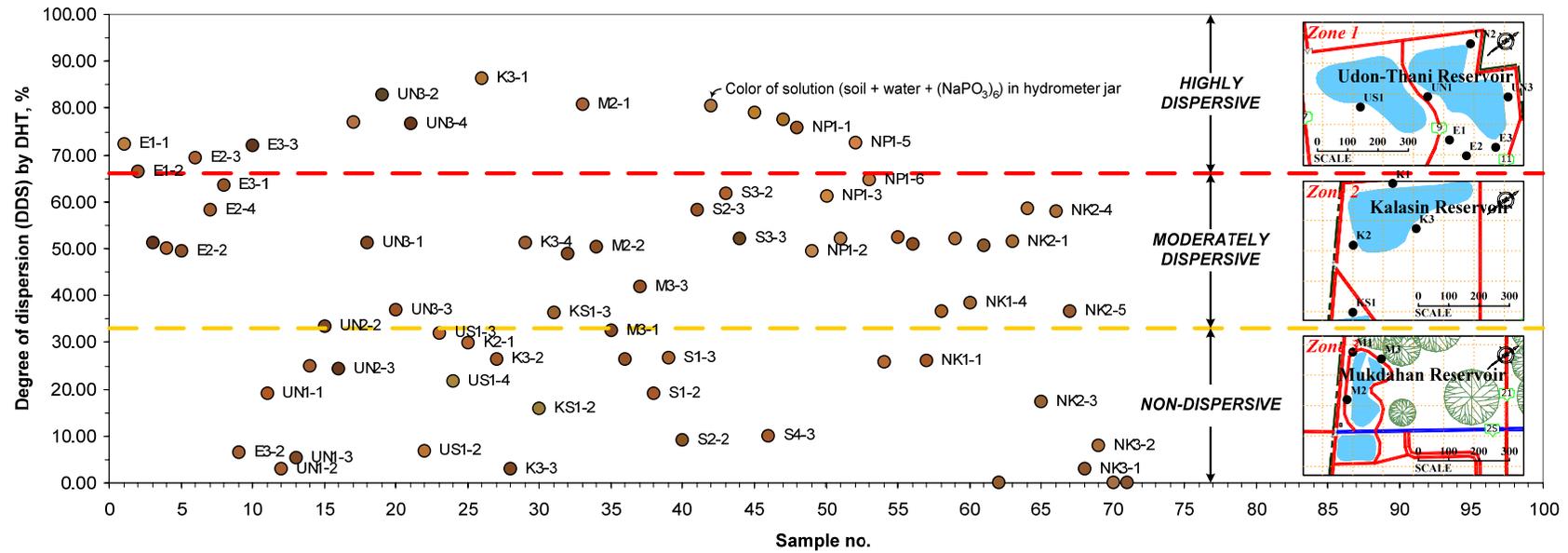
5. สีของดินกับผลทดสอบการกระจายตัว โดยวิธี Double Hydrometer Test

สีของดินเท่าที่ตรวจพบในวิทยาเขต ประกอบด้วยสีหลัก ๆ 3 สี คือ สีส้มแดงถึงน้ำตาล สีขาว และสีเหลือง โดยสีที่พบมากที่สุดและกระจายอยู่ทั่วไปในแต่ละความลึกที่เจาะสำรวจคือ สีส้มถึงแดง และจะพบดินสีขาวปะปนอยู่ในปริมาณที่มากน้อยแตกต่างกัน สำหรับดินสีเหลืองจะพบแทรกตัวอยู่เป็นชั้นบาง ๆ ในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น จากการเจาะสำรวจดินบริเวณอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ พบว่า ดินสีขาวจะพบมากบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ อ่างกาฬสินธุ์ใต้ และอ่างอุครธานีใต้ ซึ่งจะเป็นดินที่มีปริมาณส่วนละเอียด (Clay Fraction) และค่าดัชนีความเหนียวสูง และเมื่อทดสอบการกระจายตัวของดิน โดยวิธี DHT พบว่า เป็นดินที่ไม่กระจายตัว สำหรับดินสีน้ำตาลเข้ม สำรวจพบบริเวณอ่างอุครธานีเหนือและอ่างเก็บน้ำอื่น ๆ ในบางความลึกเท่านั้น ซึ่งส่วนใหญ่จะให้ผลการจำแนกเป็นดินที่กระจายตัวรุนแรง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสีของดินในวิทยาเขตไม่เป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด จึงไม่สามารถบอกสีของดินเป็นปริมาณที่แน่นอนได้ ในงานวิจัยนี้จึงใช้การอ้างอิงสีของดินจากสีผสมของสารละลายระหว่างดิน น้ำ และสารแตกตัว จากการทดสอบไฮโดรมิเตอร์แทน ดังแสดงในภาพที่ 38

ภาพที่ 37 แสดงลักษณะทางกายภาพของดินอ่างกาฬสินธุ์ ซึ่งจะพบดินสีขาวอยู่ในปริมาณมาก อย่างไรก็ตาม จากการสำรวจโดยรอบอ่างพบว่า ดินในบริเวณนี้ส่วนใหญ่เป็นแม่รัง ซึ่งมีความแข็งแรงไม่อาจเก็บตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ ดังนั้น ตัวอย่างดินที่เก็บได้จึงมีปริมาณไม่มากนัก และเก็บได้เฉพาะในบางบริเวณของอ่างเท่านั้น



ภาพที่ 37 ลักษณะทางกายภาพของดินบริเวณอ่างกาฬสินธุ์



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างสีผสมของดินจากสารละลายของดิน น้ำ และสารแตกตัวจากการทดสอบ Standard Hydrometer Test (ASTM D422) กับระดับการกระจายตัวของดิน ซึ่งจำแนกโดยวิธี Double Hydrometer Test (ASTM D4221)

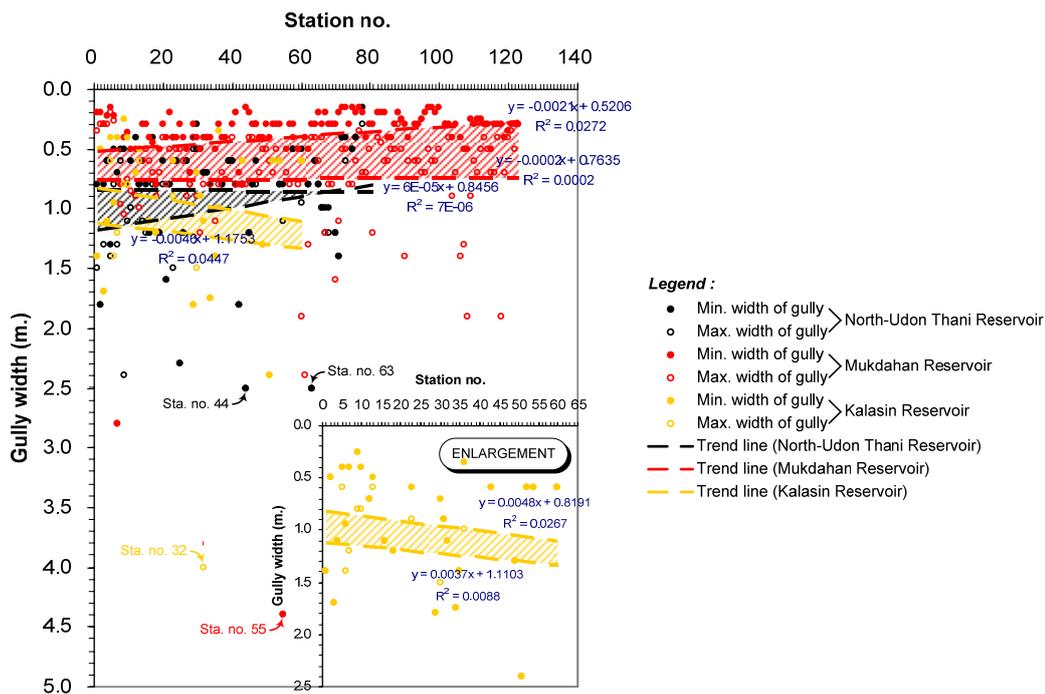
ผลการสำรวจภาคสนาม

6. ผลการสำรวจภาคสนามชั้นรายละเอียด

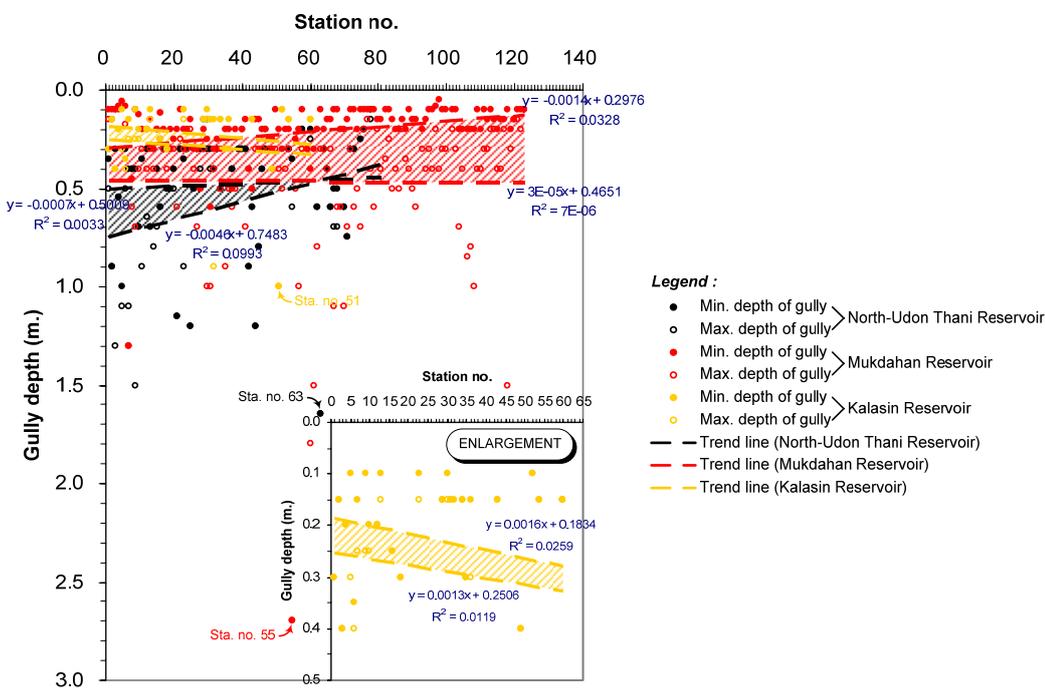
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความลึกต่ำสุดและสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกกับตำแหน่งที่เกิดการกัดเซาะ

จากภาพที่ 39 แสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของความกว้างและความลึกต่ำสุดและสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกรอบอ่างมุกดาหาร จะอยู่ในช่วงต่ำที่สุด แต่จะกระจายตัวอยู่ในช่วงที่กว้างที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอ่างอุครธานีเหนือและอ่างกาฬสินธุ์ เมื่อพิจารณาดำแหน่งที่เกิดการกัดเซาะ พบว่า ความกว้างและความลึกต่ำสุดของการกัดเซาะบริเวณรอบอ่างมุกดาหารมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ความกว้างและความลึกสูงสุดมีแนวโน้มคงที่ จึงส่งผลให้ปริมาณการกัดเซาะโดยรอบอ่างจากตำแหน่งแรกค่อย ๆ ลดลงเป็นลำดับ จนถึงตำแหน่งสุดท้ายที่ทำการศึกษา ซึ่งจะตรงข้ามกับอ่างกาฬสินธุ์ที่ทั้งความกว้างต่ำสุดและสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความลึกต่ำสุดและสูงสุดของการกัดเซาะด้วยแล้ว กลับพบว่าอยู่ในช่วงต่ำที่สุดและกระจายตัวอยู่ในช่วงแคบ ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับอ่างอุครธานีเหนือและอ่างมุกดาหาร จึงทำให้ปริมาณการกัดเซาะโดยรวมน้อยกว่าของทั้ง 2 อ่าง สำหรับอ่างอุครธานีเหนือ จะพบว่า เส้นแนวโน้มนៃความกว้างและความลึกสูงสุดของการกัดเซาะมีแนวโน้มลดลงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไปตัดกับเส้นแนวโน้มนៃความกว้างและความลึกต่ำสุด นั่นคือ ความกว้างและความลึกของร่องการกัดเซาะที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งนี้ เป็นทั้งความกว้างและความลึกต่ำสุดและสูงสุดในเวลาเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความถี่ของการกัดเซาะลดลงต่ำมาก จนมีค่าใกล้เคียง 1 ร่องต่อความยาว 5 เมตร (0.2 ร่องต่อเมตร) ซึ่งในสนามจะทำการเก็บความถี่ของการกัดเซาะทุก ๆ 5 เมตร และถ้าในระยะ 5 เมตรนี้ มีร่องการกัดเซาะเกิดขึ้นเพียง 1 ร่อง ก็จะทำให้ความกว้างต่ำสุดและสูงสุด (ความลึกต่ำสุดและสูงสุด) เป็นค่า ๆ เดียวกัน โดยปริยาย และเมื่อพิจารณาแนวโน้มของความลึกต่ำสุดและสูงสุดของการกัดเซาะ พบว่า จะอยู่ในช่วงสูงที่สุดถึงแม้จะกระจายตัวอยู่ในช่วงแคบกว่าอ่างมุกดาหาร แต่ก็ทำให้ปริมาณการกัดเซาะโดยรวมสูงที่สุด

ความกว้างและความลึกสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องลึก บริเวณอ่างอุครธานีเหนือและอ่างมุกดาหาร จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกัน (Sta. no. 63 และ 55 ตามลำดับ) โดยที่อ่างมุกดาหารจะมีขนาดของความกว้างและความลึกสูงสุดของการกัดเซาะมากกว่าอ่างอุครธานีเหนือ ส่วนอ่างกาฬสินธุ์ขนาดความกว้างและความลึกสูงสุด (Sta. no. 32 และ 51) ดังกล่าว จะน้อยกว่าของทั้ง 2 อ่าง และจากภาพที่ 39 ทำให้ทราบว่า ขนาดความกว้างของร่องการกัดเซาะจะมากกว่าขนาดความลึก ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณปริมาตรของดินที่สูญเสียนไปเนื่องจากการกัดเซาะดังกล่าวต่อไป (หัวข้อที่ 5.2)



(ก) พิจารณา Gully ตามช่วงความกว้าง



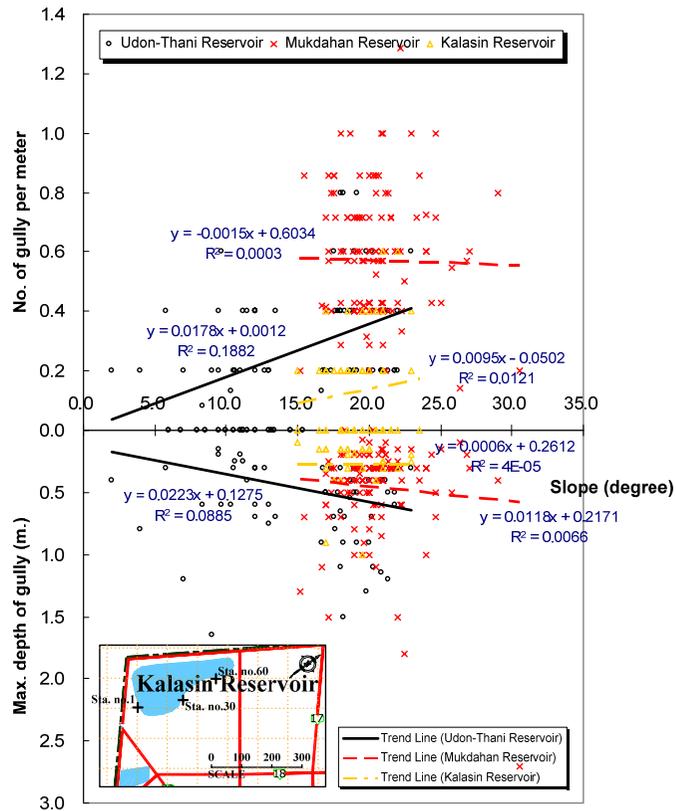
(ข) พิจารณา Gully ตามช่วงความลึก

ภาพที่ 39 ความกว้างและความลึกต่ำสุดและสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก รอบอ่างอุตรธานีเหนือ อ่างกาฬสินธุ์ และอ่างมุกดาหาร

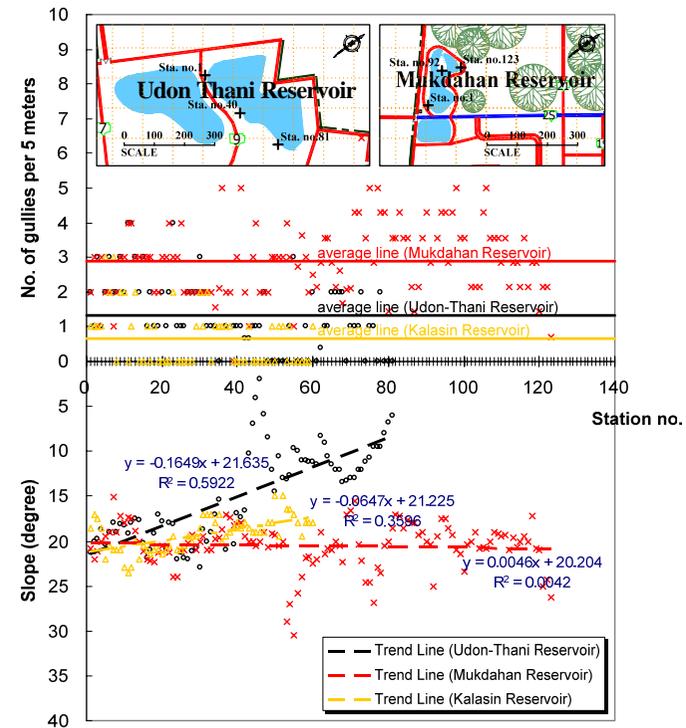
6.2 ความลาดชันกับความรุนแรงของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก

เมื่อพิจารณาเฉพาะความลาดชันของอ่าง พบว่า อ่างมุกดาหารมีความลาดชันมากกว่า อ่างอุครธานีเหนือและอ่างกาฬสินธุ์ โดยมีมุมลาดเอียงอยู่ระหว่าง 15 ถึง 30 องศา เฉลี่ยประมาณ 20 องศา กับแนวราบ ในขณะที่อ่างอุครธานีเหนือจะมีมุมลาดเอียงอยู่ในช่วงที่กว้างกว่า ตั้งแต่ 2 องศา ไปจนถึง 23 องศา เฉลี่ยประมาณ 16 องศา กับแนวราบ จากการวัดระดับความรุนแรงของการกัดเซาะ โดยการนับจำนวนร่องการกัดเซาะ รวมทั้งวัดความลึกและความกว้างตรงตำแหน่งที่ลึกที่สุด พบว่า อ่างกาฬสินธุ์มีความถี่น้อยที่สุดประมาณ 0.7 ร่อง ต่อ ความยาว 5 เมตร (0.1 ร่อง ต่อ เมตร) อ่างมุกดาหารจะมีความถี่ของการกัดเซาะมากกว่า เฉลี่ย 2.9 ร่อง ต่อ ความยาว 5 เมตร (0.6 ร่อง ต่อ เมตร) ส่วนอ่างอุครธานีเหนือจะมีความถี่น้อยกว่าประมาณครึ่งหนึ่งของอ่างมุกดาหาร ดังแสดงในภาพที่ 40 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมีการปลูกหญ้าแฝกบริเวณตอนบนของลาดดินอ่างอุครธานีเหนือ ทำให้ความถี่ของการกัดเซาะลดลง และเมื่อสังเกตตำแหน่งของการกัดเซาะ จะพบว่า ร่องการกัดเซาะจะเกิดขึ้นระหว่างกอของหญ้าแฝกเป็นทางยาวจากลาดด้านบนลงไปถึงด้านล่าง ในขณะที่บริเวณอ่างมุกดาหาร การปลูกหญ้าแฝกจะมีอยู่เป็นบางบริเวณเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาความลึกของการกัดเซาะร่วมด้วย กลับพบว่า อ่างอุครธานีเหนือมีความรุนแรงของการกัดเซาะมากกว่า (พิจารณาจากปริมาตรดินที่สูญเสียบทั้งหมดในพื้นที่ศึกษา) ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะระดับการกระจายตัวเฉลี่ยจากผลการทดสอบ DHT ของดินบริเวณนี้ สูงกว่าบริเวณอ่างมุกดาหาร

ภาพที่ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชัน ความถี่ และความลึกสูงสุดของการกัดเซาะแบบร่องลึก รอบอ่างอุครธานีใต้ และอ่างสกลนคร เมื่อพิจารณาเฉพาะความลาดชันของอ่าง พบว่า อ่างสกลนครมีความลาดชันมากกว่าอ่างอุครธานีใต้ โดยมีมุมลาดเอียงอยู่ระหว่าง 9.5 ถึง 29 องศา เฉลี่ยประมาณ 20.47 องศา กับแนวราบ ในขณะที่อ่างอุครธานีใต้จะมีมุมลาดเอียงอยู่ในช่วงที่แคบกว่า ตั้งแต่ 12 องศา ไปจนถึง 19 องศา เฉลี่ยประมาณ 15.71 องศา กับแนวราบ จากการวัดระดับความรุนแรงของการกัดเซาะ พบว่า อ่างสกลนครมีความถี่น้อยกว่าอ่างอุครธานีใต้เป็น 0.23 ร่อง ต่อ ความยาว 5 เมตร (0.05 ร่อง ต่อ เมตร) และ 1.27 ร่อง ต่อ ความยาว 5 เมตร (0.25 ร่อง ต่อ เมตร) ตามลำดับ สำหรับอ่างเก็บน้ำอื่น ๆ เช่น อ่างนครพนม และอ่างหนองคาย ตรวจไม่พบการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก หรือในบางบริเวณพบเพียงการกัดเซาะที่ผิวดินในระดับตื้น ๆ เท่านั้น จนไม่สามารถทำการวัดขนาดที่แท้จริงได้

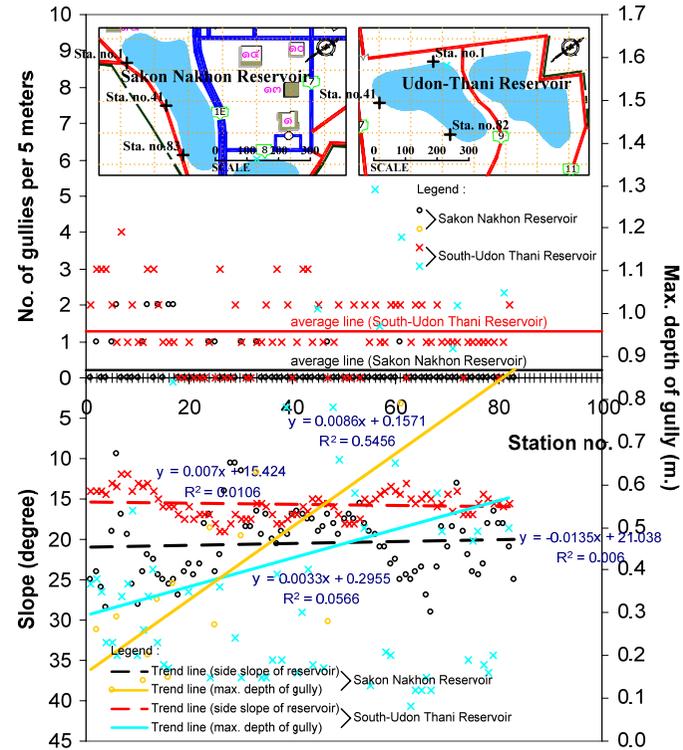
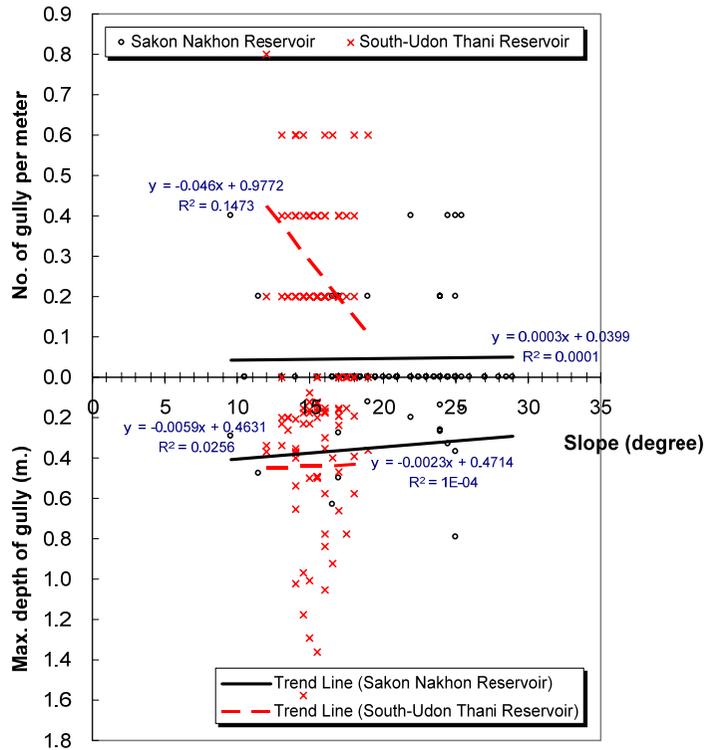


(ก) ความถี่และความลึกสูงสุดของ Gully กับความลาดชันของอ่าง



(ข) ความถี่ของ Gully และความลาดชันของอ่างกับตำแหน่งที่ทำการศึกษา

ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชัน ความถี่ และความลึกสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกกับตำแหน่งที่ทำการศึกษา รอบอ่างอุรธานีเหนือ อ่างกาฬสินธุ์ และอ่างมุกดาหาร



(ก) ความถี่ และความลึกสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกกับความลาดชันตามขอบอ่างเก็บน้ำ

(ข) ความลาดชันของอ่าง ความถี่ และความลึกสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกกับตำแหน่งที่ทำการศึกษา

ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชัน ความถี่ และความลึกสูงสุดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกกับตำแหน่งที่ทำการศึกษา รอบอ่างอุรธานีใต้และอ่างสกนนคร

เนื่องจากการกัดเซาะแบบร่องลึกมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนและยังไม่สามารถระบุหน้าตัดที่แท้จริงได้ เพื่อให้การคำนวณปริมาตรของดินที่สูญเสียไปทั้งหมด (Volume loss) จากการกัดเซาะในลักษณะนี้กระทำได้ง่าย จึงได้ตั้งสมมติฐานสำหรับใช้ประมาณปริมาตรของดินที่สูญเสียไปดังกล่าว ดังนี้

- 1) หน้าตัดของการกัดเซาะแบบร่องลึก สมมติให้เป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ฐานและความสูงของสามเหลี่ยมเป็นความกว้างและความลึกของร่องการกัดเซาะตามลำดับ
- 2) หน้าตัดของการกัดเซาะแบบร่องลึก สมมติให้มีหน้าตัดคงที่ตลอดความยาวที่ทำการศึกษา โดยความกว้างของร่องการกัดเซาะจะถูกกำหนดจากตำแหน่งที่ลึกที่สุด
- 3) ความยาวของการกัดเซาะแบบร่องลึก สมมติให้เป็นระยะทางตามแนวเอียงตามขอบอ่างเก็บน้ำจากตอนบนเรื่อยไปจนถึงตำแหน่งที่ทำการศึกษา

จากการประมาณปริมาตรของดินที่สูญเสียไปเนื่องจากการกัดเซาะเป็นร่องลึก โดยการสมมติให้หน้าตัดของร่องการกัดเซาะเป็นรูปสามเหลี่ยม และมีความยาวเท่ากับระยะทางตามแนวเอียงของลาดดิน จะทำให้สามารถคำนวณปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณได้ จากการคำนวณพบว่า อ่างอุครธานีเหนือมีปริมาตรของดินที่สูญเสียไปประมาณ 333 ลบ.ม. ของปริมาตรดินทั้งหมดในพื้นที่ศึกษา หรือคิดเป็น 6.3 เปอร์เซ็นต์ มากกว่าอ่างมุกดาหารและอ่างอุครธานีใต้ที่สูญเสียไป 4.6 และ 3.8 เปอร์เซ็นต์ (ประมาณ 375 ลบ.ม. และ 123 ลบ.ม.) ตามลำดับ สำหรับอ่างเก็บน้ำอื่น ๆ ตรวจพบการกัดเซาะแบบร่องลึกไม่มากนัก และไม่สามารถทำการวัดได้เพราะการกัดเซาะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวดินในระดับตื้น ๆ (Surface Erosion) เท่านั้น ปริมาตรดินที่สูญเสียไปของอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 42(ก) ถึง 42(จ)

ตารางที่ 8 สรุปความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ ความถี่และสัดส่วนของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก กับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ บริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ เมื่อพิจารณาความลาดชันเฉลี่ยของอ่าง พบว่า อ่างเก็บน้ำแต่ละอ่างมีความลาดชันเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมากนัก โดยอ่างอุครธานีเหนือจะมีมุมลาดเอียงอยู่ในช่วงที่กว้างที่สุดตั้งแต่ 2 องศา ไปจนถึง 23 องศา กับแนวราบ ในขณะที่อ่างอุครธานีใต้จะมีมุมลาดเอียงอยู่ในช่วงที่แคบที่สุดตั้งแต่ 12 องศา ไปจนถึง 19 องศา กับแนวราบ ส่วนความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก พบว่า อ่างมุกดาหารจะมีความถี่ของการกัดเซาะสูงสุดเฉลี่ย 0.48 ร่อง ต่อ เมตร ในขณะที่อ่างอุครธานีเหนือและใต้จะมีความถี่ที่ใกล้เคียงกันเฉลี่ย 0.27 และ 0.25 ร่อง ต่อ เมตร ตามลำดับ สำหรับอ่างกาฬสินธุ์และอ่างสกลนครจะมีความถี่ต่ำกว่าอ่างอื่น ๆ เฉลี่ย 0.13 และ 0.05 ร่อง ต่อ เมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 8 (ก) สรุปความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ ความถี่และสัดส่วนของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกกับปริมาณของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ บริเวณกองดินถม และอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ

| อ่างเก็บน้ำ/ กองดินถม | ความลาดชันของอ่าง (องศากับแนวราบ) | | | ความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก | | | | | | สัดส่วนของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก | | | | | | ปริมาณดินที่สูญเสียไป โดยประมาณ | | |
|--------------------------|--------------------------------------|--------|--------|---------------------------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------------------------------|--------|--------|----------------|--------|--------|------------------------------------|--------------------|---|
| | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | (ร่องต่อ 5 เมตร) | | | (ร่องต่อเมตร) | | | ความกว้าง (เมตร) | | | ความลึก (เมตร) | | | (ลบ.ม.) | (เปอร์เซ็นต์) | |
| | | | | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | | | |
| กองดินถม | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.25 | 4.50 | 1.05 | 0.10 | 2.00 | 0.60 | - | - |
| อุดรธานีเหนือ | 2.00 | 23.00 | 14.94 | 0 | 4 | 1.33 | 0 | 0.80 | 0.27 | 0.15 | 2.50 | 0.87 | 0.10 | 1.65 | 0.52 | 333.11 | 6.29 | |
| อุดรธานีใต้ | 12.00 | 19.00 | 15.71 | 0 | 4 | 1.27 | 0 | 0.80 | 0.25 | 0.16 | 1.90 | 0.65 | 0.07 | 1.58 | 0.38 | 123.39 | 3.79 | |
| กาฬสินธุ์ | 15.00 | 23.50 | 19.25 | 0 | 3 | 0.67 | 0 | 0.60 | 0.13 | 0.25 | 4.00 | 1.00 | 0.10 | 1.00 | 0.24 | 27.21 | 3.65 ^{1/} | |
| มุกดาหาร | 15.17 | 30.50 | 20.49 | 0 | 6.43 | 2.88 | 0 | 1.00 | 0.48 | 0.15 | 4.40 | 0.49 | 0.05 | 2.70 | 0.29 | 374.81 | 4.64 | |
| สกลนคร | 9.50 | 29.00 | 20.47 | 0 | 2 | 0.23 | 0 | 0.40 | 0.05 | 0.17 | 1.28 | 0.47 | 0.12 | 0.79 | 0.30 | 10.97 | 0.45 | |

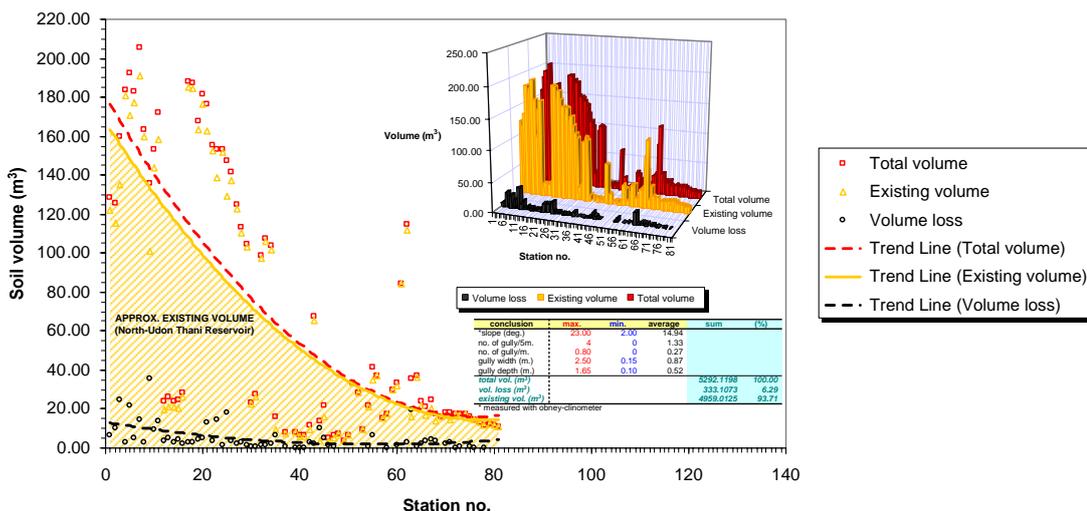
หมายเหตุ ^{1/} เมื่อไม่รวมผลของข้อมูล (ร่องการกัดเซาะ) ที่มีค่ามาก ๆ 2 ตำแหน่ง (Sta. no. 32 และ Sta. no. 51) จะทำให้ปริมาณของดินที่สูญเสียไปลดลงจาก 27.21 ลบ.ม. (3.65 เปอร์เซ็นต์) เหลือ 15.21 ลบ.ม. หรือคิดเป็น 2.04 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 8 (ข) สรุปปริมาณของดินที่สูญเสียไปทั้งหมดโดยประมาณจากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก บริเวณขอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ

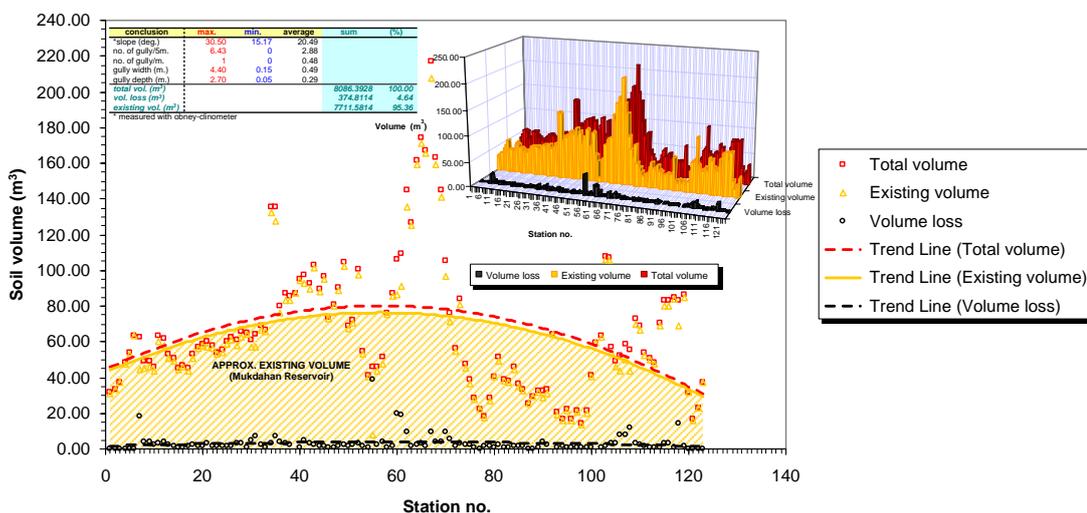
| อ่างเก็บน้ำ | ปริมาณดินทั้งหมดในพื้นที่ศึกษา | | ปริมาณดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ ^{1/} | | ปริมาณดินที่เหลืออยู่ | |
|---------------|--------------------------------|---------------|--|---------------|-----------------------|---------------|
| | (ลูกบาศก์เมตร) | (เปอร์เซ็นต์) | (ลูกบาศก์เมตร) | (เปอร์เซ็นต์) | (ลูกบาศก์เมตร) | (เปอร์เซ็นต์) |
| อุดรธานีเหนือ | 5,292.12 | 100.00 | 333.11 | 6.29 | 4,959.01 | 93.71 |
| อุดรธานีใต้ | 3,259.93 | 100.00 | 123.39 | 3.79 | 3,136.54 | 96.21 |
| กาฬสินธุ์ | 745.11 | 100.00 | 27.21 | 3.65 | 717.90 | 96.35 |
| มุกดาหาร | 8,086.39 | 100.00 | 374.81 | 4.64 | 7,711.58 | 95.36 |
| สกลนคร | 2,457.06 | 100.00 | 10.97 | 0.45 | 2,446.09 | 99.55 |
| รวม | | | 869.49 | 18.82 | | |

หมายเหตุ^{1/} เป็นปริมาณของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ เฉพาะการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกในพื้นที่ศึกษา (บริเวณขอบอ่างเก็บน้ำ) เท่านั้น โดยใช้สมมติฐาน 3 ข้อ ในการเก็บข้อมูลภาคสนามและการคำนวณปริมาณการกัดเซาะ ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

จากการคำนวณปริมาตรของดินที่สูญเสียนไปเนื่องจากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก โดยใช้สมมติฐานข้างต้น พบว่า บริเวณกองดินถมข้างอ่างอุธรธานีเหนือและอุธรธานีใต้ มีปริมาณการกัดเซาะสูงที่สุด รองลงมาคือ อ่างอุธรธานีเหนือ อ่างมุกดาหาร อ่างอุธรธานีใต้ อ่างกาฬสินธุ์ และอ่างสกลนคร ตามลำดับ สำหรับสัดส่วนของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกนั้น จะได้ทำการศึกษาอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 6.3

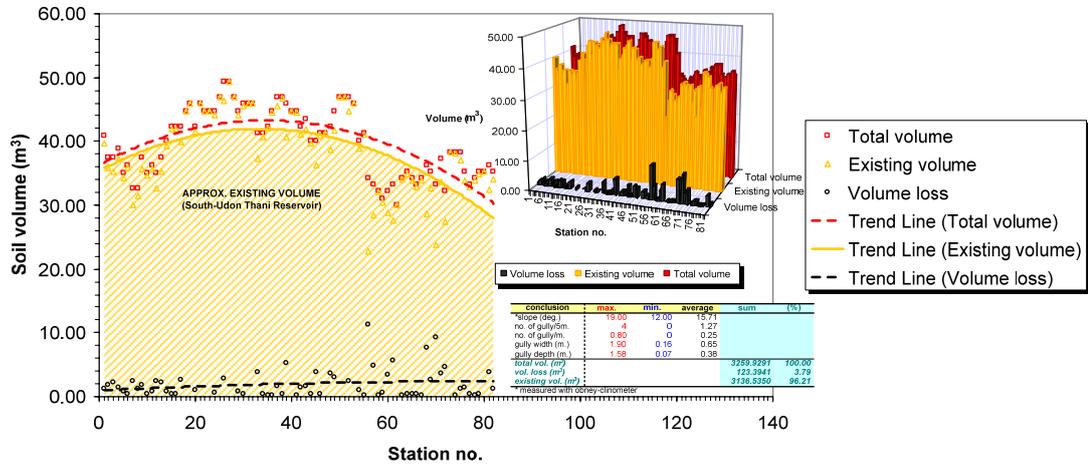


(ก) อ่างอุธรธานีเหนือ

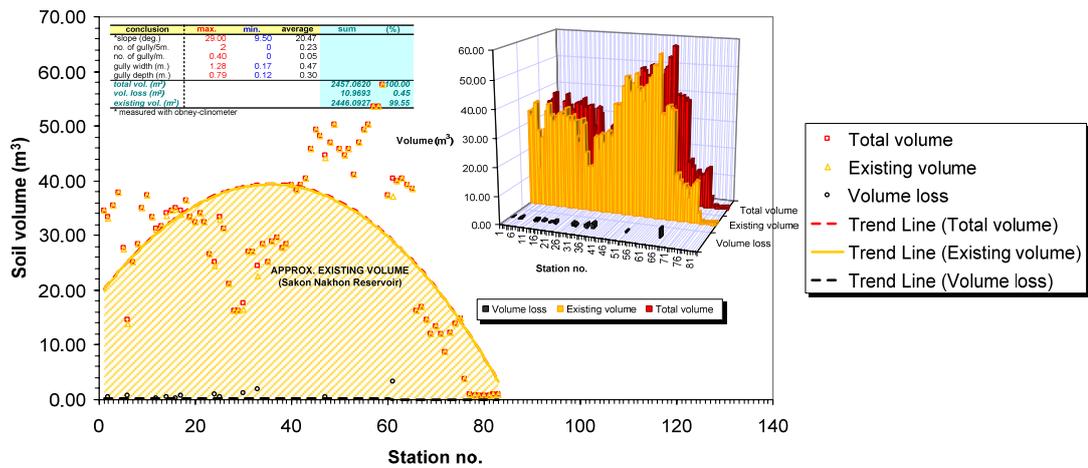


(ข) อ่างมุกดาหาร

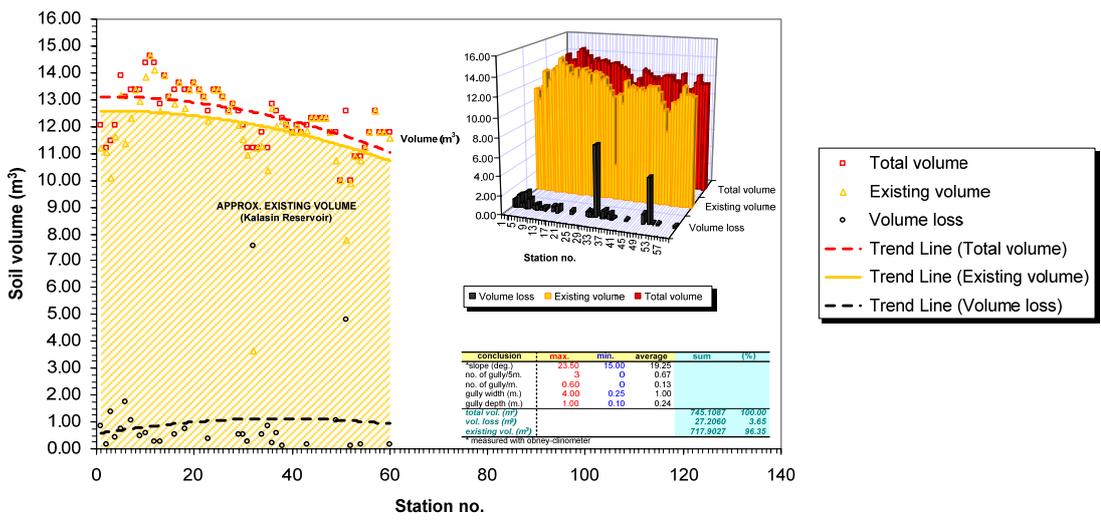
ภาพที่ 42 ปริมาตรของดินที่สูญเสียนไปโดยประมาณ (Approx. Volume Loss) จากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกรอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ



(ค) อ่างอุตรธานีใต้



(ง) อ่างสกลนคร



(จ) อ่างกาฬสินธุ์

ภาพที่ 42 (ต่อ)

6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง และความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกบริเวณอ่างอุครธานีเหนือ อ่างกาฬสินธุ์ และอ่างมุกดาหาร พบว่า ความลึกและความกว้างของการกัดเซาะจะแปรผันตรงซึ่งกันและกัน โดยอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความลึกของการกัดเซาะบริเวณอ่างอุครธานีเหนือและอ่างมุกดาหารมีค่าใกล้เคียงกัน (1 ต่อ 0.60 และ 1 ต่อ 0.59) สำหรับอ่างกาฬสินธุ์มีอัตราส่วนเป็น 1 ต่อ 0.24 ดังแสดงในภาพที่ 43 อย่างไรก็ตาม จากการวัดระดับความรุนแรงของการกัดเซาะโดยการนับจำนวนร่องการกัดเซาะ รวมทั้งวัดความลึกและความกว้างตรงตำแหน่งที่ลึกที่สุดบริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำอื่น ๆ เพิ่มเติม พบว่า อัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของการกัดเซาะก็ยังคงใกล้เคียง 1 ต่อ 0.60 หรือคิดเป็นมุมของการกัดเซาะประมาณ 80 องศา ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของการกัดเซาะแบบร่องลึกแสดงดังภาพที่ 44 ตารางที่ 9 และสมการที่ 11

$$y = 0.5463x + 0.0323 \tag{11}$$

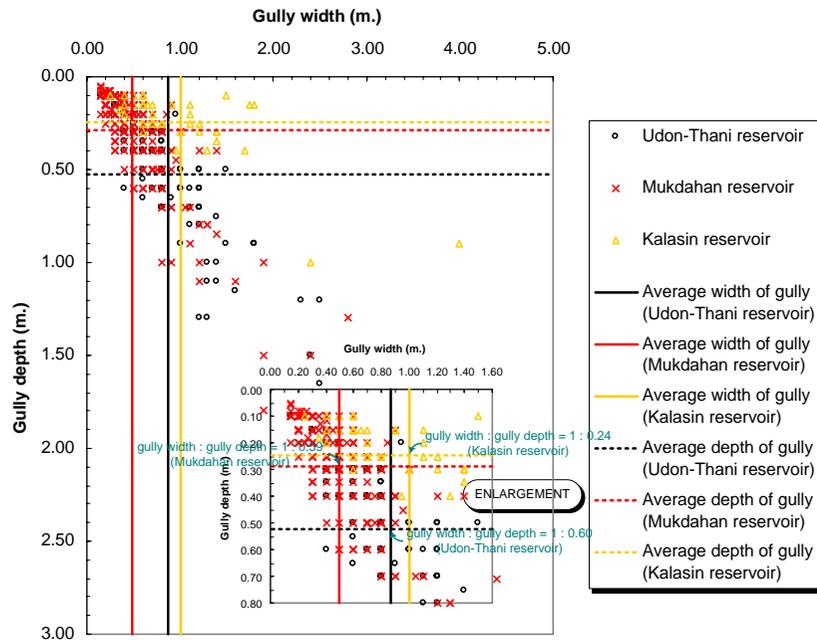
สมการที่ 11 จะไม่รวมผลของข้อมูลซึ่งเก็บได้จากอ่างกาฬสินธุ์ เนื่องจากมีจำนวนข้อมูล (ร่องการกัดเซาะ) อยู่่น้อย และมีความแตกต่างของข้อมูลแต่ละตัวมาก (โดยเฉพาะที่ Sta. no. 32 และ Sta. no. 51 กับ Sta. อื่น ๆ) ทำให้ค่าเฉลี่ยไม่ถูกต้อง

ตารางที่ 9 สรุปความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และสัดส่วนของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกและปริมาตรของดินที่สูญเสียบ่อยโดยประมาณ (Approx. volume loss) บริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ

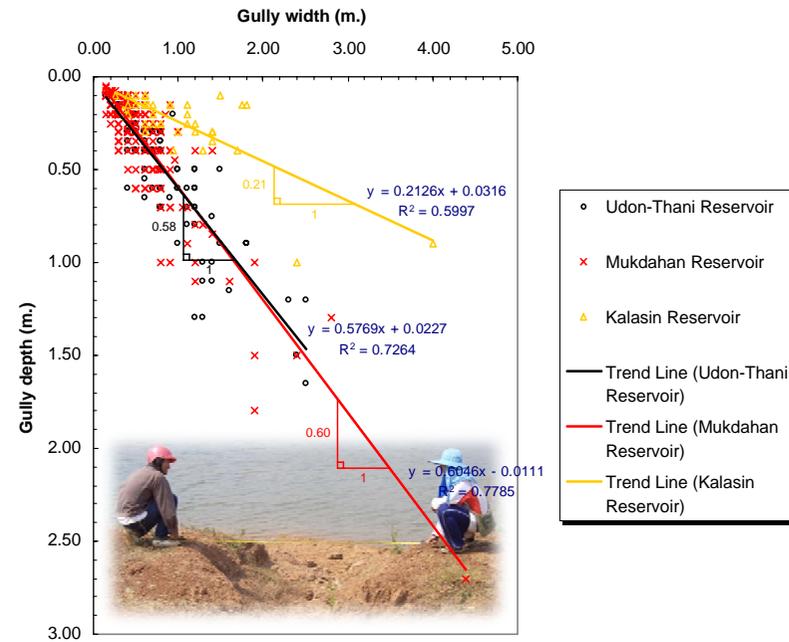
| อ่างเก็บน้ำ/ กองดินถม | ความลาดชันของอ่าง (องศากับแนวราบ) | | | สัดส่วนของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก | | | | | | มุมของการกัดเซาะ | | ปริมาตรดินที่สูญเสียบ่อยโดยประมาณ | | |
|--------------------------|--------------------------------------|--------|--------|---------------------------------------|--------|--------|----------------|--------|--------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|
| | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | ความกว้าง (เมตร) | | | ความลึก (เมตร) | | | อัตราส่วนเฉลี่ย | เป็นร่องน้ำแบบลึกเฉลี่ย | | (ลบ.ม.) | (เปอร์เซ็นต์) |
| | | | | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | | (องศา) | (เรเดียน) | | |
| กองดินถม | - | - | - | 0.25 | 4.50 | 1.05 | 0.10 | 2.00 | 0.60 | 1 : 0.57 | 82.51 | 1.44 | - | - |
| อุตุธานีเหนือ | 2.00 | 23.00 | 14.94 | 0.15 | 2.50 | 0.87 | 0.10 | 1.65 | 0.52 | 1 : 0.60 | 79.61 | 1.39 | 333.11 | 6.29 |
| อุตุธานีใต้ | 12.00 | 19.00 | 15.71 | 0.16 | 1.90 | 0.65 | 0.07 | 1.58 | 0.38 | 1 : 0.58 | 81.53 | 1.42 | 123.39 | 3.79 |
| กาฬสินธุ์ | 15.00 | 23.50 | 19.25 | 0.25 | 4.00 | 1.00 | 0.10 | 1.00 | 0.24 | 1 : 0.24 | 128.72 | 2.25 | 27.21 | 3.65 |
| มุกดาหาร | 15.17 | 30.50 | 20.49 | 0.15 | 4.40 | 0.49 | 0.05 | 2.70 | 0.29 | 1 : 0.59 | 80.56 | 1.41 | 374.81 | 4.64 |
| สกลนคร | 9.50 | 29.00 | 20.47 | 0.17 | 1.28 | 0.47 | 0.12 | 0.79 | 0.30 | 1 : 0.64 | 76.00 | 1.33 | 10.97 | 0.45 |
| เฉลี่ย | | | | | | | | | | 1 : 0.60^{1/} | 80.04^{2/} | 1.40^{3/} | | |
| รวม | | | | | | | | | | | | | 869.49 | 18.82 |

หมายเหตุ ^{1/} เป็นอัตราส่วนเฉลี่ยโดยไม่รวมผลของข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากอ่างกาฬสินธุ์

^{2/, 3/} เป็นมุมของการกัดเซาะเฉลี่ยโดยไม่รวมผลของข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากอ่างกาฬสินธุ์

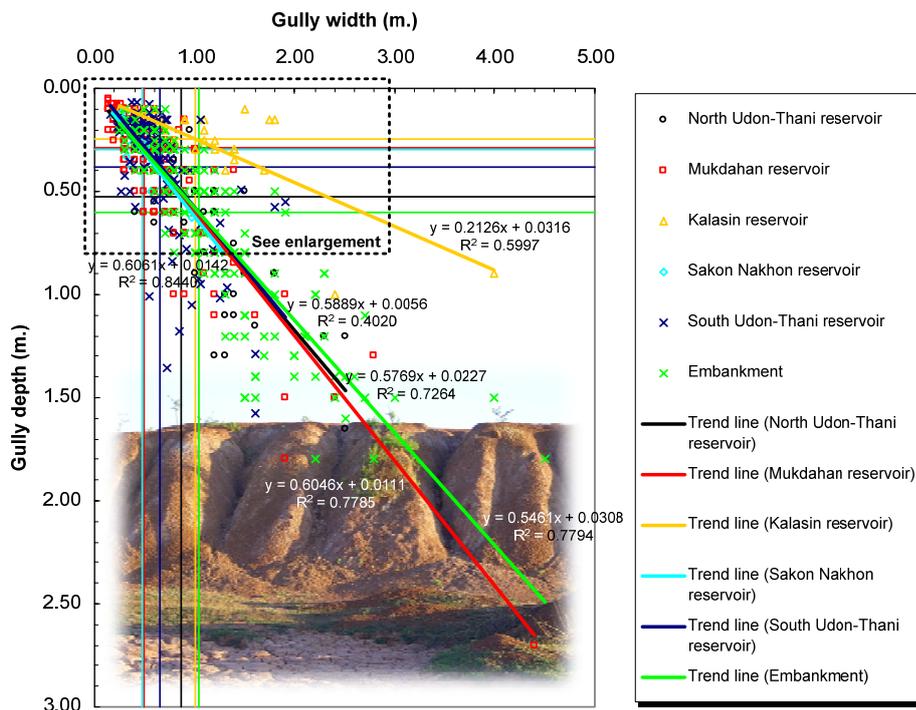


(ก) ความกว้างและความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก และตัดส่วนความกว้างต่อความลึกเฉลี่ยของการกัดเซาะ



(ข) แนวโน้มขนาดความกว้างและความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก

ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก บริเวณอ่างอุตราธานีเหนือ อ่างกาฬสินธุ์ และอ่างมุกดาหาร

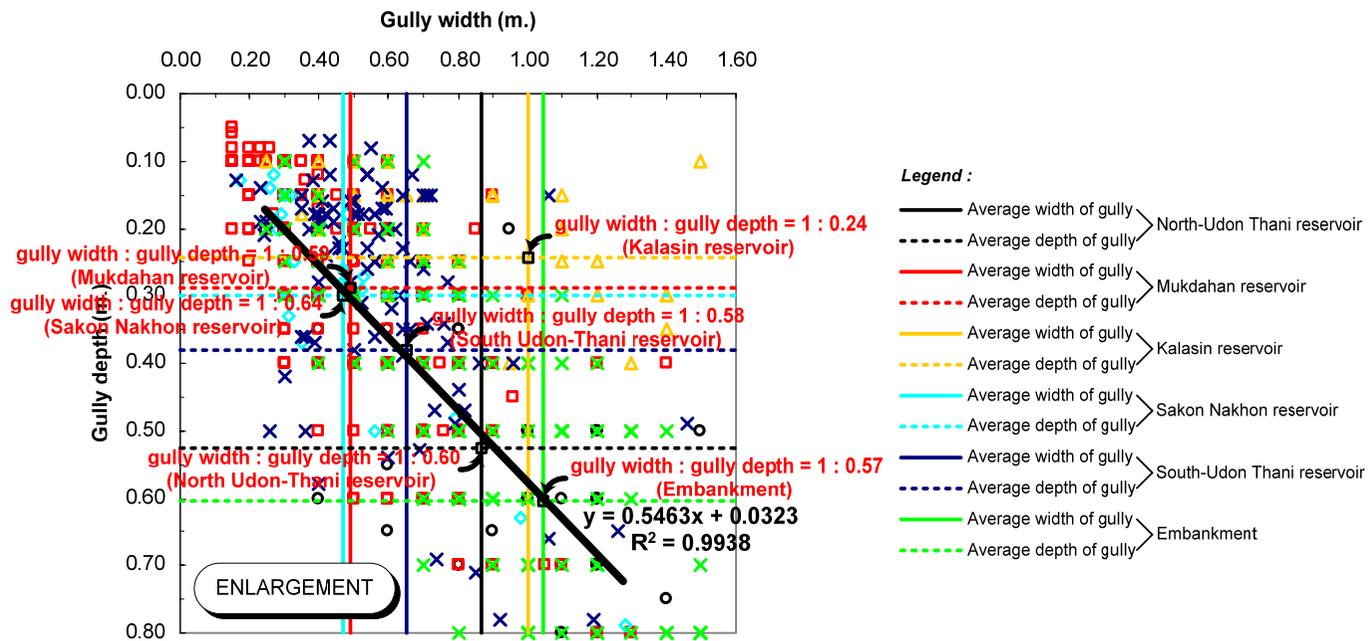


ภาพที่ 44 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก บริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ

6.4 ความแน่นของดินบนกองดินถมและบริเวณขอบอ่างเก็บน้ำ

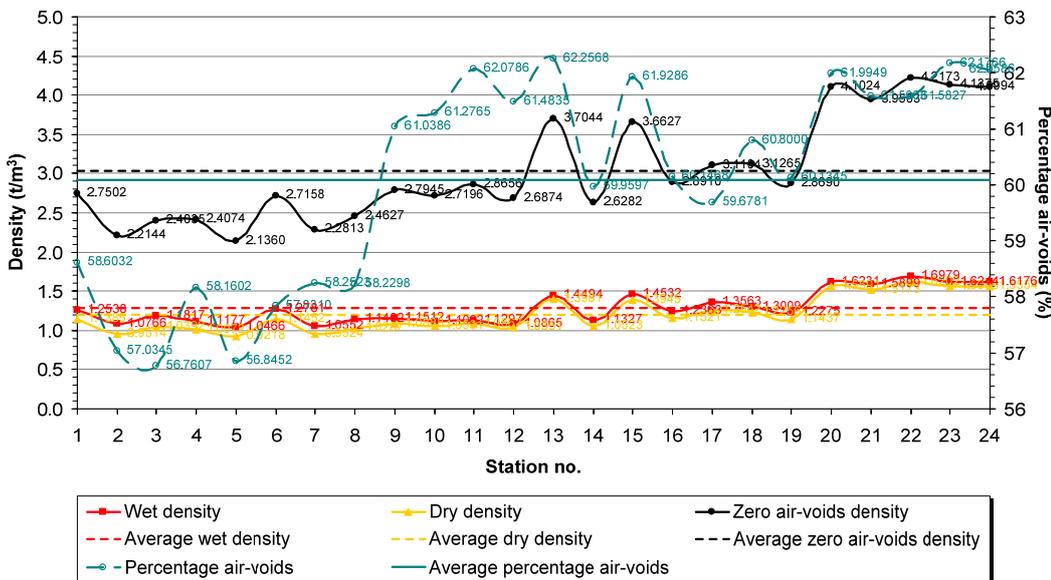
จากผลการทดสอบความแน่นของดินในสนามโดยวิธีแทนที่ทราย (Sand Replacement Method) ตามขอบอ่างเก็บน้ำ พบว่า อ่างกาฬสินธุ์มีความแน่นของดินบริเวณขอบอ่างมากที่สุดเฉลี่ย 1.33 ตัน ต่อ ลบ.ม. ส่วนอ่างอุดรธานีเหนือและอ่างมุกดาหาร จะมีความแน่นเฉลี่ยน้อยกว่า (1.20 และ 1.12 ตัน ต่อ ลบ.ม. ตามลำดับ)

เมื่อเปรียบเทียบผลความแน่นของดินในสนามกับความรุนแรงของการกัดเซาะและระดับการกระจายตัว แสดงให้เห็นว่า ความแน่นของดินบริเวณขอบอ่างมีผลต่อการกัดเซาะอย่างมาก นอกเหนือจากระดับการกระจายตัวของดิน อ่างกาฬสินธุ์ซึ่งมีความแน่นของดินบริเวณขอบอ่างสูง จะพบการกัดเซาะไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับอ่างมุกดาหารและอ่างอุดรธานีเหนือ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากดินบริเวณอ่างกาฬสินธุ์โดยการทดสอบทางกายภาพ ส่วนใหญ่เป็นดินไม่กระจายตัวอยู่แล้ว ดังนั้นการกัดเซาะจึงยิ่งเกิดขึ้นน้อยกว่าอ่างอื่น ๆ ซึ่งตรงข้ามกับอ่างอุดรธานีเหนือและอ่างมุกดาหาร ที่ดินส่วนใหญ่จำแนกเป็นดินกระจายตัวปานกลางไปจนถึงกระจายตัวรุนแรง ประกอบกับความแน่น

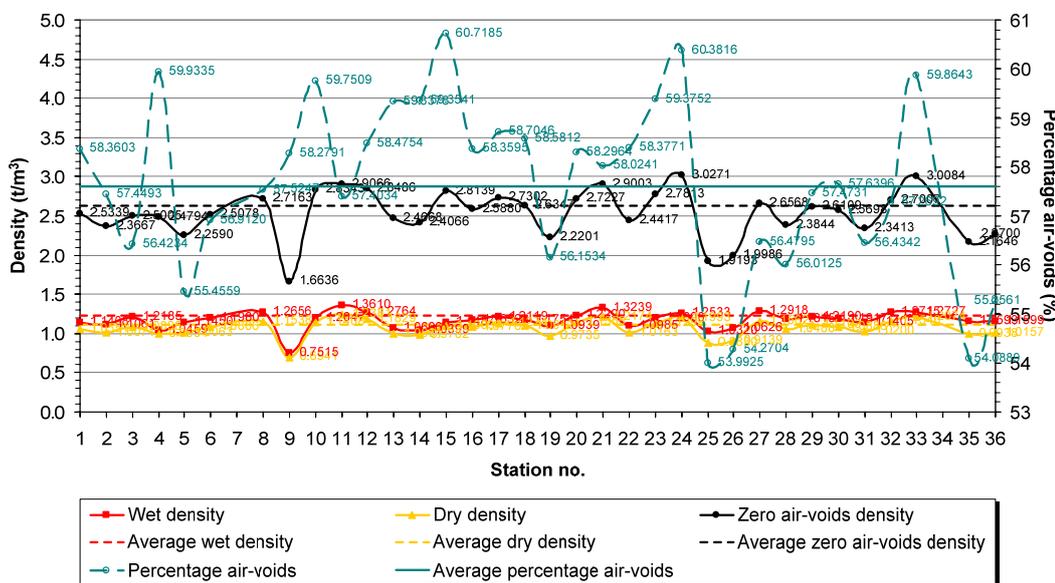


ภาพที่ 44 (ข) ความกว้างและความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก และแนวโน้มสัดส่วนความกว้างต่อความลึกเฉลี่ยของการกัดเซาะบริเวณกองดินถม และขอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ

ของดินบริเวณขอบอ่างต่ำกว่า และมีระยะทางตามแนวเฉียงตามขอบอ่างยาวกว่า จึงทำให้มีความรุนแรงของการกัดเซาะมากกว่า ภาพที่ 45(ก) ถึง 45(จ) และตารางที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง ความหนาแน่นเปียก และความหนาแน่นช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ของดินบริเวณขอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ และบนกองดินถม

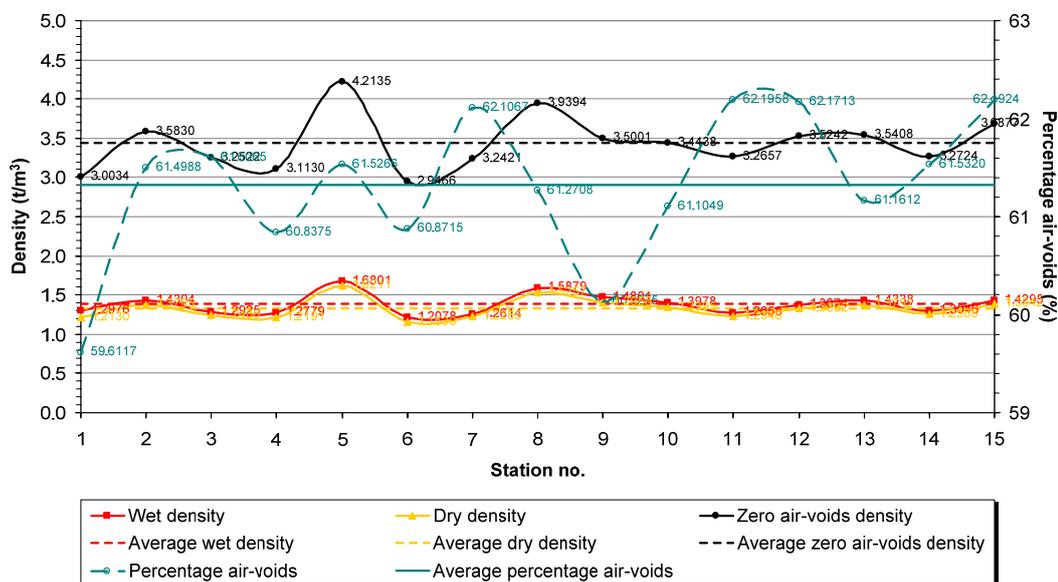


(ก) อ่างอุตรธานีเหนือ

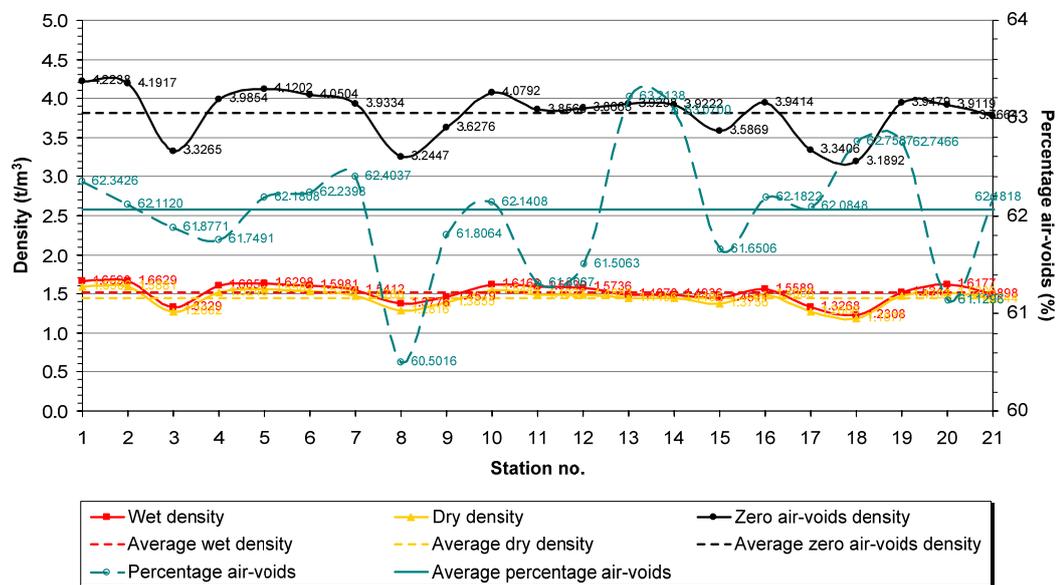


(ข) อ่างมุกดาหาร

ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเปียก ความหนาแน่นแห้ง และความหนาแน่นช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ จากการทดสอบความแน่นของดินในสนาม โดยวิธีแทนที่ทราย

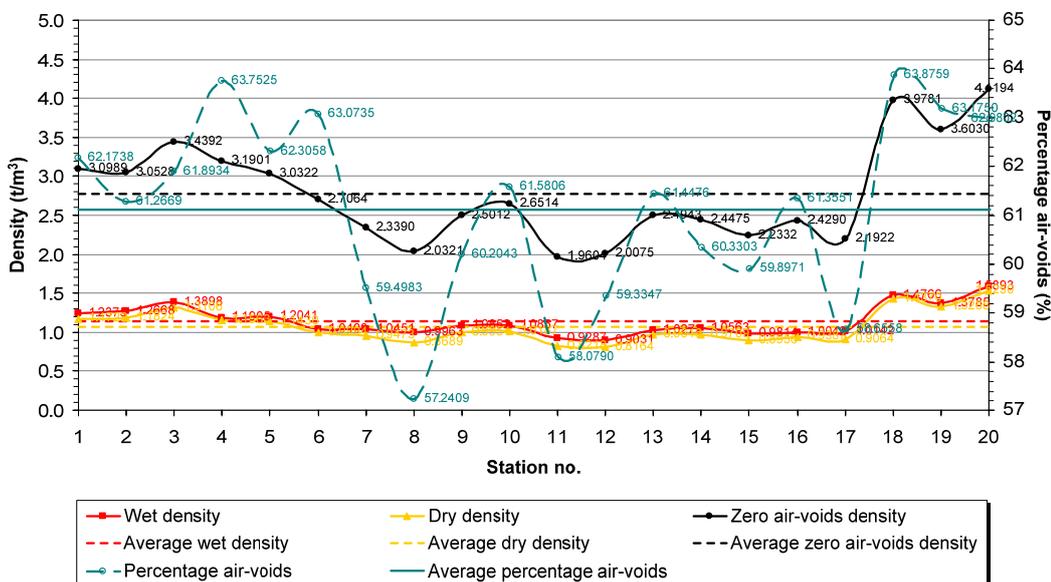


(ค) อ่างกาฬสินธุ์

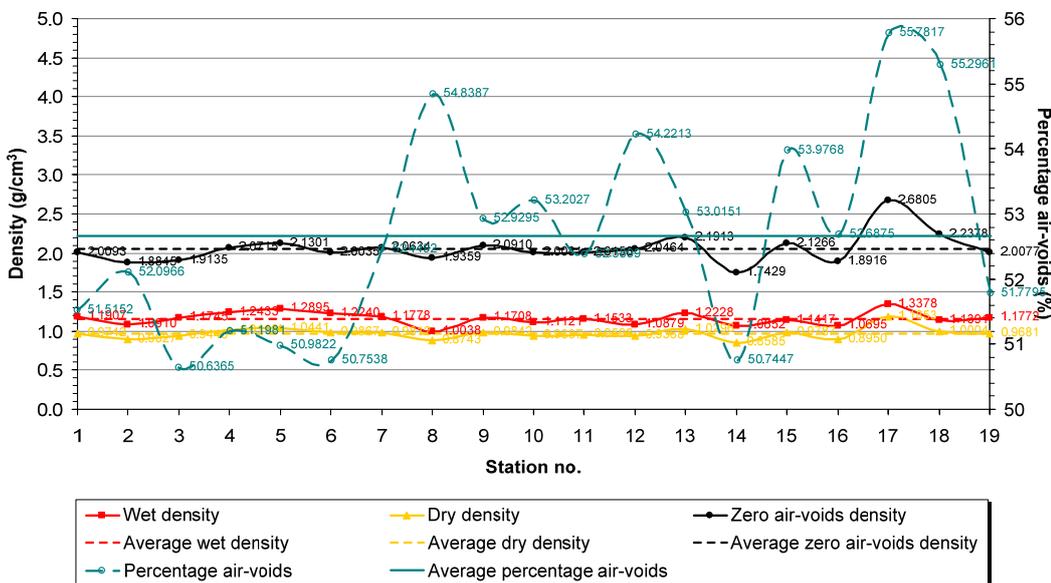


(ง) อ่างอุครธานีใต้

ภาพที่ 45 (ต่อ)



(จ) อ่างสกลนคร



(ข) กองดินถมข้างอ่างอุตรธานีเหนือ

ภาพที่ 45 (ต่อ)

ตารางที่ 10 สรุปความหนาแน่นเปียก ความหนาแน่นแห้ง และความหนาแน่นช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ จากการทดสอบ โดยวิธีแทนที่ทราย (Sand Replacement Method) บริเวณขอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ และบนกองดินถม

| อ่างเก็บน้ำ/ กองดินถม | ความแน่นของดินในสนาม (ตัน ต่อ ลบ.ม.) | | | | | | ความหนาแน่นช่องว่างอากาศ | | | เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ | | | เปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินตามธรรมชาติ (w_n) | | |
|--------------------------|--------------------------------------|--------|--------|--|--------|--------|---------------------------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|--|--------|--------|
| | ความหนาแน่นเปียก (γ_w) | | | ความหนาแน่นแห้ง ($\gamma_{d, \text{field}}$) | | | เป็นศูนย์ (ตัน ต่อ ลบ.ม.) | | | | | | | | |
| | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย |
| กองดินถม | 1.00 | 1.34 | 1.16 | 0.86 | 1.19 | 0.97 | 1.74 | 2.68 | 2.06 | 50.64 | 55.78 | 52.66 | 12.87 | 24.34 | 19.67 |
| อุดรธานีเหนือ | 1.05 | 1.70 | 1.29 | 0.92 | 1.62 | 1.20 | 2.14 | 4.22 | 3.04 | 56.76 | 62.26 | 60.08 | 3.67 | 13.70 | 7.53 |
| อุดรธานีใต้ | 1.23 | 1.66 | 1.52 | 1.19 | 1.59 | 1.45 | 3.19 | 4.22 | 3.81 | 60.50 | 63.21 | 62.06 | 2.88 | 7.49 | 4.81 |
| กาฬสินธุ์ | 1.21 | 1.68 | 1.38 | 1.15 | 1.62 | 1.33 | 2.95 | 4.21 | 3.44 | 59.61 | 62.20 | 61.32 | 2.53 | 6.97 | 4.01 |
| มุกดาหาร | 0.75 | 1.36 | 1.17 | 0.69 | 1.24 | 1.07 | 1.66 | 3.03 | 2.53 | 53.99 | 60.72 | 57.66 | 3.92 | 16.87 | 9.54 |
| สกลนคร | 0.90 | 1.59 | 1.15 | 0.82 | 1.53 | 1.07 | 1.96 | 4.12 | 2.78 | 57.24 | 63.88 | 61.11 | 2.76 | 14.67 | 7.51 |

6.5 ความขุ่น ค่าความเป็นกรดด่าง และความลึกของน้ำในอ่างเก็บน้ำ

การวัดความขุ่นและหาความลึกของน้ำในอ่างกระทำโดยการหย่อนดิ่งตามแนวเส้นกริดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ได้กำหนดไว้แล้วตามอัตราส่วนจริงในสนาม และสุ่มเลือกบางจุดสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำ เพื่อนำไปวัดความขุ่นและหาค่าความเป็นกรดด่างในห้องปฏิบัติการ ระยะห่างของเส้นกริดแต่ละเส้นจะถูกกำหนดโดยพิจารณาจากบริเวณที่ลำนํ้ามีความกว้างน้อยที่สุด เพื่อให้สามารถเก็บความลึกของน้ำในอ่างได้ละเอียดในทุก ๆ ช่วงของลำนํ้า ผลการวัดความขุ่นของน้ำในอ่างในช่วงเดือนพฤษภาคม 2550 พบว่า น้ำในอ่างอุตรธานีเหนือมีความขุ่นเฉลี่ยมากที่สุด (327.81 NTU) ส่วนอ่างมุกดาหาร อ่างกาฬสินธุ์ อ่างสกลนคร และอ่างนครพนม มีความขุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 2.98, 10.33, 22.40 และ 7.56 NTU ตามลำดับ แต่ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำแต่ละอ่าง จะไม่แตกต่างกันมากนัก โดยจะมีค่าเป็นกลาง (pH ประมาณ 7)

จากการวัดความลึกของน้ำในอ่างในช่วงเดือนพฤษภาคม 2550 ซึ่งเป็นช่วงหน้าแล้ง ระดับน้ำในอ่างจึงไม่สูงมากนัก ซึ่งจะถูกกำหนดให้เป็นระดับเก็บกักปานกลาง (Intermediat Water Level, I.W.L.) จากการสำรวจ พบว่า ระดับผิวน้ำในอ่างจะอยู่ระหว่าง 157 ถึง 161 เมตร รทก. ส่วนความลึกเฉลี่ยของก้นอ่าง (Bottom Level) ในทุก ๆ แนวเส้นกริดจากระดับผิวน้ำมีค่าประมาณ 0.84, 1.26, 2.05, 2.99 และ 3.39 เมตร สำหรับอ่างกาฬสินธุ์ อ่างมุกดาหาร อ่างอุตรธานีเหนือ อ่างสกลนคร และอ่างนครพนม ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความลึกของก้นอ่าง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ พบว่า อ่างกาฬสินธุ์ อ่างอุตรธานีเหนือ และอ่างสกลนคร มีห้องอ่างที่ไม่สมมาเสมอ ซึ่งต่างจากอ่างมุกดาหารและอ่างนครพนม ดังแสดงในภาพที่ 46 ถึง 50 สำหรับอ่างเก็บน้ำอื่น ๆ แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 11

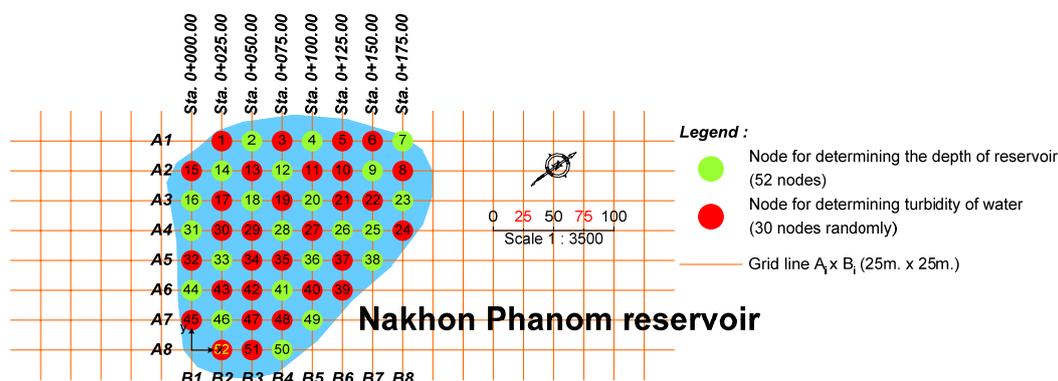
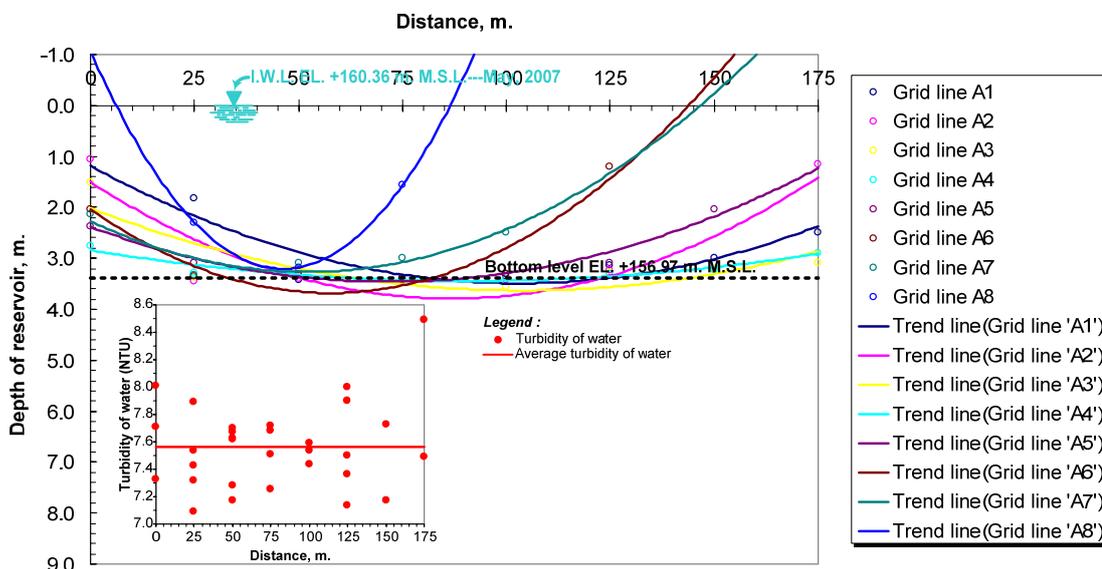
ตารางที่ 11 สรุปค่าความขุ่น ค่าความเป็นกรดด่าง และความลึกเฉลี่ยของอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ (พฤษภาคม 2550)

| อ่างเก็บน้ำ | คุณภาพของน้ำในอ่างเก็บน้ำ | | ระดับผิวน้ำ (เมตร รทก.) | ระดับก้นอ่าง (เมตร รทก.) | ความลึกอ่าง (เมตร) |
|---------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| | ความขุ่น (NTU) ^{1/} | ความเป็นกรดด่าง | | | |
| อุตรธานีเหนือ | 327.81 | 7.01 | +158.89 | +156.84 | 2.05 |
| อุตรธานีใต้ | 223.73 | - | - | - | 1.95 |
| กาฬสินธุ์ | 10.33 | 6.52 | +158.55 | +157.71 | 0.84 |
| มุกดาหาร | 2.98 | 7.39 | +159.64 | +158.38 | 1.26 |
| สกลนคร | 22.40 | 6.92 | +160.36 | +157.37 | 2.99 |

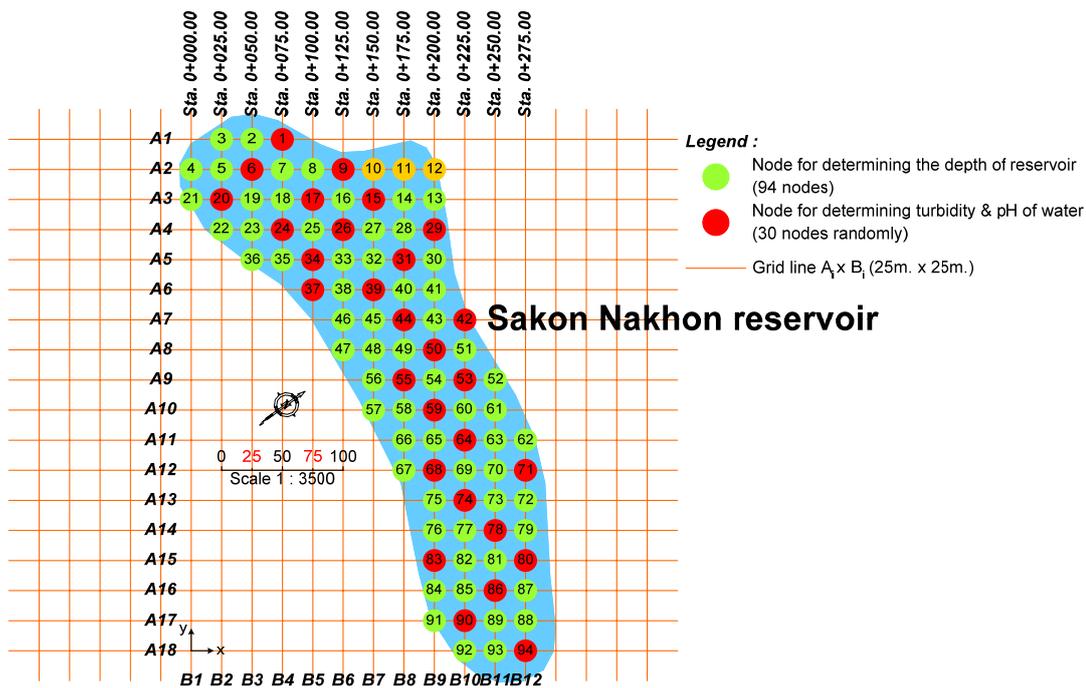
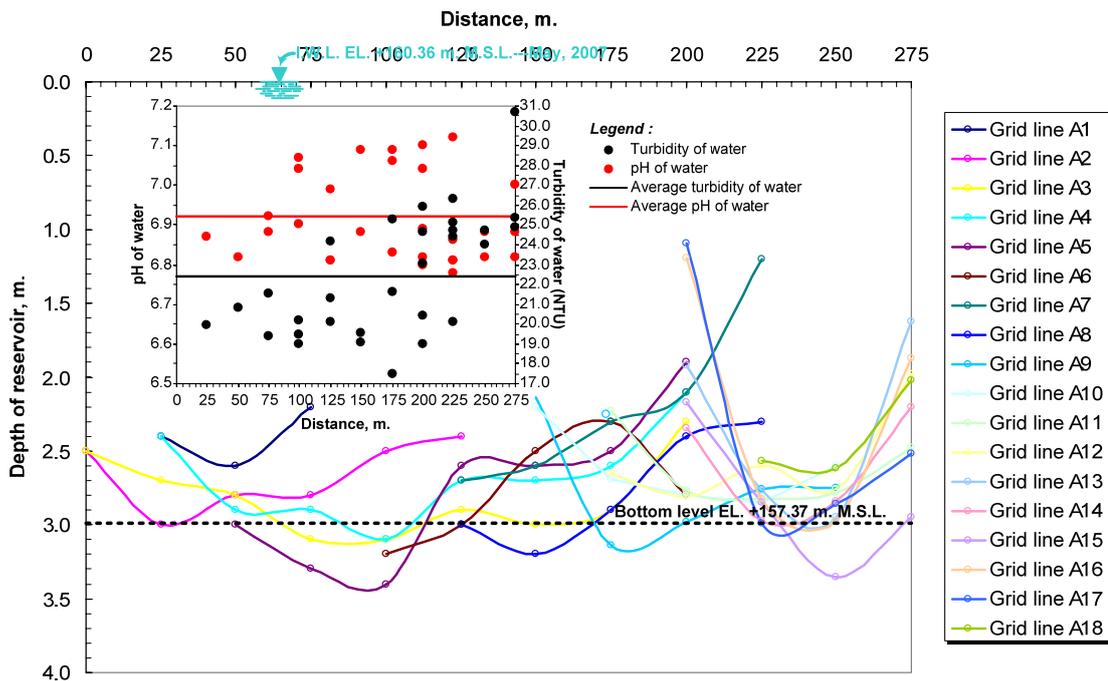
ตารางที่ 11 (ต่อ)

| อ่างเก็บน้ำ | คุณภาพของน้ำในอ่างเก็บน้ำ | | ระดับผิวน้ำ (เมตร รทก.) | ระดับก้นอ่าง (เมตร รทก.) | ความลึกอ่าง (เมตร) |
|-------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| | ความขุ่น (NTU) ^{1/} | ความเป็นกรดด่าง | | | |
| นครพนม | 7.56 | - | +160.36 | +156.97 | 3.39 |
| หนองคาย | 3.17 | - | - | - | 2.66 |

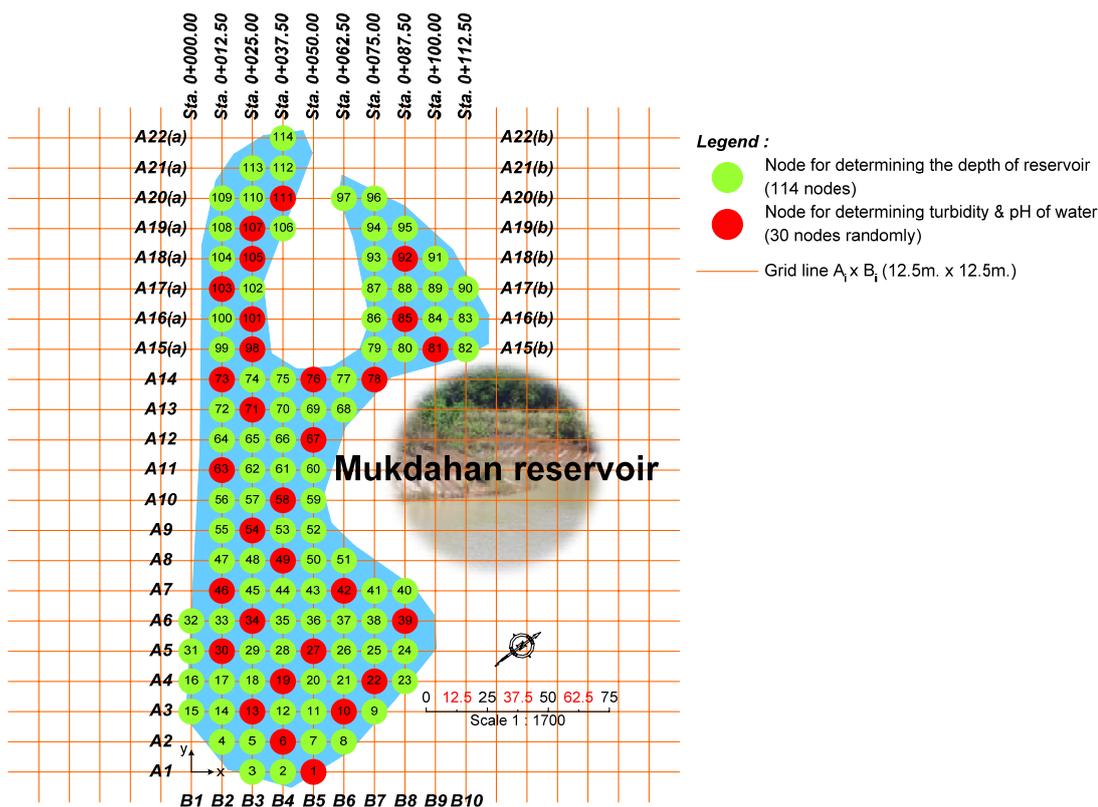
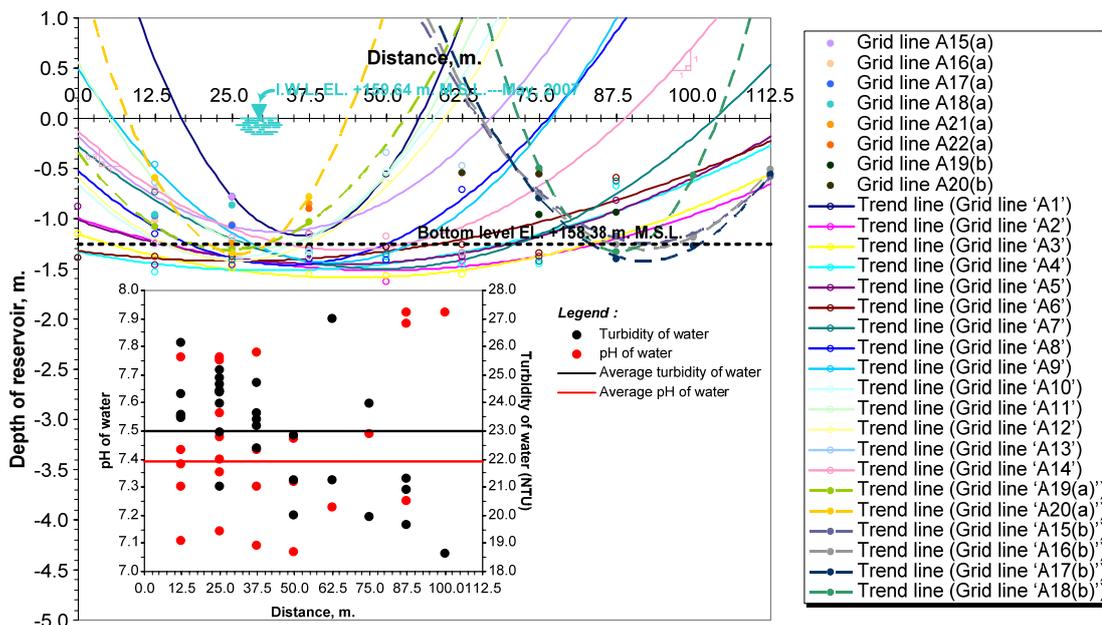
หมายเหตุ ^{1/} NTU (Nephelometric Turbidity Unit) เป็นหน่วยวัดความขุ่นที่ได้จากการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Nephelometer โดยการวัดปริมาณแสงที่ส่องกระทบความขุ่นและสะท้อนออกมาในทิศทางตั้งฉากกับลำแสง (Nephelometry) (มันสิน, 2546)



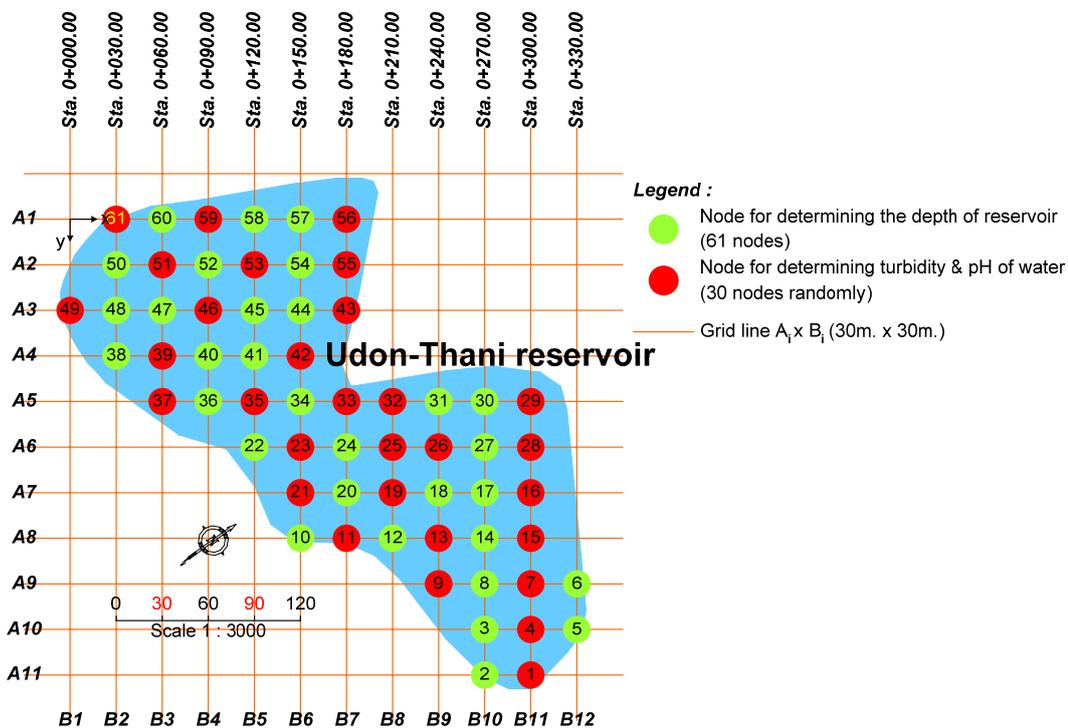
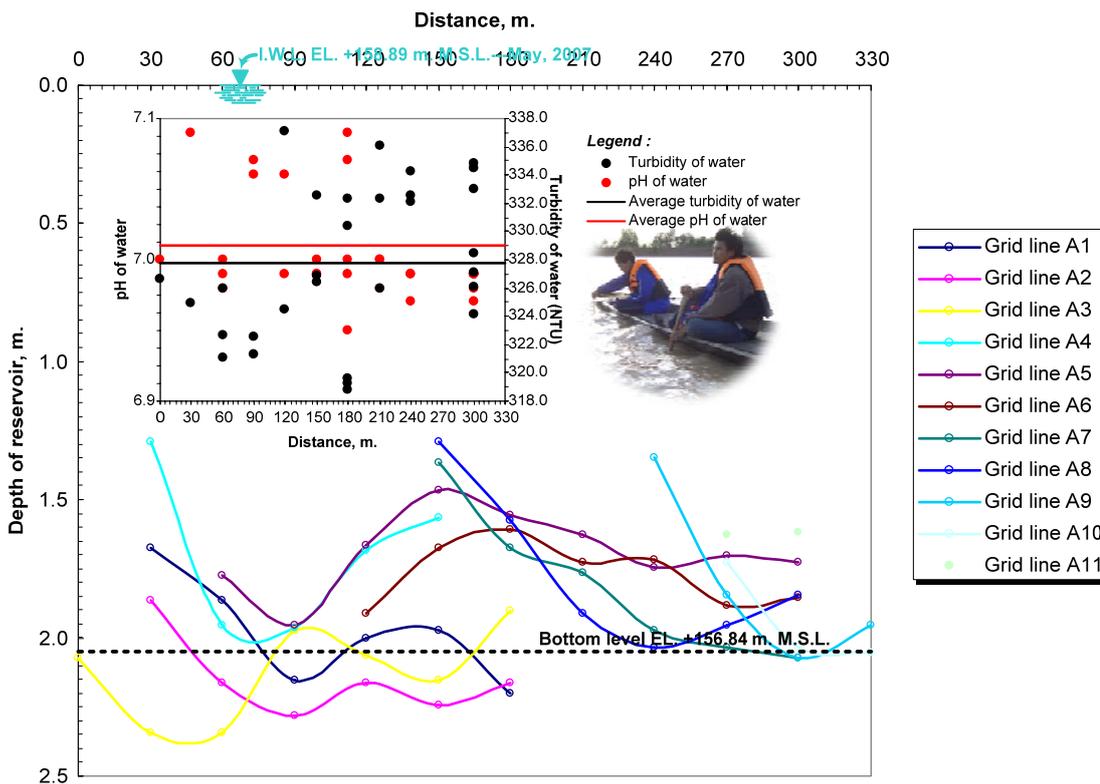
ภาพที่ 46 ระดับก้นอ่างและระดับผิวน้ำโดยเฉลี่ย หน้าตัดของท้องคลองโดยประมาณตามแนวเส้นกริด A-A และคุณภาพของน้ำในอ่างนครพนม (พฤษภาคม 2550)



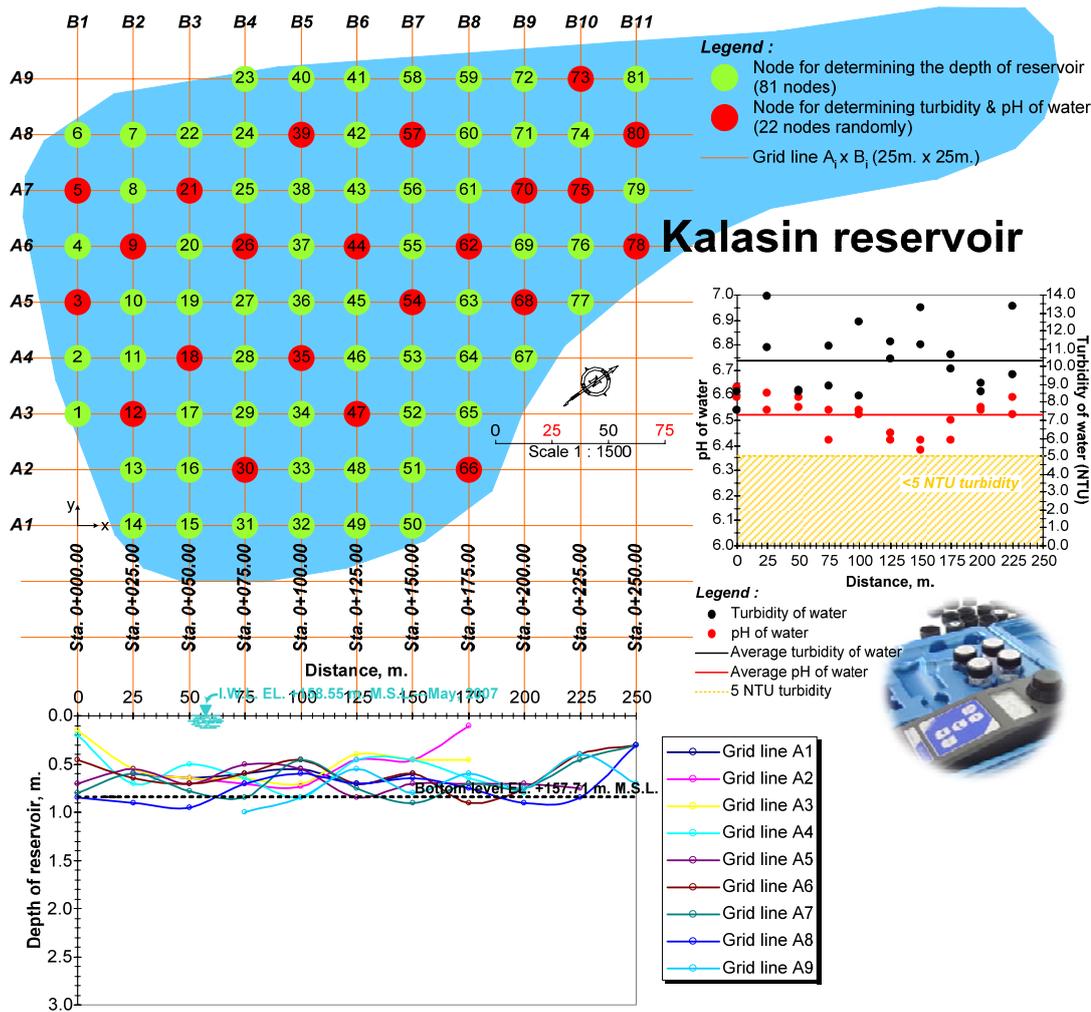
ภาพที่ 47 ระดับก้นอ่างและระดับผิวน้ำโดยเฉลี่ย หน้าตัดของท้องคลองโดยประมาณตามแนวเส้นกริด A-A และคุณภาพของน้ำในอ่างสกลนคร (พฤษภาคม 2550)



ภาพที่ 48 ระดับก้นอ่างและระดับผิวน้ำโดยเฉลี่ย หน้าตัดของท้องคลองโดยประมาณตามแนวเส้นกริด A-A และคุณภาพของน้ำในอ่างมุกดาหาร (พฤษภาคม 2550)



ภาพที่ 49 ระดับก้นอ่างและระดับผิวน้ำโดยเฉลี่ย หน้าที่ตั้งของท้องคลองโดยประมาณตามแนวเส้นกริด A-A และคุณภาพของน้ำในอ่างอุตรธานีเหนือ (พฤษภาคม 2550)



ภาพที่ 50 ระดับก้นอ่างและระดับผิวน้ำโดยเฉลี่ย หน้าตัดของท้องคลองโดยประมาณตามแนวเส้นกริด A-A และคุณภาพของน้ำในอ่างกาฬสินธุ์ (พฤษภาคม 2550)

จากตารางที่ 11 สรุปได้ว่าอ่างนครพนมมีความลึกสูงที่สุด รองลงมาคือ อ่างสกลนคร อ่างหนองคาย อ่างอุดรธานีเหนือ อ่างอุดรธานีใต้ อ่างมุกดาหาร และอ่างกาฬสินธุ์ ตามลำดับ นอกจากนี้ถ้าเราทราบพื้นที่ผิวน้ำของอ่างเก็บน้ำ จะทำให้สามารถคำนวณความจุโดยประมาณของอ่างเก็บน้ำในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ที่ทำการศึกษาได้อีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 12

6.6 ชั้นดินกระจายตัวจากผลทดสอบ Double Hydrometer Test

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการกระจายตัวของดินกับความลึกที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างที่เก็บบริเวณอ่างอุดรธานีเหนือและอ่างกาฬสินธุ์ ซึ่งห่างกันประมาณ 3 กิโลเมตร แสดงดังภาพที่ 51(ก)

ตารางที่ 12 พื้นที่ผิวน้ำและความจุโดยประมาณของอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ภายในวิทยาเขต (พฤษภาคม 2550)

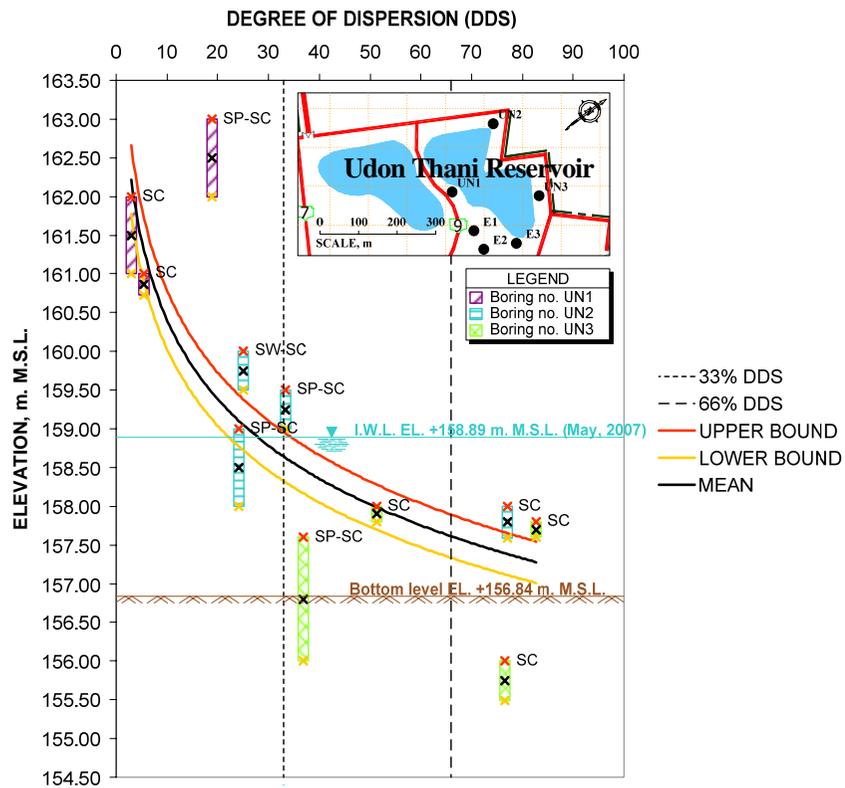
| อ่างเก็บน้ำ | พื้นที่ผิวน้ำโดยประมาณ (ตารางเมตร) | ระดับผิวน้ำเฉลี่ย ^{1/} (เมตร รทก.) | ระดับก้นอ่างเฉลี่ย (เมตร รทก.) | ความลึกของอ่างโดยประมาณ (เมตร) | | | ความจุของอ่างโดยประมาณ (ลูกบาศก์เมตร) |
|---------------|---------------------------------------|--|-----------------------------------|--------------------------------|--------|--------|--|
| | | | | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | |
| อุดรธานีเหนือ | 56,000 | +158.89 | +156.84 | 1.29 | 2.35 | 2.05 | 114,000 |
| อุดรธานีใต้ | 56,000 | - | - | 0.45 | 2.35 | 1.95 | 109,000 |
| กาฬสินธุ์ | 66,000 | +158.55 | +157.71 | 0.10 | 1.00 | 0.84 | 55,000 |
| มุกดาหาร | 18,000 | +159.64 | +158.38 | 0.34 | 1.63 | 1.26 | 22,000 |
| สกลนคร | 61,000 | +160.36 | +157.37 | 1.09 | 3.40 | 2.99 | 182,000 |
| นครพนม | 32,000 | +160.36 | +156.97 | 1.05 | 3.57 | 3.39 | 108,000 |
| หนองคาย | 40,000 | - | - | 1.06 | 3.03 | 2.66 | 106,000 |
| รวม | 329,000 | | | | | | 696,000 |

หมายเหตุ ^{1/} ระดับผิวน้ำเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำฝนและน้ำท่า (Run off) ที่ไหลลงอ่าง ในขณะที่ระดับก้นอ่างคงที่ ดังนั้นหากต้องการทราบความจุของอ่างโดยประมาณ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ๆ เพียงแค่หาระดับผิวน้ำในช่วงเวลานั้นลบด้วยระดับก้นอ่าง ก็จะได้ความลึกของอ่างหรือความลึกของน้ำในอ่างขณะนั้น เมื่อนำไปคูณกับพื้นที่ผิวน้ำ จะทำให้ทราบความจุของอ่างโดยประมาณในช่วงเวลานั้นได้

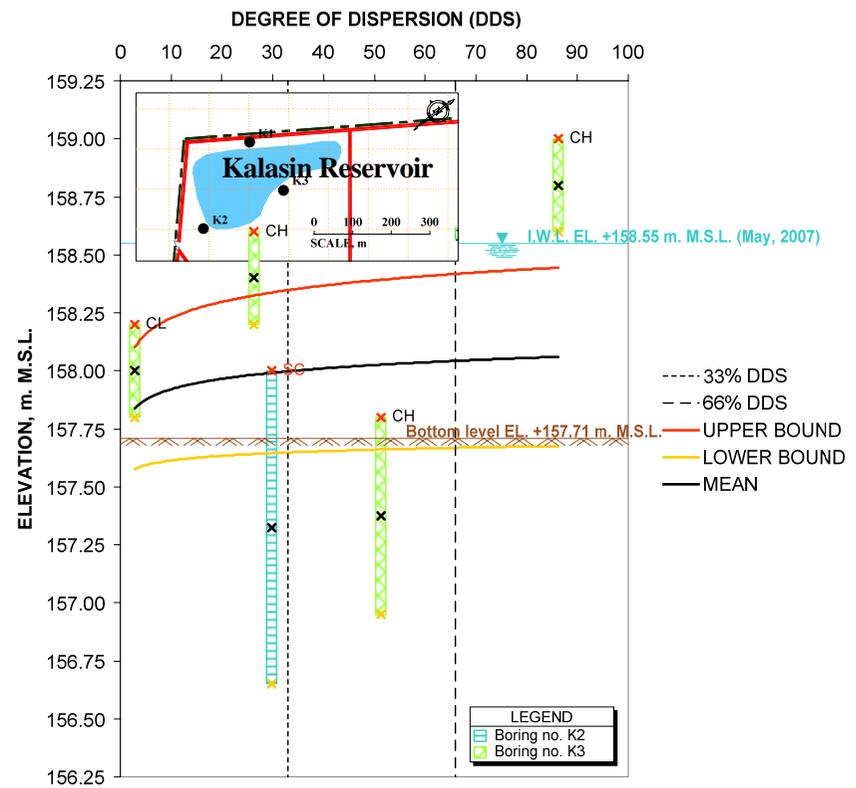
และ 51(ข) ตามลำดับ ระดับการกระจายตัวของดินบริเวณอ่างอุครธานีเหนือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยจะเริ่มเป็นดินกระจายตัวที่ระดับประมาณ 158.0 เมตร รทก. ลงไป ส่วนอ่างกาฬสินธุ์มีแนวโน้มลดลงตามความลึก โดยระดับที่เป็นดินกระจายตัว จะอยู่ที่ระดับประมาณ 158.6 เมตร รทก. ขึ้นไป เป็นดินที่มีระดับการกระจายตัวสูง (DDS มากกว่า 66 เปอร์เซ็นต์) ส่วนดินชั้นล่างลงไปถึงระดับประมาณ 157.8 เมตร รทก. เป็นดินที่ไม่กระจายตัว (DDS น้อยกว่า 33 เปอร์เซ็นต์) หลังจากนั้นดินจะเริ่มมีการกระจายตัวสูงขึ้นอีกครั้ง แต่เนื่องจากระดับผิวน้ำในขณะนั้น (มีนาคม 2549) และระดับกันอ่างอยู่ระหว่างชั้นดินที่ไม่กระจายตัว อ่างกาฬสินธุ์จึงไม่มีปัญหาน้ำขุ่น จะพบก็แต่เพียงการกัดเซาะเล็กน้อยในบางจุดเท่านั้น

ระดับที่ดินกระจายตัวและความลึกของอ่างเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งจะช่วยในการประเมินแนวโน้มของดินบริเวณรอบอ่างที่ลึกลงไปมากกว่าที่จะสำรวจว่า มีระดับของการกระจายตัวเป็นอย่างไร เพราะในความเป็นจริงเราไม่สามารถที่จะเจาะดินให้มีความลึกเท่าที่ต้องการได้ เนื่องจากบางครั้งอาจพบชั้นหินแข็งหรือแม่รังวางตัวแทรกอยู่ตอนบนของชั้นดินเหนียวกระจายตัว นอกจากนี้ยังทำให้ทราบว่า ชั้นดินกระจายตัวอยู่ที่ระดับต้นหรือลึกกว่าระดับกันอ่าง ทำให้เราสามารถคาดคะเนพฤติกรรมของดินในสนามได้อย่างถูกต้อง

ภาพที่ 51(ค) แสดงให้เห็นว่า บริเวณกองดินถมข้างอ่างอุครธานีเหนือมีระดับการกระจายตัวค่อนข้างสูง และดินส่วนใหญ่จำแนกทางวิศวกรรมในระบบ USCS ได้เป็นดินทรายปนดินเหนียวสันนิษฐานว่า น่าจะเป็นดินที่ได้จากการขุดอ่างอุครธานีเหนือ เนื่องจากเป็นบริเวณเดียวในวิทยาเขตที่พบดินทรายปนดินเหนียวมากกว่าในบริเวณอื่น ๆ และจากลักษณะการขุดดินมากองทิ้งไว้ ชั้นดินกระจายตัวซึ่งอยู่ที่ความลึกมาก ๆ จะถูกกองรวมกันอยู่ที่ผิวด้านบนของกองดินถม ซึ่งสอดคล้องกับระดับการกระจายตัวที่คำนวณได้จากการทดสอบ DHT อย่างไรก็ตาม ในบางบริเวณอาจจำแนกเป็นดินที่ไม่กระจายตัว เนื่องจากความไม่แน่นอนของการขุดดินขึ้นมากองทิ้งไว้ หรืออาจเกิดจากน้ำฝนชะเอาดินส่วนละเอียดที่ผิวดินไหลลงอ่างเก็บน้ำหรือแหล่งน้ำที่อยู่ข้างเคียง ส่วนระดับการกระจายตัวของดินบริเวณอ่างสกลนครและอ่างมุกดาหาร พบว่า จะเพิ่มขึ้นตามความลึกเช่นเดียวกับอ่างอุครธานีเหนือ ดังแสดงในภาพที่ 51(จ) และ 51(ฉ) ซึ่งตรงข้ามกับดินบริเวณอ่างนครพนมที่มีแนวโน้มลดลงตามความลึก ดังแสดงในภาพที่ 51(ง) อย่างไรก็ตาม ชั้นดินบริเวณอ่างสกลนครยังมีความซับซ้อนและมีระดับของการกระจายตัวที่แตกต่างกันมาก แม้ว่าจะเป็นชั้นดินที่อยู่ใกล้กันก็ตาม ดังนั้นการนำดินในบริเวณนี้ไปใช้งาน จำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติการกระจายตัวของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นดินกระจายตัวรุนแรง จะต้องปรับปรุงคุณภาพให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเสียก่อน

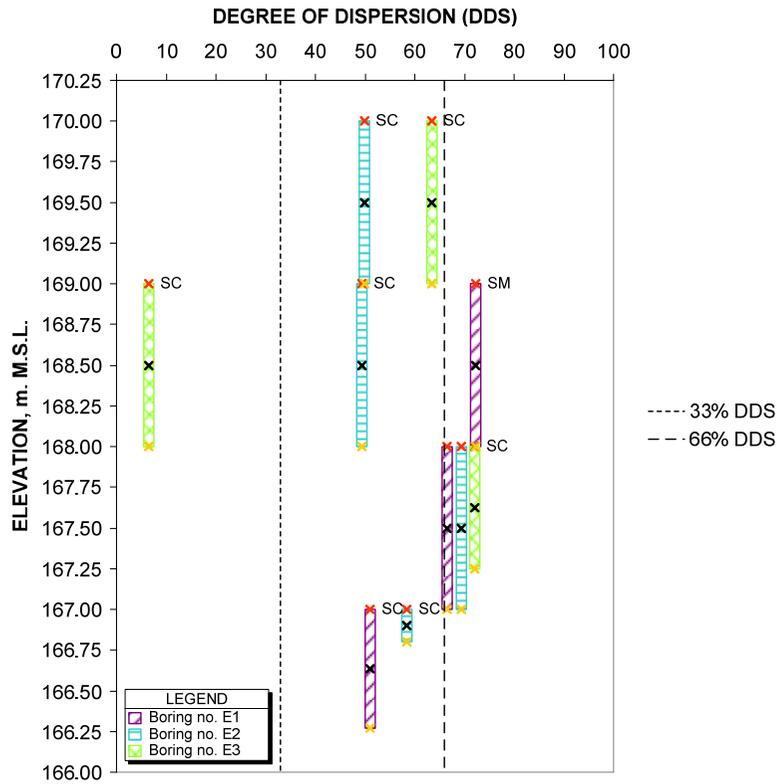


(ก) อ่างอุตรธานีเหนือ

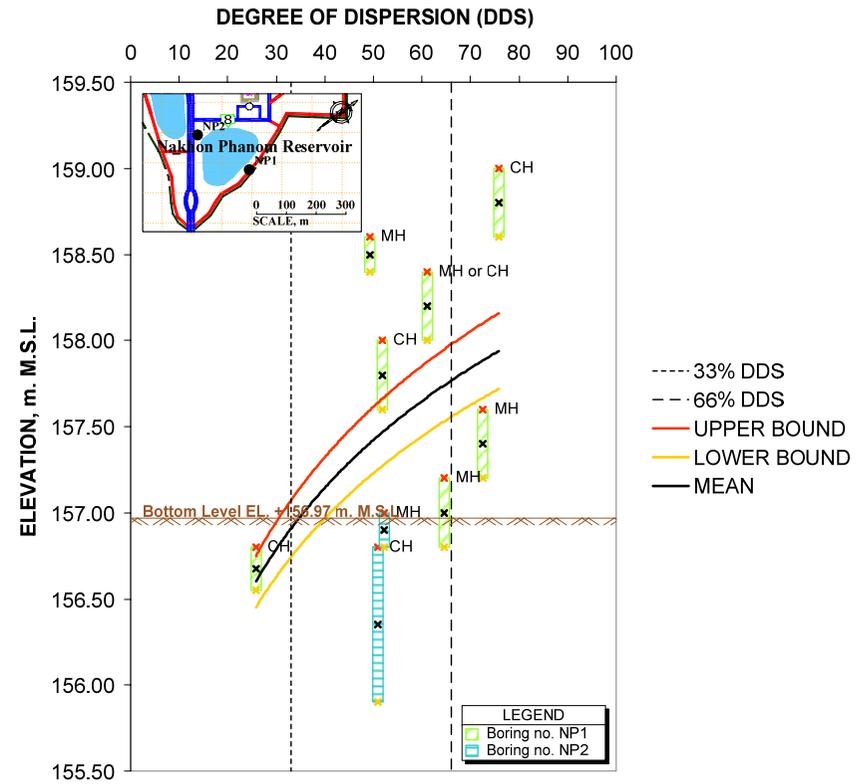


(ข) อ่างกาฬสินธุ์

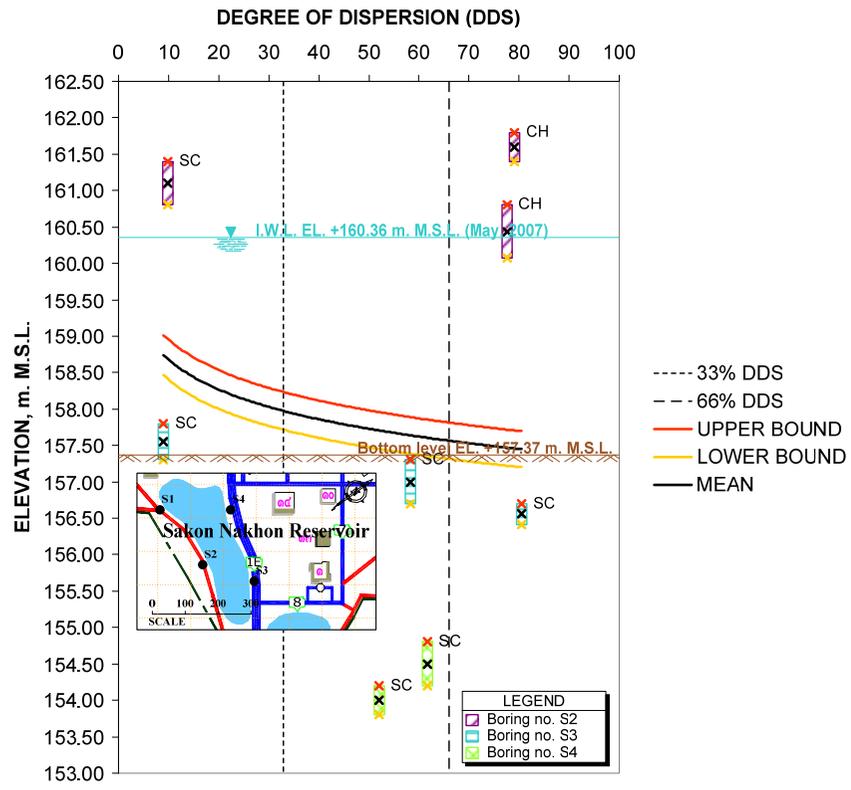
ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างแนวโน้มของชั้นดินกระจายตัวรอบอ่างเก็บน้ำ กลุ่มดินในระบบ USCS ระดับผิวน้ำและระดับก้นอ่าง (พฤษภาคม 2550) จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการสำรวจภาคสนาม



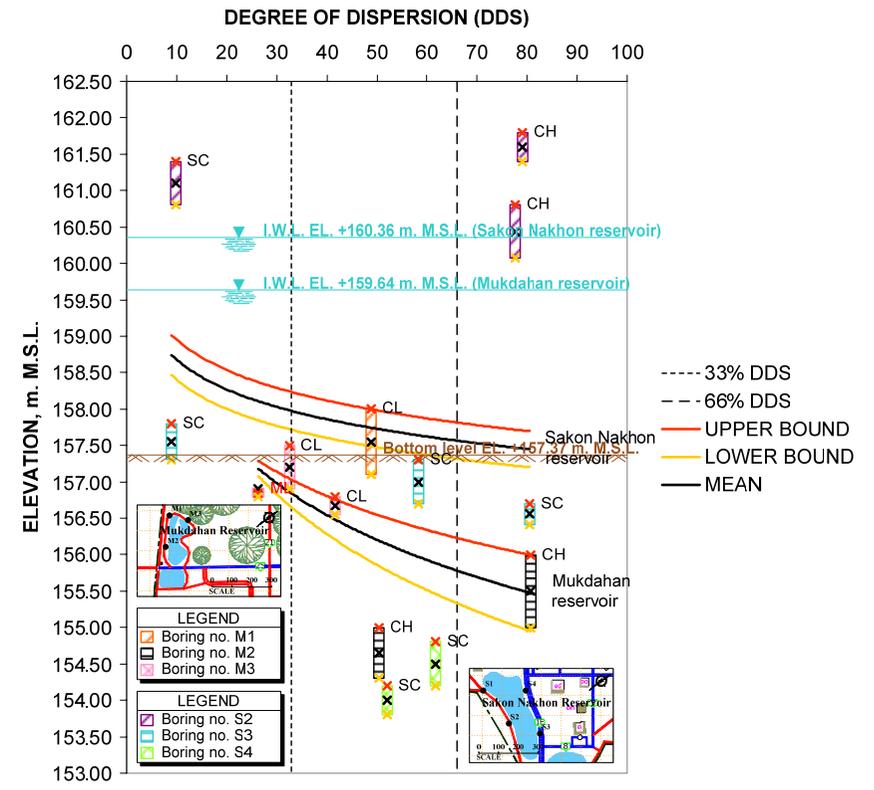
(ค) กองดินถมข้างอ่างอุครธานีเหนือ



(ง) อ่างนครพนม



(จ) อ่างสกลนคร



(ฉ) อ่างสกลนครและอ่างมุกดาหาร

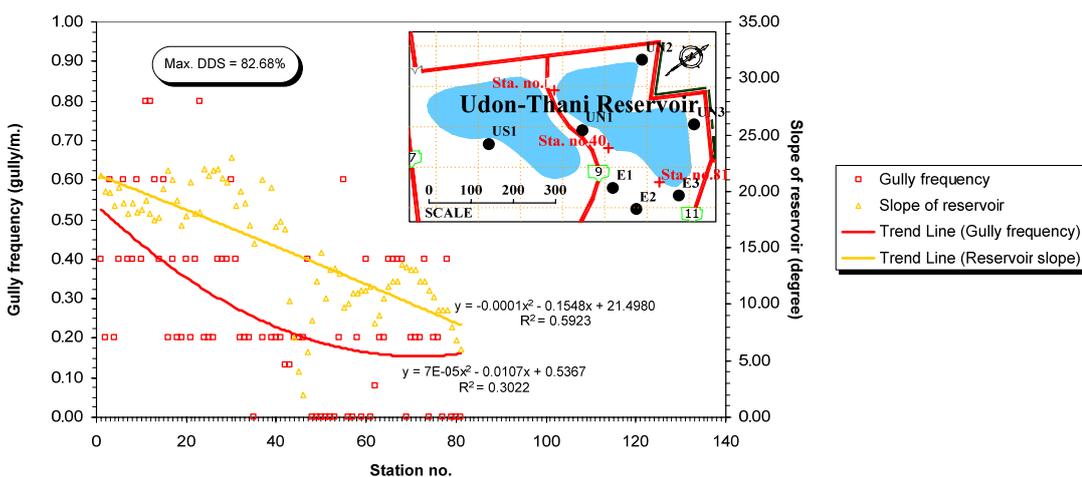
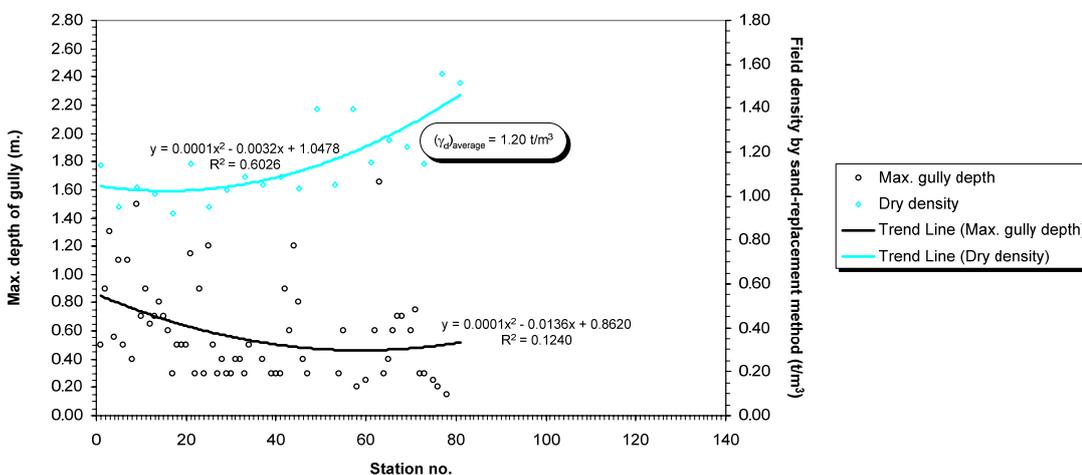
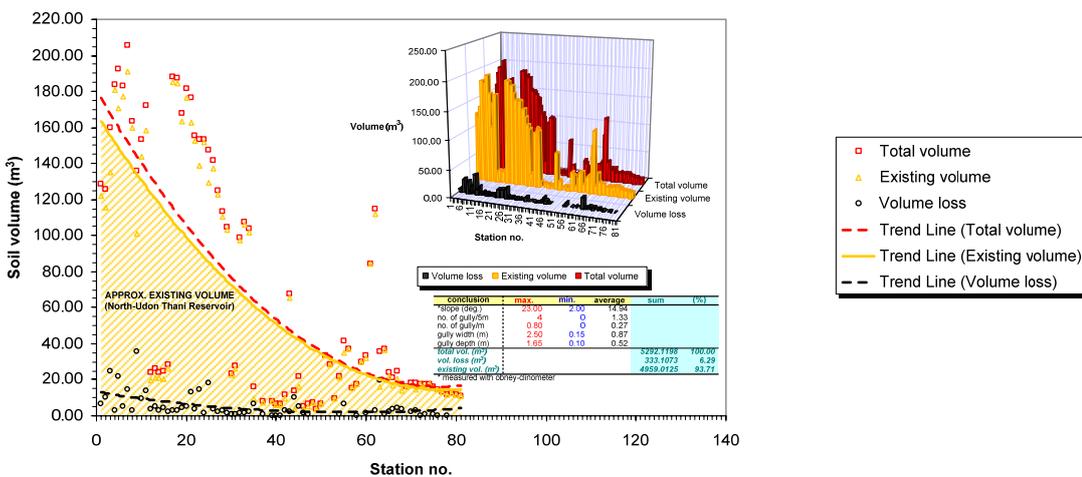
ภาพที่ 51 (ต่อ)

6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกและความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และความแน่นของดินขอบอ่างกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ

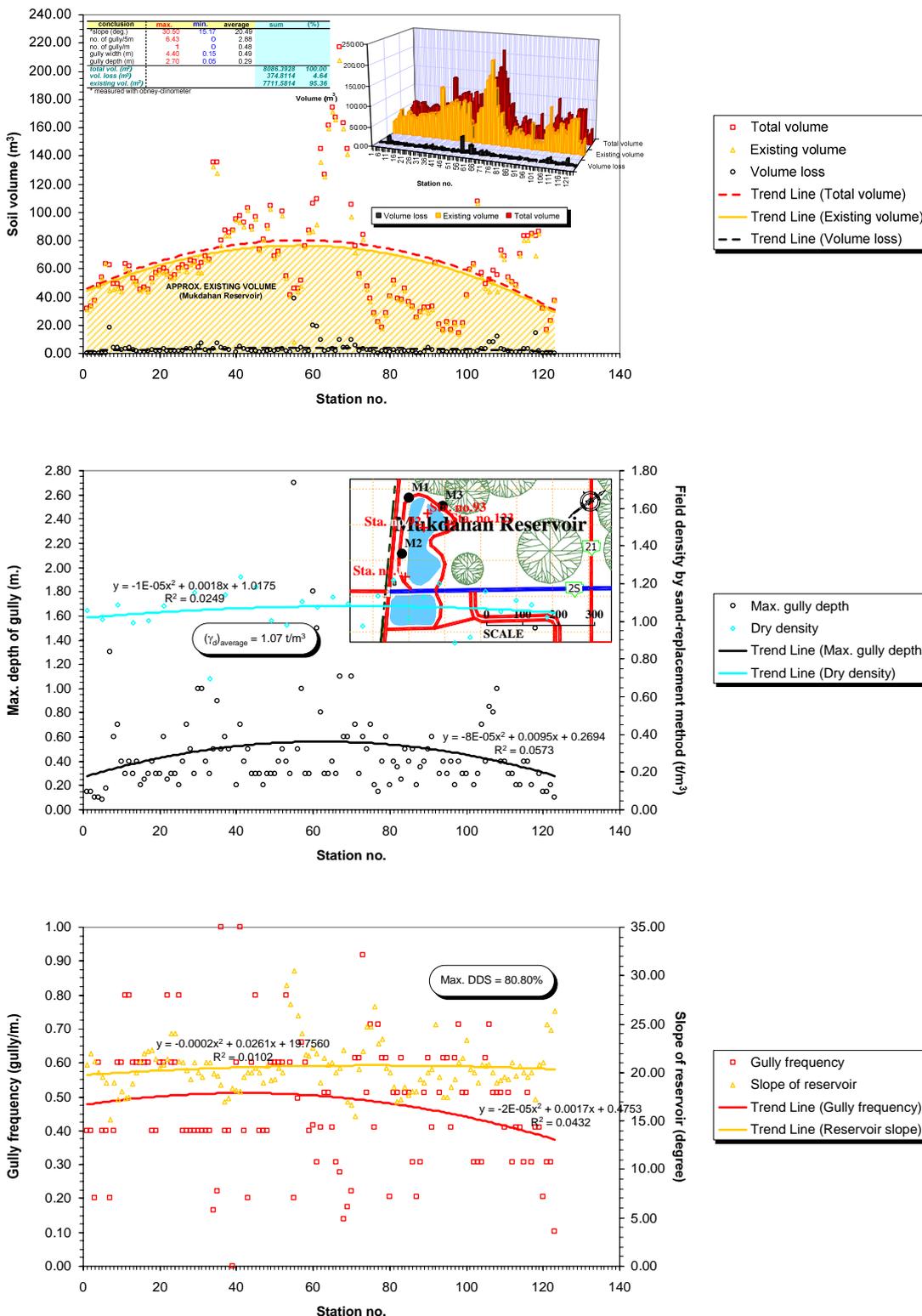
จากการประมาณปริมาตรของดินที่สูญเสียไปเนื่องจากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำลึก โดยใช้สมมติฐานที่กล่าวในหัวข้อ 6.2 จะทำให้สามารถคำนวณปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณได้ ภาพที่ 52 ถึง 56 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความแน่นของดินบริเวณขอบอ่างเพิ่มขึ้น จะทำให้ความลึกและความถี่ของการกัดเซาะลดลง ในขณะที่เมื่อความลาดชันบริเวณขอบอ่างค่อย ๆ ลดลง ส่งผลให้ปริมาตรของดินที่ถูกกัดเซาะลดลงตามไปด้วย สำหรับอ่างอุครธานีเหนือจะเป็นตัวแทนที่ดีที่สุดในการอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าว เนื่องจากความลาดชันบริเวณขอบอ่างที่เก็บได้ในช่วงกว้าง ตั้งแต่ 2 องศาไปจนถึง 23 องศา กับแนวราบ ทำให้เห็นความแตกต่างของความลึกและความถี่ของการกัดเซาะได้อย่างชัดเจนเมื่อความแน่นของดินบริเวณขอบอ่างเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตาม ในบางอ่างเก็บน้ำ ความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจไม่เป็นดังที่กล่าวข้างต้นและยังมีความแปรปรวนอยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องจากผลของแฟกเตอร์อื่น ๆ เช่น ระดับการกระจายตัวของดินและปริมาณของพืชที่ปกคลุมดินในแต่ละบริเวณ โดยเฉพาะหญ้าแฝก (Vetiver Grass) นั้น ไม่สามารถที่จะศึกษาและประเมินแนวโน้มซึ่งสัมพันธ์กับปริมาตรของการกัดเซาะได้ เนื่องจากลักษณะการปลูกหญ้าแฝกบริเวณขอบอ่างเก็บน้ำไม่เป็นระเบียบและไม่สม่ำเสมอ รวมทั้งอายุของหญ้าแฝกไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงไม่อาจประเมินแนวโน้มเป็นตัวเลขทางสถิติที่ถูกต้องได้ และหากทำการเก็บข้อมูลการปลูกหญ้าแฝกในบริเวณอื่นที่ไม่ได้อยู่ภายในวิทยาเขตแต่มีความสมบูรณ์ในเรื่องของการปลูกที่ดี ก็ไม่อาจเป็นตัวแทนสำหรับประเมินการกัดเซาะที่เกิดขึ้นในวิทยาเขตได้ เพราะระดับการกระจายตัวของดินแตกต่างกัน

6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความถี่และช่วงความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ

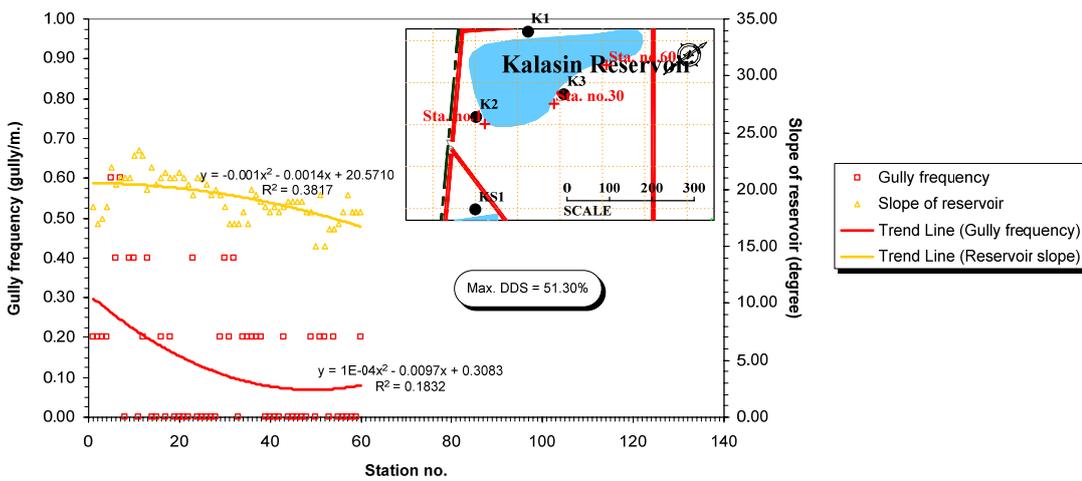
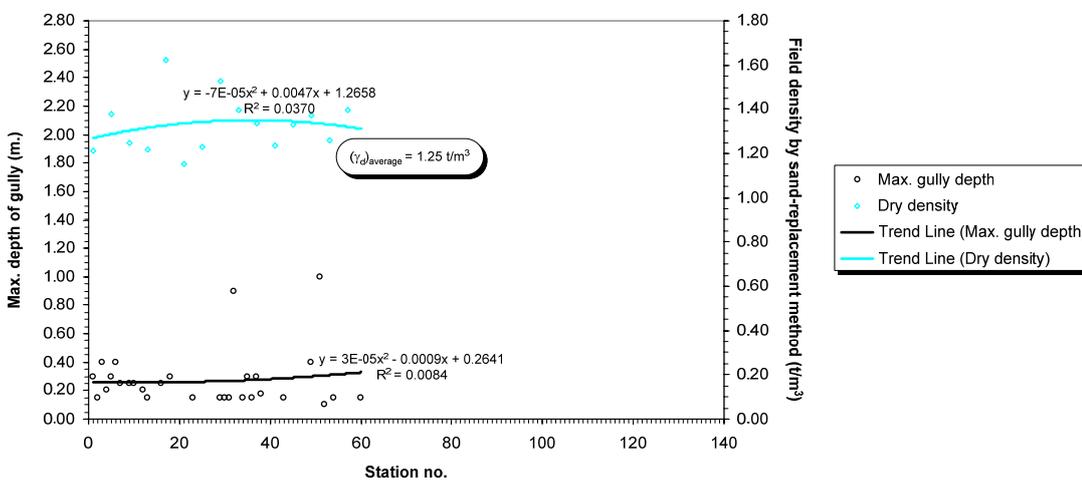
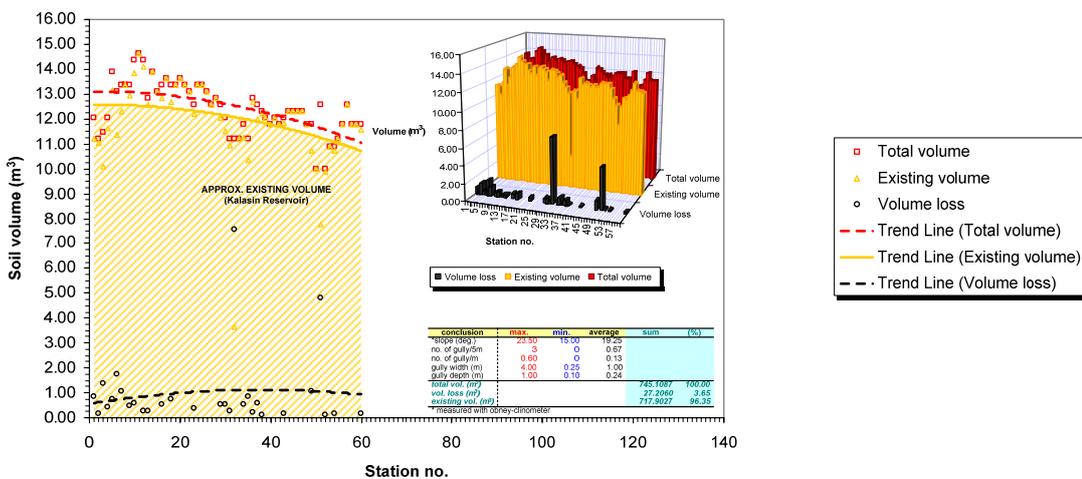
ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความถี่และช่วงความลึกต่าง ๆ ของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำลึกกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ แยกย่อยอ่างเก็บน้ำ แสดงดังภาพที่ 57(ก) และภาพที่ 57(ข) ตามลำดับ จากการสำรวจพบว่า เมื่อลองแบ่งความถี่และความลึกของการกัดเซาะออกเป็นชั้นย่อย ๆ (อันตรภาคชั้น) โดยกำหนดให้แต่ละชั้นมีความกว้างเท่า ๆ กัน เท่ากับ 0.2 ร่องต่อเมตร และ 0.3 เมตร ตามลำดับ จะพบว่า ที่ช่วงความถี่ต่ำ ๆ (ช่วงความลึกน้อย ๆ) มีปริมาณการกัดเซาะโดยรวมสูงกว่าที่ช่วงความถี่สูง ๆ (ช่วงความลึกมาก ๆ) ในเกือบทุก ๆ อ่างเก็บน้ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่ช่วงความถี่ต่ำ ๆ จะมีจำนวนของข้อมูล (ร่องการกัดเซาะ) มากกว่าที่ช่วงความถี่สูง ๆ จึงทำให้ผลรวมปริมาตร



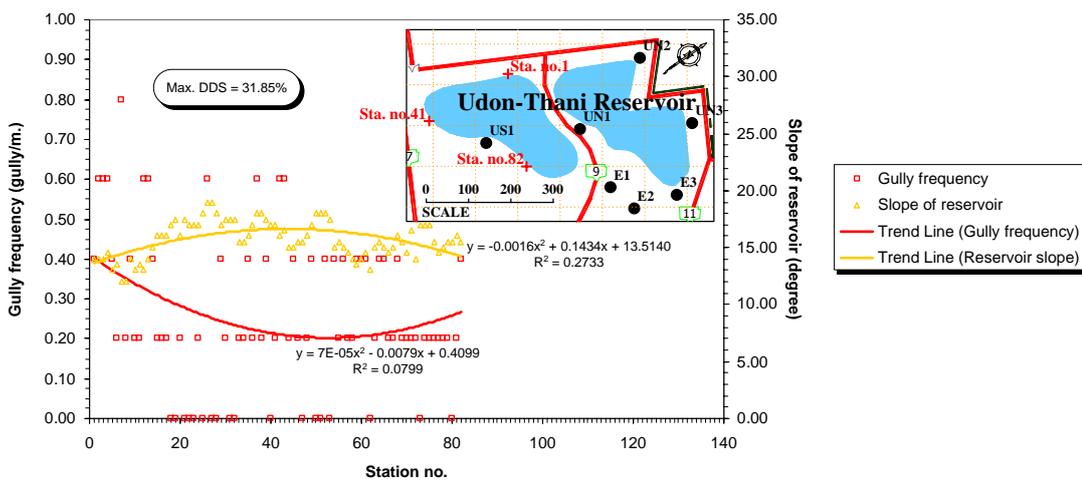
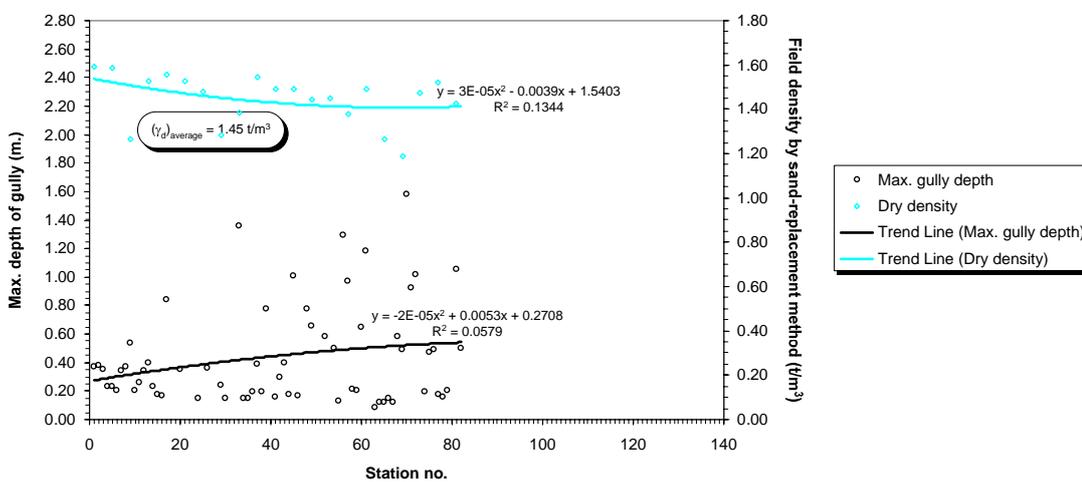
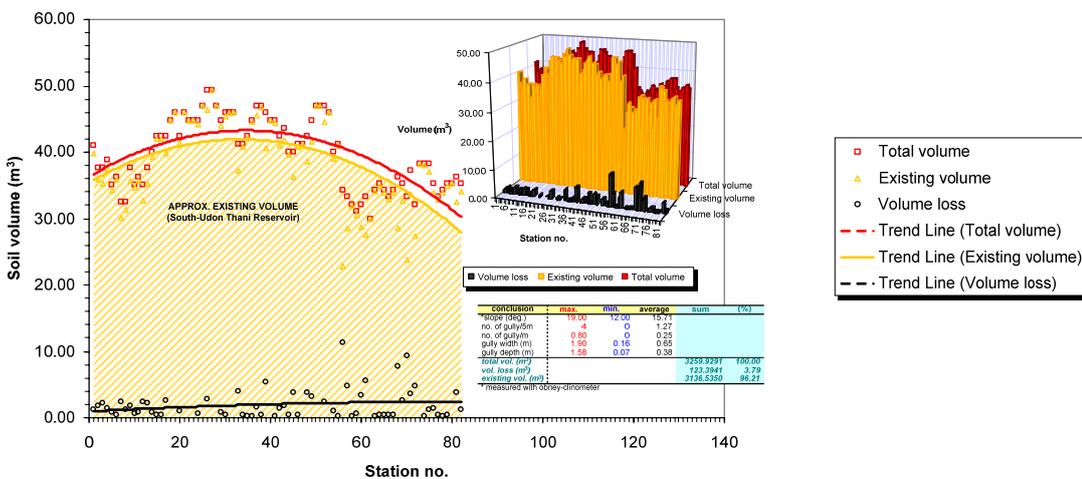
ภาพที่ 52 ความลึกและความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และความแน่นของดินขอบอ่างกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณบริเวณอ่างอุตรธานีเหนือ



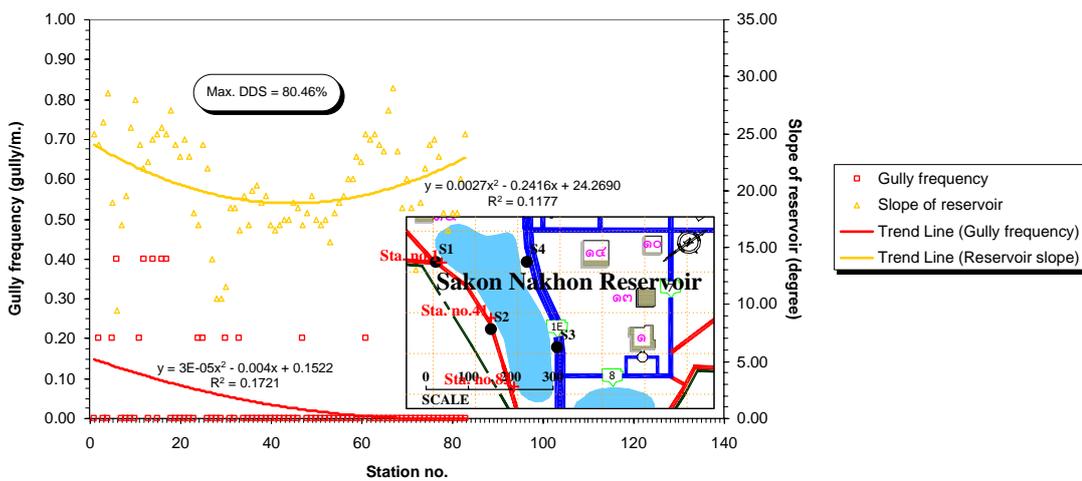
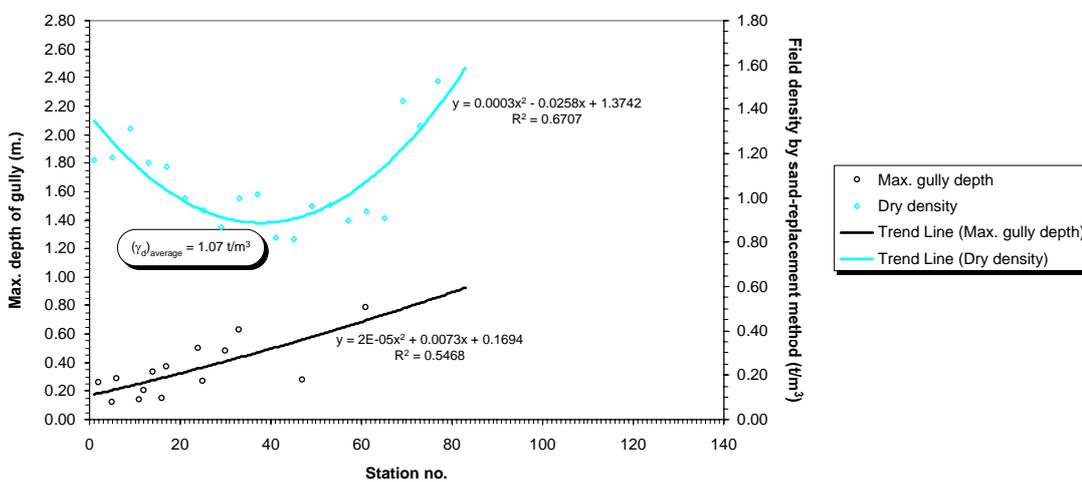
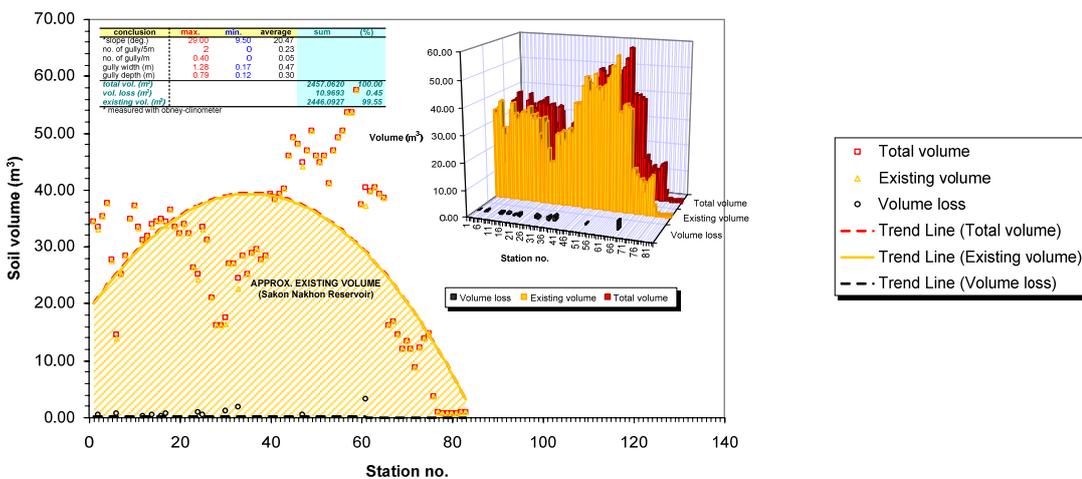
ภาพที่ 53 ความลึกและความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และความแน่นของดินขอบอ่างกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณบริเวณอ่างมุกดาหาร



ภาพที่ 54 ความลึกและความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และความแน่นของดินขอบอ่างกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณบริเวณอ่างกาฬสินธุ์



ภาพที่ 55 ความลึกและความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และความแน่นของดินขอบอ่างกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณบริเวณอ่างอุตรธานีได้



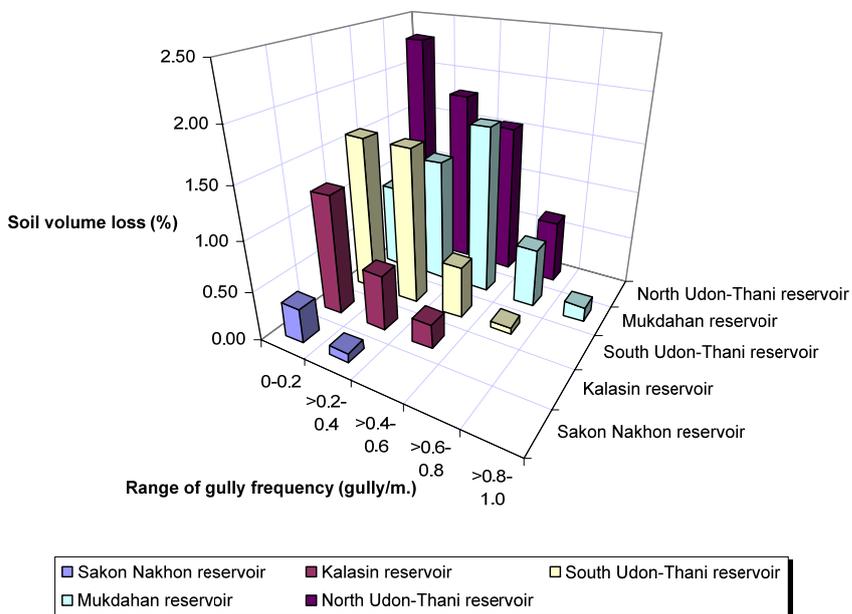
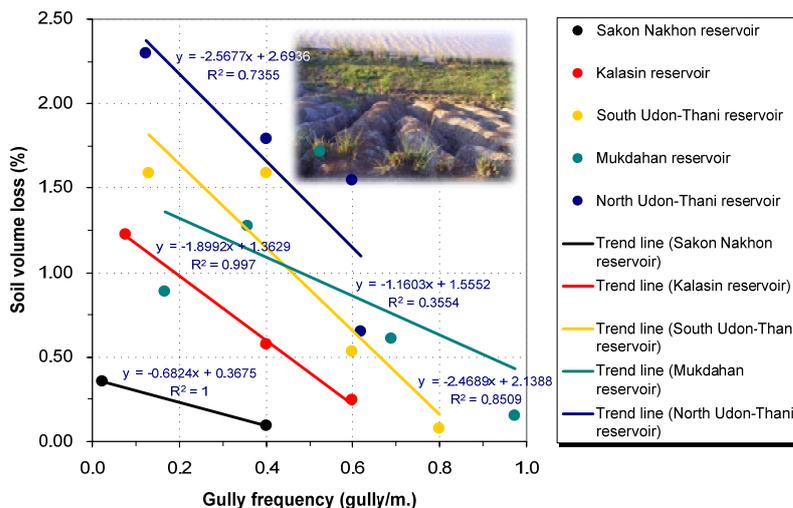
ภาพที่ 56 ความลึกและความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ และความแน่นของดินขอบอ่างกับปริมาตรของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณบริเวณอ่างสกลนคร

ของดินที่สูญเสียน้ำไปมากกว่าในช่วงความถี่สูง ๆ ซึ่งมีจำนวนข้อมูลน้อยกว่า ดังแสดงในตารางที่ 13 และ ตารางที่ 14 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่ช่วงความถี่และช่วงความลึกเดียวกันพบว่า อ่างสกนกรเกิดการกัดเซาะน้อยที่สุด ในขณะที่อ่างอุครธานีเหนือเกิดการกัดเซาะมากที่สุด ยกเว้นที่ความถี่สูง ๆ จะพบว่า อ่างมุกดาหารเกิดการกัดเซาะมากที่สุด

ภาพที่ 57(ค) และตารางที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันตามขอบอ่างเก็บน้ำ ในช่วงต่าง ๆ กับปริมาตรของดินที่สูญเสียน้ำโดยประมาณ แยกรายอ่างเก็บน้ำ จากการสำรวจพบว่า เมื่อลองแบ่งความลาดชันออกเป็นชั้นย่อย ๆ โดยให้แต่ละชั้นมีความกว้างเท่า ๆ กัน เท่ากับ 5 องศา กับแนวราบ จะสังเกตเห็นว่า อ่างอุครธานีเหนือและอ่างสกนกรมีความลาดชันอยู่ในช่วงที่กว้างกว่า อ่างเก็บน้ำอื่น ๆ ดังนั้นเมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาตรของดินที่สูญเสียน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อ่างเก็บน้ำทั้ง 2 จึงเป็นตัวแทนที่ดีในการศึกษาความสัมพันธ์นี้ และเมื่อพิจารณาขนาดของการกัดเซาะโดยรวมพบว่า อ่างอุครธานีเหนือมีการกัดเซาะมากที่สุด ในขณะที่อ่างสกนกรมีการกัดเซาะน้อยที่สุด เช่นเดียวกับเมื่อพิจารณาจากช่วงความถี่และช่วงความลึกของการกัดเซาะ ที่น่าสนใจคือ ที่ช่วงความลาดชัน 15 ถึง 20 องศา กับแนวราบ ซึ่งเป็นช่วงความลาดชันที่เก็บได้ในทุก ๆ อ่างเก็บน้ำ จึงใช้เป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบการกัดเซาะระหว่างอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ผลที่ได้คือ อ่างอุครธานีเหนือมีการกัดเซาะมากที่สุด ในขณะที่อ่างสกนกรมีการกัดเซาะน้อยที่สุดเช่นเดิม หรืออาจสรุปได้ว่า การสำรวจภาคสนามทั้งหมดเพื่อประเมินการกัดเซาะรอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ให้ผลที่ตรงกัน โดยอ่างเก็บน้ำที่มีการกัดเซาะสูงที่สุดคือ อ่างอุครธานีเหนือ รองลงมาคือ อ่างมุกดาหาร อ่างอุครธานีใต้ อ่างกาฬสินธุ์ และอ่างสกนกร ตามลำดับ

ตารางที่ 13 ปริมาตรดินที่สูญเสียน้ำในช่วงความถี่ต่าง ๆ เนื่องจากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก และจำนวนของข้อมูล (จำนวนความถี่) ในช่วงความถี่นั้น ๆ

| อ่างเก็บน้ำ | ความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก (ร่องต่อเมตร) | | | ปริมาตรดินที่สูญเสียน้ำ (เปอร์เซ็นต์) | |
|---------------|---|-----------|-------------|---------------------------------------|----------------|
| | ช่วงความถี่ | ค่าเฉลี่ย | จำนวนข้อมูล | ในช่วงความถี่ | ทุกช่วงความถี่ |
| อุครธานีเหนือ | 0 ถึง 0.2 | 0.12 | (47 ข้อมูล) | 2.30 | 6.29 |
| | >0.2 ถึง 0.4 | 0.40 | (21 ข้อมูล) | 1.79 | |
| | >0.4 ถึง 0.6 | 0.60 | (7 ข้อมูล) | 1.55 | |
| | >0.6 ถึง 0.8 | 0.62 | (4 ข้อมูล) | 0.65 | |
| | >0.8 ถึง 1.0 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| มุกดาหาร | 0 ถึง 0.2 | 0.17 | (12 ข้อมูล) | 0.89 | 4.64 |
| | >0.2 ถึง 0.4 | 0.36 | (37 ข้อมูล) | 1.27 | |
| | >0.4 ถึง 0.6 | 0.52 | (48 ข้อมูล) | 1.72 | |
| | >0.6 ถึง 0.8 | 0.69 | (21 ข้อมูล) | 0.61 | |
| | >0.8 ถึง 1.0 | 0.97 | (3 ข้อมูล) | 0.15 | |



ภาพที่ 57 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ช่วงต่างๆ ของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกกับปริมาณของดินที่สูญเสียบนโดยประมาณ แยกรายอ่างเก็บน้ำ

ตารางที่ 13 (ต่อ)

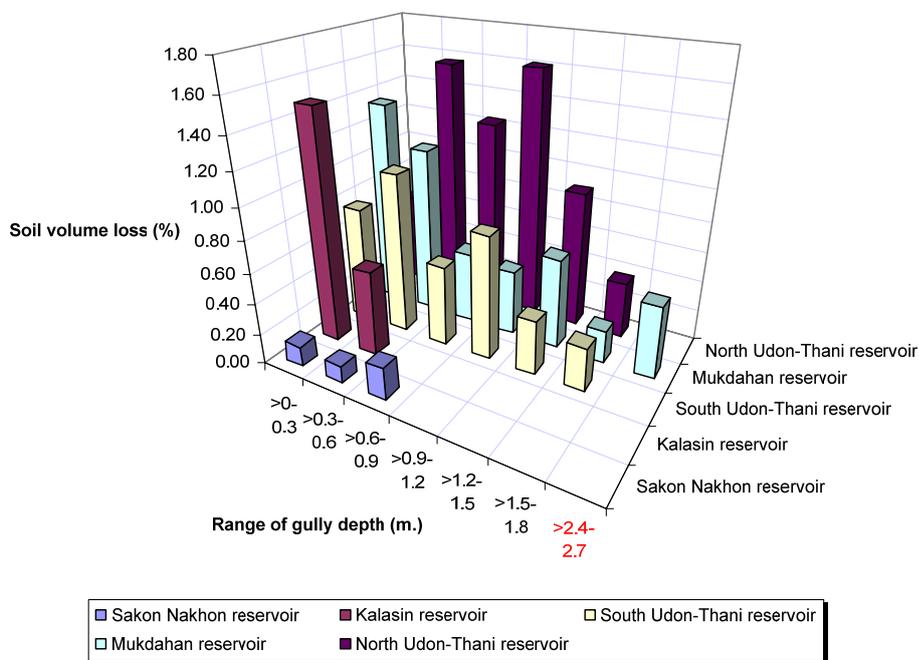
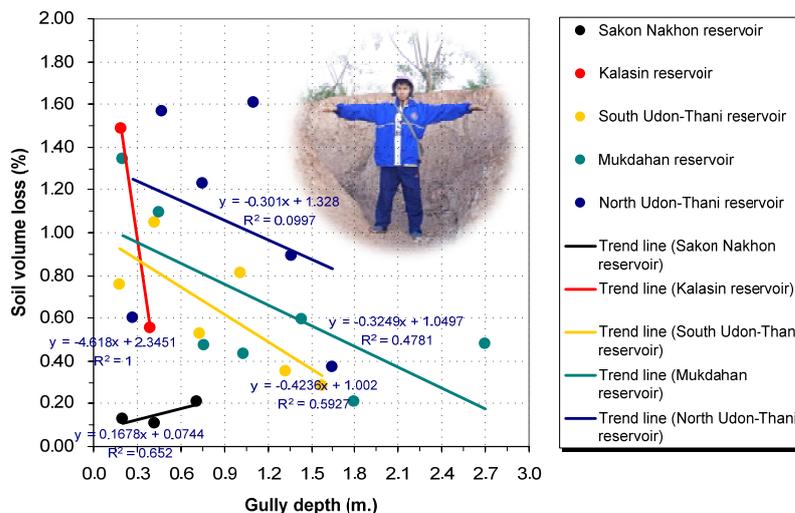
| อ่างเก็บน้ำ | ความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก (ร่องต่อเมตร) | | | ปริมาณดินที่สูญเสียบน (เปอร์เซ็นต์) | |
|-------------|---|-----------|-------------|-------------------------------------|----------------|
| | ช่วงความถี่ | ค่าเฉลี่ย | จำนวนข้อมูล | ในช่วงความถี่ | ทุกช่วงความถี่ |
| กาฬสินธุ์ | 0 ถึง 0.2 | 0.08 | (51 ข้อมูล) | 1.23 | |
| | >0.2 ถึง 0.4 | 0.40 | (7 ข้อมูล) | 0.57 | |
| | >0.4 ถึง 0.6 | 0.60 | (2 ข้อมูล) | 0.24 | 2.04 |
| | >0.6 ถึง 0.8 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >0.8 ถึง 1.0 | - | (0 ข้อมูล) | - | |

ตารางที่ 13 (ต่อ)

| อ่างเก็บน้ำ | ความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก (ร่องต่อเมตร) | | | ปริมาณดินที่สูญหายไป (เปอร์เซ็นต์) | |
|-------------|---|-----------|---------------------|------------------------------------|----------------|
| | ช่วงความถี่ | ค่าเฉลี่ย | จำนวนข้อมูล | ในช่วงความถี่ | ทุกช่วงความถี่ |
| สกลนคร | 0 ถึง 0.2 | 0.02 | (78 ข้อมูล) | 0.35 | |
| | >0.2 ถึง 0.4 | 0.40 | (5 ข้อมูล) | 0.09 | |
| | >0.4 ถึง 0.6 | - | (0 ข้อมูล) | - | 0.45 |
| | >0.6 ถึง 0.8 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >0.8 ถึง 1.0 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| อุครธานีใต้ | 0 ถึง 0.2 | 0.13 | (53 ข้อมูล) | 1.59 | |
| | >0.2 ถึง 0.4 | 0.40 | (19 ข้อมูล) | 1.59 | |
| | >0.4 ถึง 0.6 | 0.60 | (9 ข้อมูล) | 0.54 | 3.79 |
| | >0.6 ถึง 0.8 | 0.80 | (1 ข้อมูล) | 0.07 | |
| | >0.8 ถึง 1.0 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| รวม | | | (425 ข้อมูล) | 17.20 | 17.20 |

ตารางที่ 14 ปริมาณดินที่สูญหายไปในช่วงความลึกต่าง ๆ เนื่องจากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก และจำนวนของข้อมูล (จำนวนร่องการกัดเซาะ) ในช่วงความลึกนั้น ๆ

| อ่างเก็บน้ำ | ความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องลึก (เมตร) | | | ปริมาณดินที่สูญหายไป (เปอร์เซ็นต์) | |
|---------------|--|-----------|--------------|------------------------------------|----------------|
| | ช่วงความลึก | ค่าเฉลี่ย | จำนวนข้อมูล | ในช่วงความลึก | ทุกช่วงความลึก |
| อุครธานีเหนือ | >0 ถึง 0.3 | 0.27 | (37 ข้อมูล) | 0.60 | |
| | >0.3 ถึง 0.6 | 0.47 | (41 ข้อมูล) | 1.57 | |
| | >0.6 ถึง 0.9 | 0.76 | (17 ข้อมูล) | 1.23 | |
| | >0.9 ถึง 1.2 | 1.11 | (7 ข้อมูล) | 1.61 | 6.28 |
| | >1.2 ถึง 1.5 | 1.37 | (3 ข้อมูล) | 0.90 | |
| | >1.5 ถึง 1.8 | 1.65 | (1 ข้อมูล) | 0.37 | |
| มุกดาหาร | >0 ถึง 0.3 | 0.20 | (335 ข้อมูล) | 1.34 | |
| | >0.3 ถึง 0.6 | 0.45 | (75 ข้อมูล) | 1.10 | |
| | >0.6 ถึง 0.9 | 0.76 | (11 ข้อมูล) | 0.47 | |
| | >0.9 ถึง 1.2 | 1.03 | (6 ข้อมูล) | 0.43 | 4.63 |
| | >1.2 ถึง 1.5 | 1.43 | (3 ข้อมูล) | 0.60 | |
| | >1.5 ถึง 1.8 | 1.80 | (1 ข้อมูล) | 0.21 | |
| | >2.4 ถึง 2.7 | 2.70 | (1 ข้อมูล) | 0.48 | |



ภาพที่ 57 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกช่วงต่าง ๆ ของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกกับปริมาณของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ แยกรายอ่างเก็บน้ำ

ตารางที่ 14 (ต่อ)

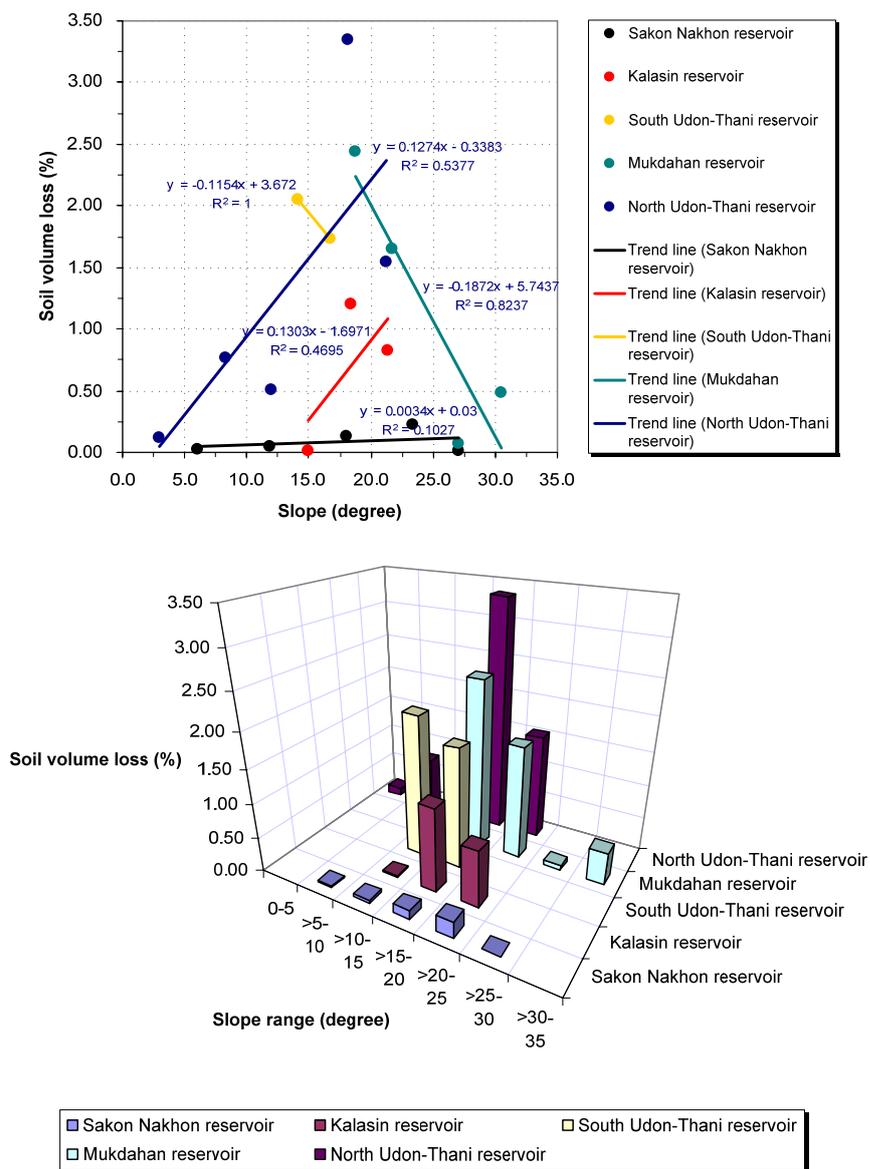
| อ่างเก็บน้ำ | ความลึกของการกัดเซาะเป็นร่องลึก (เมตร) | | | ปริมาณดินที่สูญหายไป (เปอร์เซ็นต์) | |
|-------------|--|-----------|---------------------|------------------------------------|----------------|
| | ช่วงความลึก | ค่าเฉลี่ย | จำนวนข้อมูล | ในช่วงความลึก | ทุกช่วงความลึก |
| ภาพสินธุ์ | >0 ถึง 0.3 | 0.19 | (34 ข้อมูล) | 1.49 | 2.04 |
| | >0.3 ถึง 0.6 | 0.39 | (4 ข้อมูล) | 0.56 | |
| | >0.6 ถึง 0.9 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >0.9 ถึง 1.2 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >1.2 ถึง 1.5 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >1.5 ถึง 1.8 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| สกลนคร | >0 ถึง 0.3 | 0.20 | (13 ข้อมูล) | 0.13 | 0.45 |
| | >0.3 ถึง 0.6 | 0.42 | (4 ข้อมูล) | 0.11 | |
| | >0.6 ถึง 0.9 | 0.71 | (2 ข้อมูล) | 0.21 | |
| | >0.9 ถึง 1.2 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >1.2 ถึง 1.5 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >1.5 ถึง 1.8 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| อุครธานีใต้ | >0 ถึง 0.3 | 0.18 | (59 ข้อมูล) | 0.76 | 3.78 |
| | >0.3 ถึง 0.6 | 0.42 | (27 ข้อมูล) | 1.05 | |
| | >0.6 ถึง 0.9 | 0.73 | (7 ข้อมูล) | 0.53 | |
| | >0.9 ถึง 1.2 | 1.01 | (7 ข้อมูล) | 0.81 | |
| | >1.2 ถึง 1.5 | 1.33 | (2 ข้อมูล) | 0.35 | |
| | >1.5 ถึง 1.8 | 1.58 | (1 ข้อมูล) | 0.29 | |
| รวม | | | (921 ข้อมูล) | 17.18 | 17.18 |

ตารางที่ 15 ปริมาณดินที่สูญหายไปในช่วงความลาดชันต่าง ๆ ของอ่างเก็บน้ำ เนื่องจากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก และจำนวนของข้อมูลในช่วงความลาดชันนั้น ๆ

| อ่างเก็บน้ำ | ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ (องศากับแนวราบ) | | | ปริมาณดินที่สูญหายไป (เปอร์เซ็นต์) | |
|---------------|--|-----------|-------------|------------------------------------|----------------|
| | ช่วงความลาดชัน | ค่าเฉลี่ย | จำนวนข้อมูล | ในช่วงความชัน | ทุกช่วงความชัน |
| อุครธานีเหนือ | 0 ถึง 5 | 3.00 | (2 ข้อมูล) | 0.12 | 6.29 |
| | >5 ถึง 10 | 8.28 | (13 ข้อมูล) | 0.76 | |
| | >10 ถึง 15 | 11.94 | (24 ข้อมูล) | 0.51 | |
| | >15 ถึง 20 | 18.17 | (25 ข้อมูล) | 3.35 | |
| | >20 ถึง 25 | 21.27 | (15 ข้อมูล) | 1.55 | |
| | >25 ถึง 30 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >30 ถึง 35 | - | (0 ข้อมูล) | - | |

ตารางที่ 15 (ต่อ)

| อ่างเก็บน้ำ | ความลาดชันของอ่างเก็บน้ำ (องศากับแนวนราบ) | | | ปริมาณดินที่สูญเสียบน (เปอร์เซ็นต์) | |
|-------------|---|-----------|---------------------|-------------------------------------|----------------|
| | ช่วงความลาดชัน | ค่าเฉลี่ย | จำนวนข้อมูล | ในช่วงความชัน | ทุกช่วงความชัน |
| มุกดาหาร | 0 ถึง 5 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >5 ถึง 10 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >10 ถึง 15 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >15 ถึง 20 | 18.74 | (63 ข้อมูล) | 2.44 | 4.64 |
| | >20 ถึง 25 | 21.75 | (54 ข้อมูล) | 1.64 | |
| | >25 ถึง 30 | 27.00 | (5 ข้อมูล) | 0.07 | |
| | >30 ถึง 35 | 30.50 | (1 ข้อมูล) | 0.48 | |
| ภาพสินธุ์ | 0 ถึง 5 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >5 ถึง 10 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >10 ถึง 15 | 15.00 | (2 ข้อมูล) | 0.02 | |
| | >15 ถึง 20 | 18.36 | (38 ข้อมูล) | 1.20 | 2.04 |
| | >20 ถึง 25 | 21.38 | (20 ข้อมูล) | 0.82 | |
| | >25 ถึง 30 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >30 ถึง 35 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| สกลนคร | 0 ถึง 5 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >5 ถึง 10 | 6.00 | (1 ข้อมูล) | 0.03 | |
| | >10 ถึง 15 | 11.90 | (5 ข้อมูล) | 0.05 | |
| | >15 ถึง 20 | 18.03 | (37 ข้อมูล) | 0.13 | 0.45 |
| | >20 ถึง 25 | 23.33 | (32 ข้อมูล) | 0.23 | |
| | >25 ถึง 30 | 27.06 | (8 ข้อมูล) | 0.01 | |
| | >30 ถึง 35 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| อุครธานีใต้ | 0 ถึง 5 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >5 ถึง 10 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >10 ถึง 15 | 14.08 | (32 ข้อมูล) | 2.05 | |
| | >15 ถึง 20 | 16.76 | (50 ข้อมูล) | 1.74 | 3.79 |
| | >20 ถึง 25 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >25 ถึง 30 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| | >30 ถึง 35 | - | (0 ข้อมูล) | - | |
| รวม | | | (427 ข้อมูล) | 17.20 | 17.20 |



ภาพที่ 57 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันของอ่างเก็บน้ำช่วงต่าง ๆ กับปริมาณของดินที่สูญเสียไปโดยประมาณ แยกรายอ่างเก็บน้ำ

ขอบเขตดินกระจายตัวในวิทยาเขต

ผลจากการจำแนกดินกระจายตัวในห้องปฏิบัติการและในสนาม ประกอบกับผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านเคมี และการสำรวจภาคสนามทั้งหมด ทำให้สามารถสรุปขอบเขตของดินกระจายตัวบริเวณอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ภายในวิทยาเขตได้ดังนี้

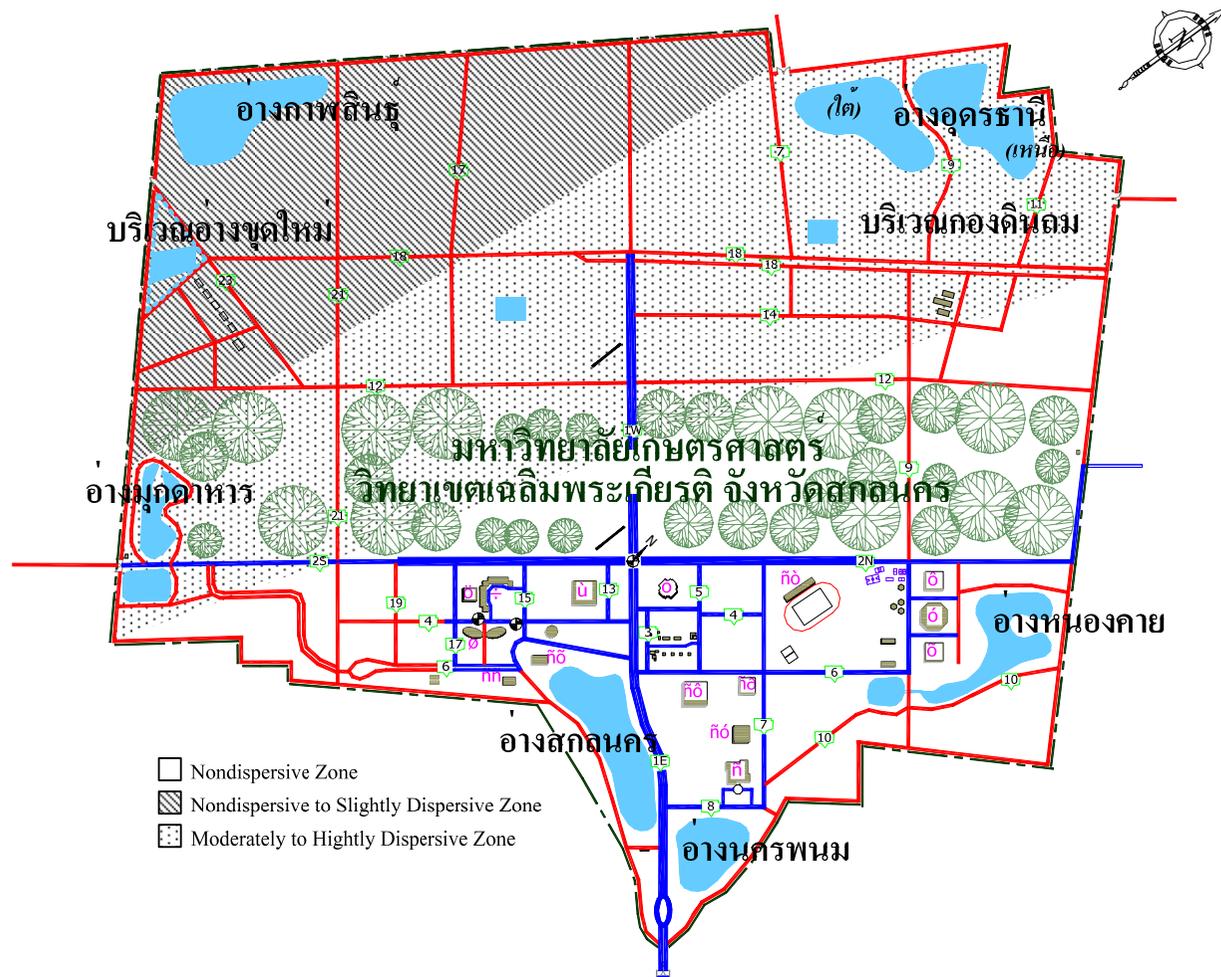
พื้นที่ 1 ประกอบด้วยอ่างอุครธานีเหนือและใต้ กองดินถมข้างอ่าง ถนนและพื้นที่ใกล้เคียง เป็นบริเวณที่ดินกระจายตัวปานกลางถึงกระจายตัวสูง โดยเฉพาะที่ระดับประมาณ +158.00 ม.รทก. ลงไป ดินจะเริ่มมีการกระจายตัว และมีแนวโน้มว่าดินจะกระจายตัวสูงขึ้นเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น

พื้นที่ 2 ประกอบด้วยอ่างกาฬสินธุ์ อ่างที่ขุดใหม่ ถนนและพื้นที่ใกล้เคียง เป็นบริเวณที่ดินกระจายตัวเล็กน้อย และพบว่าในบางตำแหน่งของอ่างกาฬสินธุ์ โดยเฉพาะขอบอ่างฝั่งทิศใต้จะมีการกระจายตัวสูง ซึ่งพบเพียงตำแหน่งเดียวอยู่ที่ระดับประมาณ +158.6 ม.รทก. ขึ้นไป

พื้นที่ 3 ประกอบด้วยอ่างมุกดาหาร ถนนและพื้นที่ใกล้เคียง เป็นบริเวณที่ดินกระจายตัวปานกลางถึงกระจายตัวสูง

พื้นที่ 4, พื้นที่ 5 และพื้นที่ 6 ประกอบด้วยอ่างสกลนคร อ่างนครพนม อ่างหนองคาย และพื้นที่ใกล้เคียง ผลทดสอบ Double Hydrometer Test บ่งชี้ว่าในบางตัวอย่างจำแนกเป็นดินกระจายตัว แต่สำหรับการทดสอบอื่น ๆ เช่น Pinhole Test และการสำรวจภาคสนามให้ผลตรงกันว่าเป็นบริเวณที่ดินไม่กระจายตัว

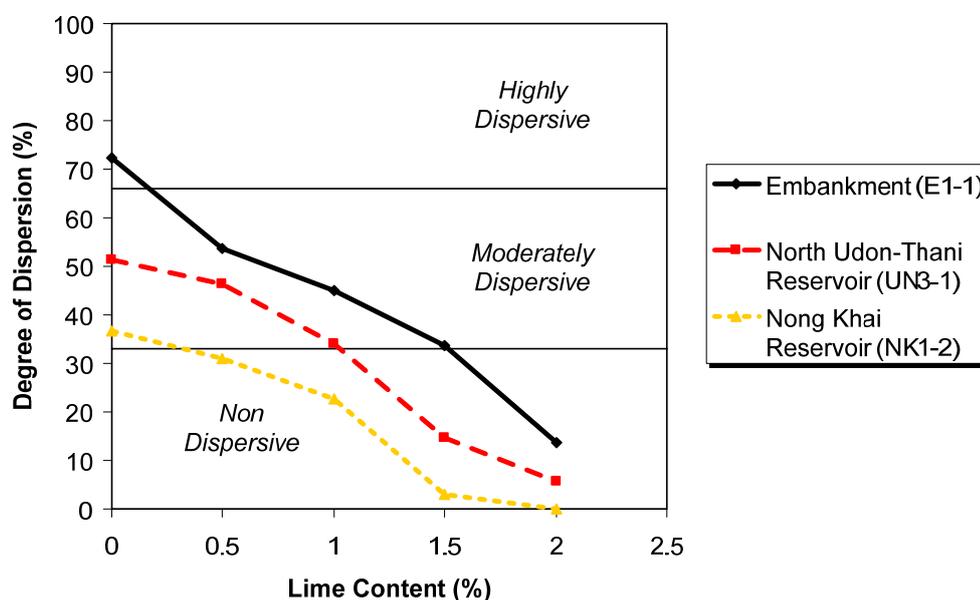
สำหรับแนวโน้มของดินกระจายตัวในวิทยาเขต โดยยึดพื้นที่บริเวณอ่างเก็บน้ำเป็นหลัก แสดง
 ดัชนีภาพที่ 58



ภาพที่ 58 แนวโน้มของดินกระจายตัวในวิทยาเขตโดยยึดพื้นที่บริเวณอ่างเก็บน้ำเป็นหลัก

7. การปรับปรุงคุณภาพดินกระจายตัวด้วยปูนขาว

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ปูนขาว เพื่อหาปริมาณของปูนขาวที่เหมาะสม (Trial Mixes) สำหรับดินที่มีระดับการกระจายตัวต่าง ๆ กันในห้องปฏิบัติการ จะใช้ปริมาณปูนขาวที่ 0.5, 1, 1.5, และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของดินแห้ง และบ่มไว้ 4 วัน ผลการทดสอบ Double Hydrometer Test พบว่า ดินที่มีระดับการกระจายตัวสูงบริเวณกองดินถม ซึ่งมีระดับการกระจายตัวเริ่มต้นเท่ากับ 72.21 เปอร์เซ็นต์ จะต้องใช้ปริมาณปูนขาวอย่างน้อย 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของดินแห้ง เพื่อลดระดับการกระจายตัวลงจนเป็นที่น่าพอใจ (ต่ำกว่า 33 เปอร์เซ็นต์) สำหรับดินที่มีระดับการกระจายตัวปานกลางบริเวณอ่างอุทธรณีเหนือและดินที่มีระดับการกระจายตัวเล็กน้อยบริเวณอ่างหนองคาย จะต้องใช้ปริมาณปูนขาวอย่างน้อย 1.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของดินแห้ง ตามลำดับ จึงทำให้ดินไม่เกิดการกระจายตัว อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดสอบ Double Hydrometer Test จะให้ผลของการจำแนกอยู่ในช่วงกว้างประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสำหรับดินที่มีระดับการกระจายตัวเริ่มต้นอื่น ๆ อาจทำการปรับเพิ่มหรือลดปริมาณปูนขาวที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพดินตามความเหมาะสม ผลทดสอบ Double Hydrometer Test ของดินก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว แสดงดังภาพที่ 59



ภาพที่ 59 ผลการทำ Trial Mixes ของดินผสมปูนขาวที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งมีระดับการกระจายตัวเริ่มต้นต่าง ๆ กัน

สำหรับการทดสอบทางเคมีของดินผสมปูนขาวพบว่า จะทำให้อัตราการดูดซับโซเดียม (SAR) และเปอร์เซ็นต์โซเดียมในดินที่แลกเปลี่ยนได้ (ESP) ลดลงจนดินไม่กระจายตัว โดยเฉพาะที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง จะทำให้ค่าทั้ง 2 ลดลงน้อยกว่า 1 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ Double Hydrometer Test ภาพที่ 60 แสดงลักษณะการตกตะกอนของดินผสมปูนขาวเมื่อเวลาผ่านไปจากการทดสอบ Double Hydrometer Test



(ก) เวลาผ่านไป 15 นาที



(ข) เวลาผ่านไป 30 นาที



(ค) เวลาผ่านไป 60 นาที

(กระบอกซ้าย) เดิมสารแตกตัว (กระบอกขวา) ไม่เดิมสารแตกตัว

ภาพที่ 60 การตกตะกอนของดินผสมปูนขาว 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง เมื่อเวลาผ่านไป 15, 30 และ 60 นาที ของตัวอย่างดินอ่างอุตราณีเหนือ (DDS เท่ากับ 51.30 เปอร์เซ็นต์)

คุณสมบัติของดินก่อนปรับปรุงคุณภาพ

คุณสมบัติของดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว สำหรับการวิเคราะห์และจำแนกชนิดของดินในเบื้องต้น คุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรม รวมทั้งคุณสมบัติเฉพาะตัวทางด้านการบดอัดดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว สำหรับดินกระจายตัวเปรียบเทียบกับดินซึ่งไม่กระจายตัว จะได้ทำการศึกษาอย่างละเอียด ดังนี้

8. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

คุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพ แสดงดังตารางที่ 16 ดินประเภทแรก เป็นดินที่เก็บมาจากขอบอ่างอุทธรานีเหนือ ที่ระดับความลึกประมาณ 0 ถึง 0.60 เมตร โดยวิธีการขุด เมื่อทำการทดสอบเบื้องต้นในสนามด้วยวิธี Crumb Test พบว่า จำแนกได้เป็นเกรด 2 และเมื่อทดสอบการกระจายตัวของดินในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Double Hydrometer Test พบว่า มีระดับการกระจายตัวเป็น 38.32 เปอร์เซนต์ จึงจำแนกเป็นดินที่กระจายตัวปานกลาง สำหรับดินประเภทที่สอง เก็บมาจากขอบอ่างกาฬสินธุ์ด้วยวิธีการเดียวกัน ที่ระดับความลึกไม่เกิน 0.5 เมตร ผลการทดสอบการกระจายตัวของดินทางกายภาพและทางเคมีให้ผลที่สอดคล้องกัน คือ จำแนกเป็นดินไม่กระจายตัว

ตารางที่ 16 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

| คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี | บริเวณอ่างเก็บน้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างดิน | |
|---|--|-----------------------------|
| | อ่างอุทธรานีเหนือ | อ่างกาฬสินธุ์ |
| <i>คุณสมบัติทางกายภาพ</i> | | |
| ชนิดของดินในระบบ USCS | ดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง | ดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง |
| ปริมาณส่วนละเอียด (เปอร์เซนต์) | 62.32 | 50.61 |
| ดัชนีความเหนียวของดิน | 26.24 | 28.36 |
| ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ตัน ต่อ ลบ.ม.) | 1.51 | 1.57 |
| ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (เปอร์เซนต์) | 23.00 | 24.60 |
| Crumb Test (เกรด) | 2 | 1 |
| ระดับการกระจายตัว (เปอร์เซนต์) | 38.32 | 0 |
| <i>คุณสมบัติทางเคมี</i> | | |
| ค่าการนำไฟฟ้า ($\times 10^3$ เดซิซิเมนต์ ต่อ เมตร) | 0.03 | 0.07 |
| ปริมาณเกลือละลายทั้งหมด (meq ต่อ ลิตร) | 0.31 | 0.92 |
| เปอร์เซนต์โซเดียม (เปอร์เซนต์) | 45 | 28 |
| อัตราการดูดซับ โซเดียม | 0.54 | 0.49 |
| โซเดียมในดินที่แลกเปลี่ยนได้ (เปอร์เซนต์) | 0.92 | 0.96 |
| ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (meq ต่อ 100 กรัม) | 58 | 25 |

ภาพที่ 61 แสดงการกระจายขนาดของเม็ดดินจากผลทดสอบ Double Hydrometer Test ผลจากการจำแนกดินกระจายตัวพบว่า ดินที่เก็บมาจากอ่างอุธรธานีเหนือเป็นดินที่กระจายตัวปานกลาง ส่วนดินที่เก็บมาจากอ่างกาฬสินธุ์เป็นดินที่ไม่กระจายตัว ดินทั้ง 2 ประเภทดังกล่าว จะใช้เป็นตัวแทนของดินที่กระจายตัวและดินที่ไม่กระจายตัว สำหรับศึกษาคุณสมบัติด้านการบดอัดดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่น ๆ ได้แก่ คุณสมบัติด้านกำลัง (Shear Strength) และความซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic Conductivity) โดยเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้ว่ามีความเหมือนหรือต่างกันอย่างไร

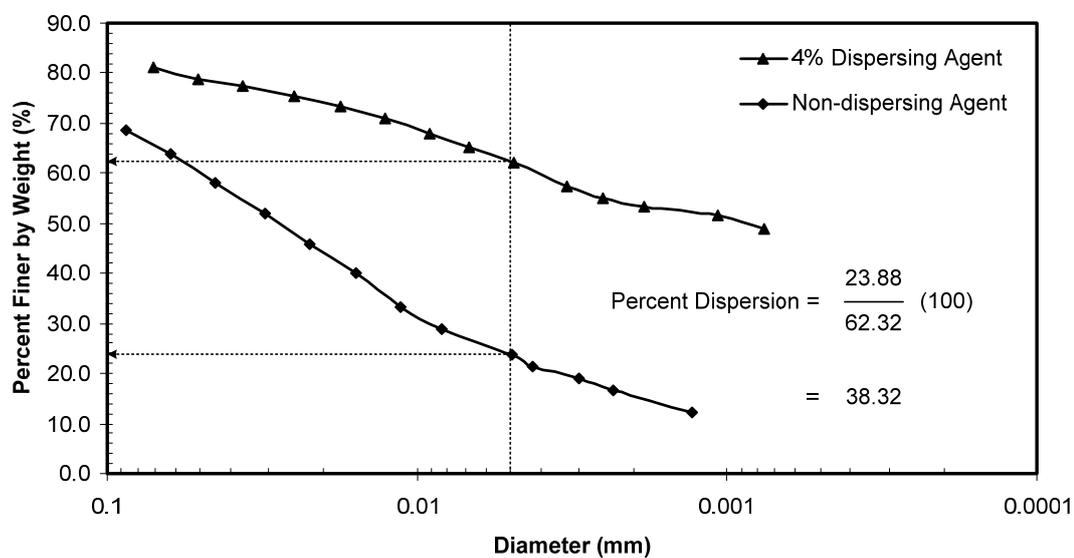
9. คุณสมบัติด้านการบดอัดดิน

ผลทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ โดยใช้แบบมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 11.7 ซม.

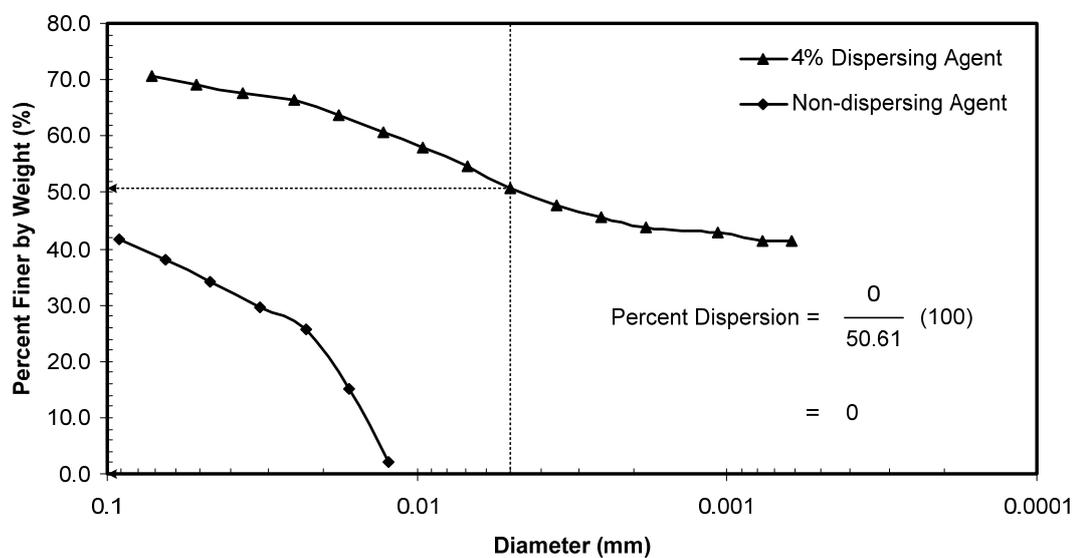
ผลทดสอบการบดอัดดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุธรธานีเหนือ ในแบบทรงกระบอกมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 11.7 ซม. โดยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, MDD) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) พบว่า ดินบดอัดมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 1.51 ตันต่อ ลบ.ม. โดยใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมประมาณ 23.0 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ดินซึ่งไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ จะใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสูงกว่าเล็กน้อย ประมาณ 24.6 เปอร์เซ็นต์ และให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมากกว่า เท่ากับ 1.57 ตันต่อ ลบ.ม.

ผลทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ โดยใช้แบบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 10 ซม.

ดินกระจายตัวซึ่งบดอัดลงในแบบทรงกระบอกขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 10 ซม. โดยใช้ค้อนบดอัด (Drop Hammer) หนัก 0.507 กิโลกรัม ใช้ระยะตก (Height of Drop) เท่ากับ 28.5 ซม. ทำการบดอัด 3 ชั้น ชั้นละ 28 ครั้ง เพื่อให้ได้พลังงานในการบดอัดเท่ากับ 61,319 กก.-เมตรต่อ ลบ.ม. ผลการบดอัดแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.37 และ 1.46 ตันต่อ ลบ.ม. โดยใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมประมาณ 29.8 และ 29.4 เปอร์เซ็นต์ สำหรับดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุธรธานีเหนือและดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ ตามลำดับ



(ก) อ่างอุรธานีเหนือ

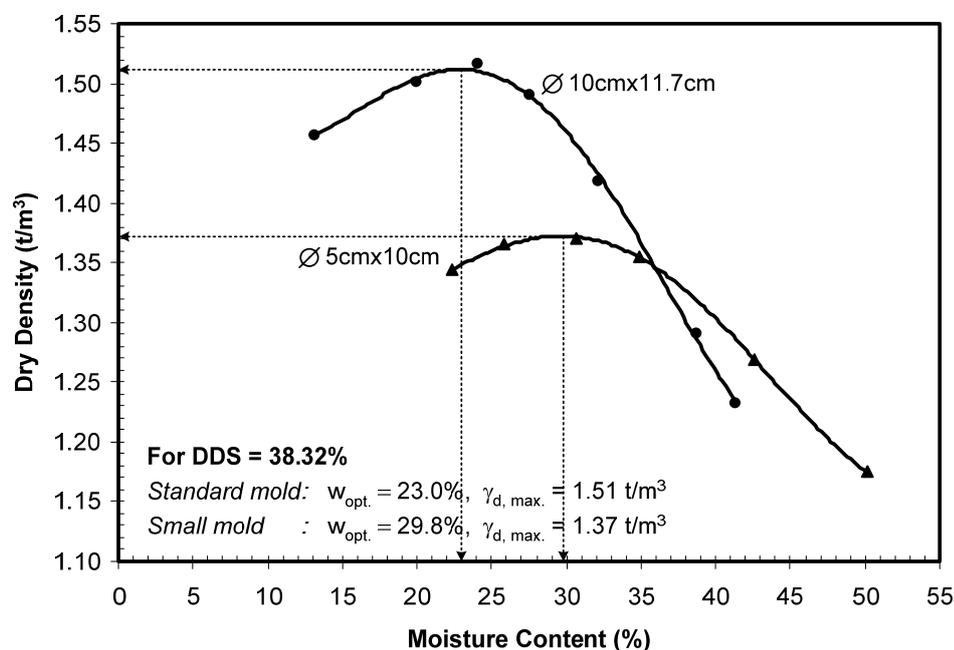


(ข) อ่างกาฬสินธุ์

ภาพที่ 61 การกระจายขนาดของเม็ดดินและระดับการกระจายตัวของดิน โดยการทดสอบ Double Hydrometer Test

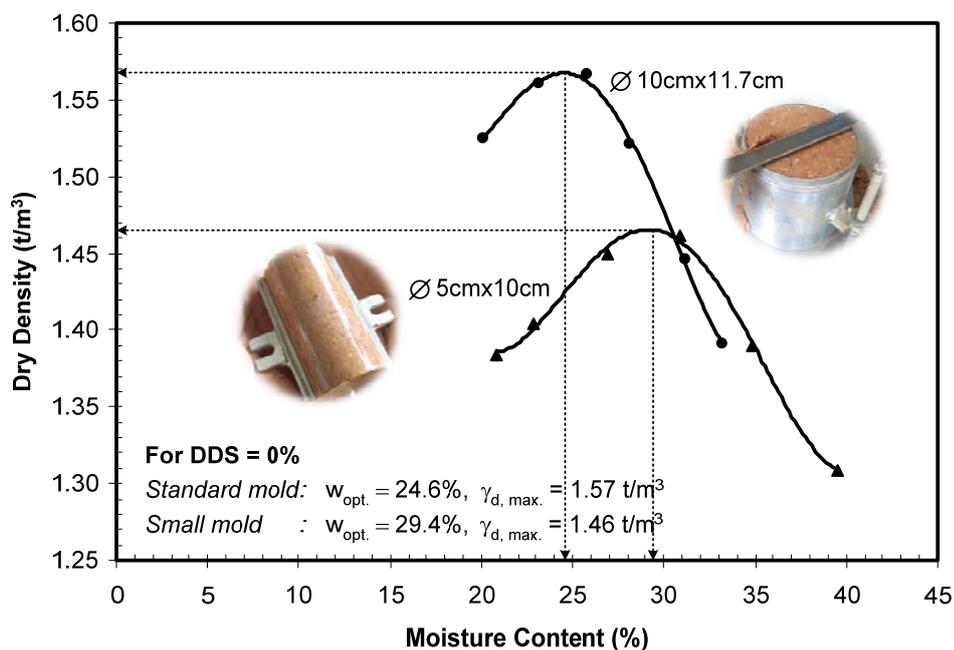
เปรียบเทียบผลการบดอัดดิน โดยใช้แบบมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 11.7 ซม. กับแบบทรงกระบอกขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 10 ซม.

ตารางที่ 17 แสดงผลการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อชั้นของตุ้มน้ำหนักขนาดเล็ก น้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม กับตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน ซึ่งมีระยะตกเป็น 28.5 และ 30.48 ซม. ตามลำดับ โดยกำหนดให้จำนวนชั้นของการตอก (3 ชั้น) และพลังงานต่อปริมาตร (60,745 กก.-เมตร ต่อ ลบ.ม.) มีค่าเท่ากัน สำหรับแบบทรงกระบอกขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 11.7 ซม. กับแบบมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 10 ซม. ผลการเปรียบเทียบพบว่า จะต้องใช้จำนวนครั้งของการตอกต่อชั้นเป็น 27.5 ครั้ง หรือคิดเป็น 28 ครั้ง เพื่อให้ได้พลังงานต่อปริมาตรใกล้เคียงกับเมื่อใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน ผลการบดอัดดินในภาพที่ 62(ก) และ 62(ข) แสดงให้เห็นว่า ดินบดอัดในแบบขนาดเล็ก ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดต่ำกว่าแบบมาตรฐานประมาณ 0.10 ถึง 0.15 ตัน ต่อ ลบ.ม. แต่ใช้ปริมาณความชื้นสูงกว่าประมาณ 5 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม การบดอัดดินลงในแบบขนาดเล็กก็ยังคงมีความแน่นเพียงพอ เมื่อเปรียบเทียบกับการบดอัดดินลงในแบบมาตรฐาน และมีความเป็นไปได้ที่จะใช้แบบขนาดเล็กนี้ ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบด้านกำลัง โดยเฉพาะการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว



(ก) อ่างอุรธานีเหนือ

ภาพที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม



(ข) อ่างกาฬสินธุ์

ภาพที่ 62 (ต่อ)

ตารางที่ 17 ผลการปรับเทียบ (Calibration) จำนวนครั้งของการตอกต่อชั้นของตุ้มน้ำหนักขนาดเล็กกับตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน สำหรับแบบทรงกระบอกขนาดเล็กกับแบบมาตรฐาน

| รายการ | | แบบมาตรฐาน | แบบทรงกระบอก |
|-------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|
| | | (Ø10 ซม.x11.7 ซม.) | (Ø5 ซม.x10 ซม.) |
| ปริมาตร | (ลบ.ม.) | 9.3893×10^{-4} | 1.9794×10^{-4} |
| ตุ้มน้ำหนัก | (กก.) | 2.495 | 0.507 |
| ระยะตก | (ซม.) | 30.48 | 28.50 |
| จำนวนชั้น | | 3 | 3 |
| จำนวนครั้งต่อชั้น | | 25 | 28 ^{1/} |
| พลังงานต่อปริมาตร | (กก.-ม./ลบ.ม.) | 60,745 | 61,319 |

หมายเหตุ ^{1/} จะต้องใช้จำนวนครั้งของการตอกต่อชั้นเป็น 27.5 ครั้ง (จากการคำนวณ) หรือคิดเป็น 28 ครั้ง เพื่อให้ได้พลังงานต่อปริมาตรใกล้เคียงกับเมื่อใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน

10. ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)

คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

ในงานวิจัยนี้ จะแบ่งตัวอย่างทดสอบออกเป็น 2 กลุ่ม เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดแกนเดียว คือ ดินกระจายตัวปานกลางกับดินไม่กระจายตัว โดยมีระดับของการกระจายตัวเป็น 38.32 และ 0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ปริมาณความชื้นซึ่งใช้ในการเตรียมตัวอย่าง จะใช้ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจากกราฟการบดอัดดินในแบบทรงกระบอกขนาดเล็ก ($\varnothing 5$ ซม. x 10 ซม.) ซึ่งได้ทำการศึกษาเอาไว้แล้ว เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเป็น 1.37 และ 1.46 ตัน ต่อ ลบ.ม. สม่่าเสมอในทุก ๆ ตัวอย่าง สำหรับดินที่กระจายตัวปานกลางและดินที่ไม่กระจายตัว ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญเกี่ยวกับกำลังของดิน ได้แก่ ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c) และค่ามุมความเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle, ϕ) ของดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพ โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.61 และ 0.33 กก. ต่อ ตร.ซม. ตามลำดับ ส่วนค่ามุมความเสียดทานภายใน จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามสมมติฐานของการทดสอบ ตารางที่ 18 แสดงกำลังเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบที่อายุการบ่มต่าง ๆ

ตารางที่ 18 กำลังเฉลี่ยก่อนการปรับปรุงคุณภาพของดินบริเวณอ่างอุธรธานีเหนือ และอ่างกาฬสินธุ์ โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

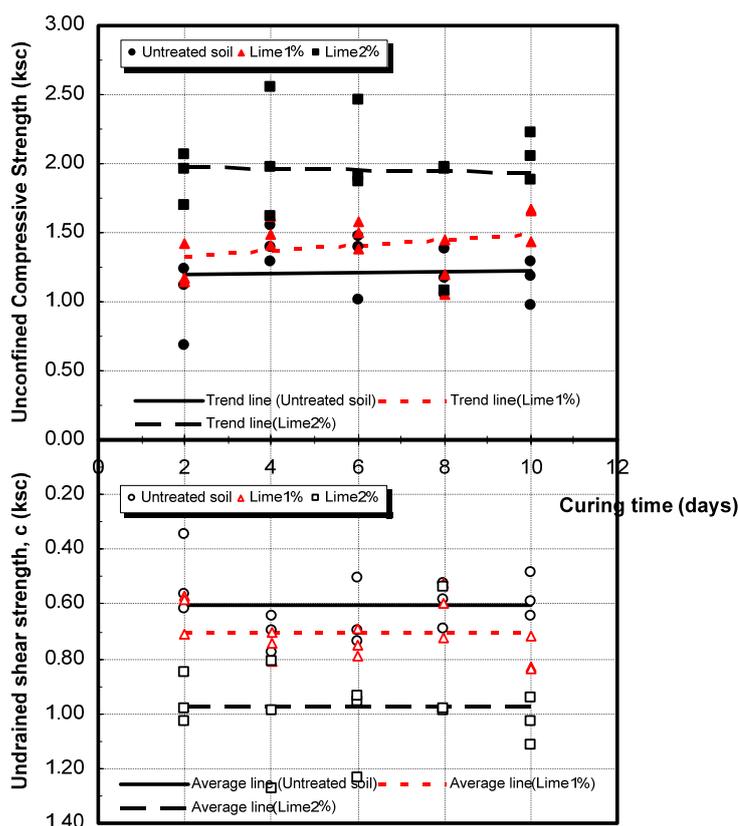
| อายุการบ่ม (วัน) | กำลังรับแรงอัดแกนเดียวเฉลี่ยของตัวอย่าง (กก. ต่อ ตร.ซม.) | | | | | |
|---------------------|--|-------------------|---------------------|---------------------------------|-------------|---------------------|
| | ดินกระจายตัว (อ่างอุธรธานีเหนือ) | | | ดินไม่กระจายตัว (อ่างกาฬสินธุ์) | | |
| | UCS ^{1/} | c ^{2/} | ϕ [°] | UCS | c | ϕ [°] |
| 2 | 1.02 | 0.51 | 0 | 0.71 | 0.36 | 0 |
| 4 | 1.41 | 0.71 | 0 | 0.77 | 0.39 | 0 |
| 6 | 1.29 | 0.65 | 0 | 0.62 | 0.31 | 0 |
| 8 | 1.20 | 0.60 | 0 | 0.58 | 0.29 | 0 |
| 10 | 1.15 | 0.58 | 0 | 0.58 | 0.29 | 0 |
| เฉลี่ย | 1.21 | 0.61 | 0 | 0.65 | 0.33 | 0 |

หมายเหตุ ^{1/} UCS (Unconfined Compressive Strength) คือ กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่จุดวิบัติ

^{2/} ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c) มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่จุดวิบัติ

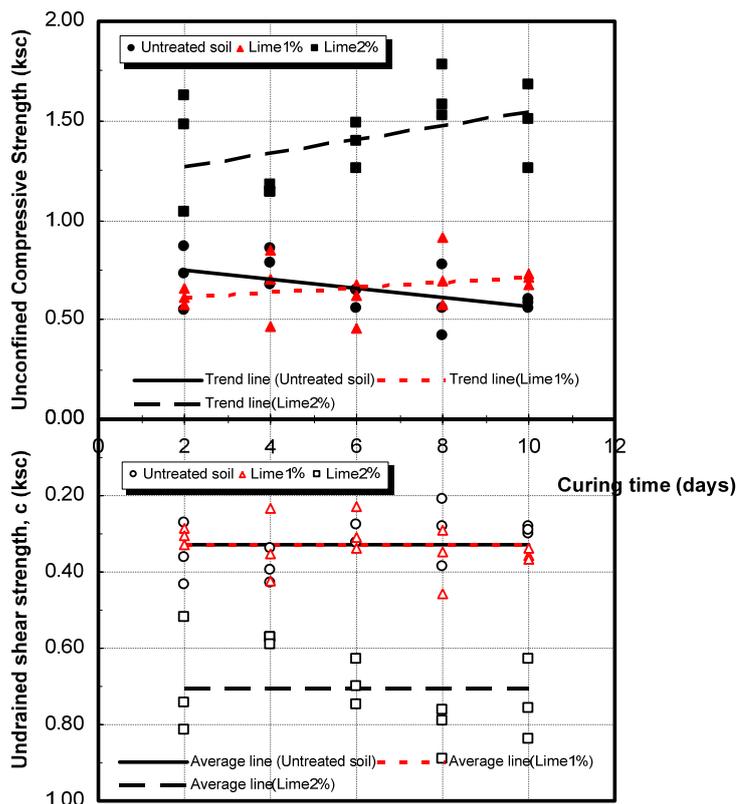
คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพ

การพัฒนากำลังของดิน โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว แสดงดังภาพที่ 63 ตัวอย่าง จะได้รับการปรับปรุงคุณภาพ โดยนำไปผสมกับปูนขาวให้มีสัดส่วนเป็น 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดย น้ำหนักของดินแห้ง และบ่มเป็นเวลา 10 วัน โดยนำมาทดสอบกำลังทุก ๆ 2 วัน เปรียบเทียบกับดิน ซึ่งยังไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ผลการทดสอบพบว่า กำลังโดยเฉลี่ยของดินกระจายตัวและดินไม่ กระจายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของดินแห้ง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากอายุการบ่ม กำลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เล็กน้อยหรือเกือบไม่เพิ่มขึ้นเลย ซึ่งเป็นเพราะปริมาณปูนขาวที่เติมลงไปเพียง 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์นั้น เป็นปริมาณที่ไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของดินแห้งทั้งหมด ตารางที่ 19 แสดงกำลังเฉลี่ย ของดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัว โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์



(ก) อ่างอุรธานีเหนือ

ภาพที่ 63 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าความแข็งแรงของดินก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพ ด้วยปูนขาว



(ข) อ่างกาพสินธุ์

ภาพที่ 63 (ต่อ)

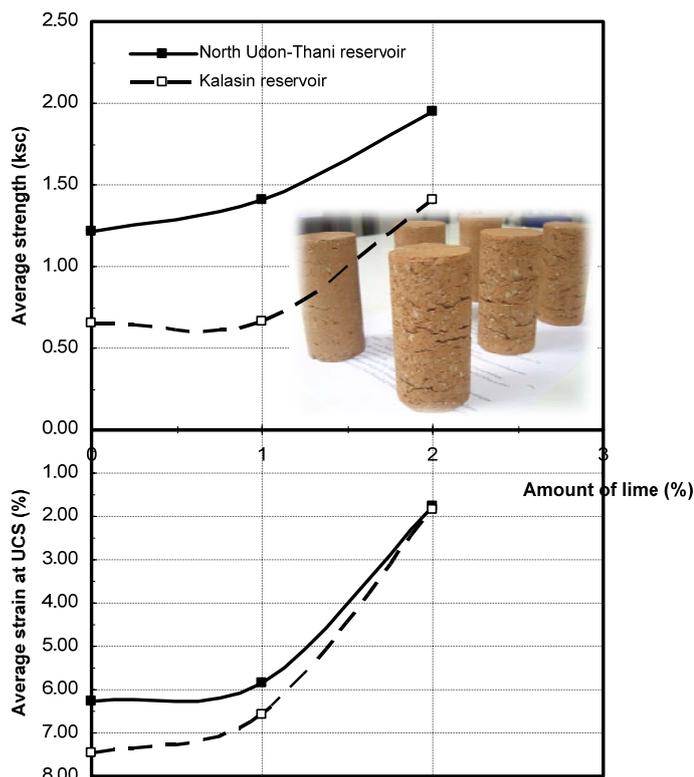
เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความเครียดของตัวอย่างดินที่กำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยไม่คำนึงถึงอายุการบ่ม พบว่า ตัวอย่างดินก่อนปรับปรุงคุณภาพ จะมีเปอร์เซ็นต์ความเครียดเฉลี่ยสูงที่สุดประมาณ 6.25 เปอร์เซ็นต์ และจะค่อย ๆ ลดลงเป็น 5.84 และ 1.76 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณปูนขาวที่ผสม 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างดินอ่างอุทธธานีเหนื่อ ซึ่งจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างดินอ่างกาพสินธุ์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ปูนขาวที่เติมเข้าไปจะทำให้ตัวอย่างดินมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งจะ ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ความเหนียว (Plasticity) ของดินจะลดลง ผลที่ตามมาคือ ดินจะรับกำลังได้เพิ่มขึ้นแต่ดินจะเปราะ (Brittle) และเกิดการวิบัติที่เปอร์เซ็นต์ความเครียดต่ำ ๆ ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม ดังนั้นจะต้องพึงระลึกอยู่เสมอว่า การปรับปรุงคุณภาพดินกระจายตัวโดยใช้ปูนขาว ไม่เพียงแต่จะต้องปรับปรุงคุณสมบัติให้ดินไม่เกิดการกระจายตัวเท่านั้น แต่จะต้องรักษาคุณสมบัติที่ดีด้านอื่น ๆ เช่น ความเหนียวของดิน ความชื้นผ่านของน้ำ ฯลฯ เอาไว้ด้วย การผสมปูนขาวที่มากเกินไป นอกจากจะไม่เป็นผลดีดังที่ได้กล่าวแล้ว ยังทำให้สิ้นเปลืองโดยไม่จำเป็นอีกด้วย (สุภกิจ, 2543) ภาพที่ 64 และตารางที่ 20 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างดินอ่างอุทธธานีเหนื่อและอ่างกาพสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 19 สรุปกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเฉลี่ย (UCS) ของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุทธรานีเหนือและดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม

| อ่างเก็บน้ำ | ผลการจำแนกดิน กระจายตัว/ไม่กระจายตัว | ปริมาณปูนขาว (เปอร์เซ็นต์) | กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ 3 ตัวอย่างทดสอบ (กก. ต่อ ตร.ซม.) | | | | | กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก. ต่อ ตร.ซม.) | | | | | | | |
|---------------|---|-------------------------------|--|-------------|-----------|-------------|------------|--|------------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | บ่ม 2 วัน | บ่ม 4 วัน | บ่ม 6 วัน | บ่ม 8 วัน | บ่ม 10 วัน | | | | | | | | |
| อุทธรานีเหนือ | กระจายตัวปานกลาง | 0 | 1.12 | 1.29 | 1.01 | 1.05 | 0.97 | <i>1.21 (c = 0.61)</i> | | | | | | | |
| | | | 0.68 | <i>1.01</i> | 1.39 | <i>1.41</i> | 1.39 | | <i>1.29</i> | 1.17 | <i>1.20</i> | 1.19 | <i>1.15</i> | | |
| | | | 1.24 | 1.56 | 1.48 | 1.38 | 1.29 | | | | | | | | |
| | | 1 | 1.15 | 1.40 | 1.38 | 1.44 | 1.43 | | <i>1.41 (c = 0.71)</i> | | | | | | |
| | | | 1.42 | <i>1.25</i> | 1.49 | <i>1.50</i> | 1.50 | | | <i>1.49</i> | 1.19 | <i>1.23</i> | 1.65 | <i>1.58</i> | |
| | | | 1.17 | 1.62 | 1.58 | 1.05 | 1.67 | | | | | | | | |
| | | 2 | 1.96 | 1.97 | 1.91 | 1.07 | 1.88 | | | <i>1.95 (c = 0.98)</i> | | | | | |
| | | | 2.06 | <i>1.91</i> | 1.62 | <i>2.05</i> | 2.46 | | | | <i>2.08</i> | 1.98 | <i>1.67</i> | 2.23 | <i>2.05</i> |
| | | | 1.70 | 2.55 | 1.87 | 1.97 | 2.05 | | | | | | | | |
| กาฬสินธุ์ | ไม่กระจายตัว | 0 | 0.55 | 0.67 | 0.56 | 0.56 | 0.56 | <i>0.65 (c = 0.33)</i> | | | | | | | |
| | | | 0.87 | <i>0.72</i> | 0.79 | <i>0.77</i> | 0.64 | | | | <i>0.62</i> | 0.42 | <i>0.58</i> | 0.60 | <i>0.58</i> |
| | | | 0.73 | 0.86 | 0.65 | 0.77 | 0.58 | | | | | | | | |
| | | 1 | 0.57 | 0.47 | 0.46 | 0.58 | 0.72 | | <i>0.66 (c = 0.33)</i> | | | | | | |
| | | | 0.61 | <i>0.61</i> | 0.70 | <i>0.67</i> | 0.62 | | | | <i>0.58</i> | 0.69 | <i>0.73</i> | 0.68 | <i>0.71</i> |
| | | | 0.66 | 0.85 | 0.67 | 0.91 | 0.73 | | | | | | | | |
| | | 2 | 1.04 | 1.14 | 1.40 | 1.52 | 1.26 | | | <i>1.41 (c = 0.70)</i> | | | | | |
| | | | 1.48 | <i>1.38</i> | 1.14 | <i>1.15</i> | 1.49 | | | | <i>1.38</i> | 1.58 | <i>1.63</i> | 1.51 | <i>1.48</i> |
| | | | 1.63 | 1.18 | 1.26 | 1.78 | 1.68 | | | | | | | | |

ตารางที่ 20 สรุปความเครียดเฉลี่ยที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (ϵ_{atUCS}) ของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุธรธานีเหนือและดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม

| อ่างเก็บน้ำ | ผลการจำแนกดิน กระจายตัว/ไม่กระจายตัว | ปริมาณปูนขาว (เปอร์เซ็นต์) | ความเครียดที่กำลังรับแรงอัดสูงสุดของ 3 ตัวอย่างทดสอบ (เปอร์เซ็นต์) | | | | | ความเครียดเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์) | | | | | | |
|---------------|---|-------------------------------|--|-----------|------|-----------|-----------|-----------------------------------|------------|------|------|------|------|------|
| | | | บ่ม 2 วัน | บ่ม 4 วัน | | บ่ม 6 วัน | บ่ม 8 วัน | | บ่ม 10 วัน | | | | | |
| อุธรธานีเหนือ | กระจายตัวปานกลาง | 0 | 4.11 | 6.43 | | 9.65 | 9.82 | 7.04 | 6.25 | | | | | |
| | | | 2.73 | 3.58 | 4.59 | 5.18 | 8.45 | 7.54 | | 5.49 | 7.92 | 7.46 | 7.06 | |
| | | | 3.89 | 4.51 | | 4.52 | 8.44 | | | 6.69 | | | | |
| | | 1 | 5.07 | 3.54 | | 4.69 | 6.64 | 6.47 | | 5.84 | | | | |
| | | | 8.39 | 7.09 | 4.72 | 5.38 | 5.54 | 5.10 | | | 3.34 | 5.75 | 6.28 | 5.89 |
| | | | 7.81 | 7.87 | | 5.08 | 7.27 | | | | 4.91 | | | |
| | | 2 | 1.77 | 1.76 | | 1.37 | 0.79 | 0.59 | | 1.76 | | | | |
| | | | 2.74 | 1.90 | 2.94 | 2.35 | 2.16 | 1.76 | | | 1.96 | 1.50 | 1.57 | 1.31 |
| | | | 1.18 | 2.36 | | 1.76 | 1.76 | | | | 1.77 | | | |
| กาฬสินธุ์ | ไม่กระจายตัว | 0 | 7.26 | 7.07 | | 7.06 | 8.24 | 7.25 | 7.45 | | | | | |
| | | | 7.84 | 7.13 | 6.69 | 7.20 | 8.06 | 7.01 | | 8.66 | 8.25 | 8.21 | 7.65 | |
| | | | 6.29 | 7.85 | | 5.91 | 7.86 | | | 7.49 | | | | |
| | | 1 | 4.71 | 2.94 | | 2.56 | 8.05 | 7.46 | | 6.60 | | | | |
| | | | 7.45 | 6.67 | 7.84 | 5.82 | 7.25 | 5.63 | | | 7.28 | 7.79 | 7.07 | 7.07 |
| | | | 7.86 | 6.68 | | 7.07 | 8.04 | | | | 6.68 | | | |
| | | 2 | 1.77 | 1.97 | | 1.37 | 2.55 | 1.76 | | 1.85 | | | | |
| | | | 1.77 | 1.83 | 2.36 | 2.10 | 1.37 | 1.50 | | | 1.77 | 2.09 | 1.96 | 1.70 |
| | | | 1.96 | 1.97 | | 1.76 | 1.96 | | | | 1.38 | | | |



ภาพที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเครียดกับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวโดยเฉลี่ย ของดิน บริเวณอ่างอุครธานีเหนือกับอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์

11. ผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test)

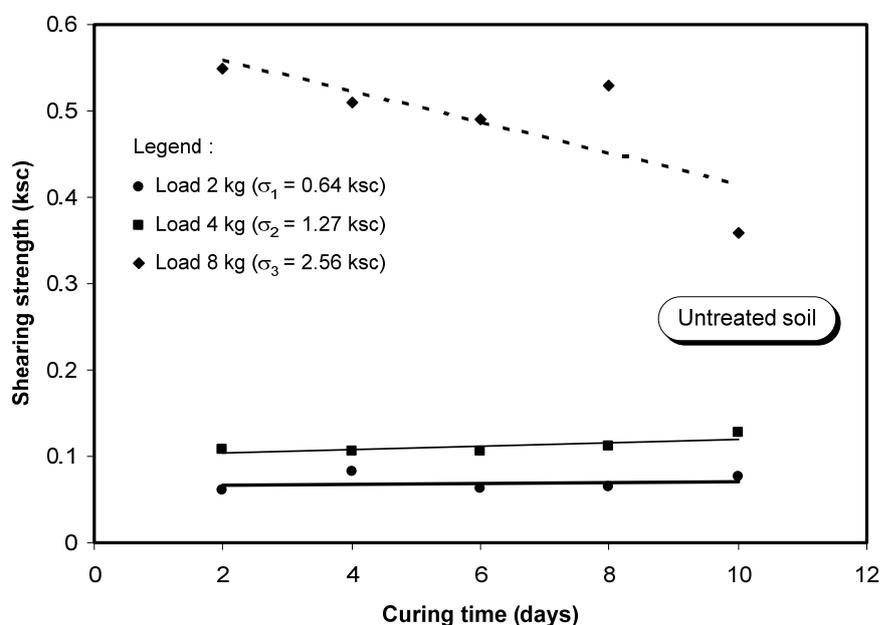
คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

คุณสมบัติของดินโดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง ของดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัว ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบแบบเร็วแต่ยอมให้ตัวอย่างดินเกิดการยุบตัวจากน้ำหนักกดทับในแนวตั้งก่อนการให้แรงเฉือน (CU-Test) ปริมาณความชื้นที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างดิน จะใช้ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจากกราฟการบดอัดดินในแบบทรงกระบอกมาตรฐาน ($\varnothing 10$ ซม.x11.7 ซม.) ซึ่งได้ทำการศึกษาเอาไว้แล้ว เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเป็น 1.51 และ 1.57 ตัน ต่อ ลบ.ม. สำหรับดินกระจายตัวและดินที่ไม่กระจายตัว ตามลำดับ ผลจากการศึกษาพบว่า ดินบริเวณอ่างอุครธานีเหนือก่อนการปรับปรุงคุณภาพ จะมีมุมความเสียดทานภายในเฉลี่ยประมาณ 13.22 องศา และมีค่าความเชื่อมแน่นประมาณ 0 กก. ต่อ ตร.ซม. สำหรับอ่างกาฬสินธุ์ จะมีมุมความเสียดทานภายในเฉลี่ยมากกว่าอ่างอุครธานีเหนือประมาณ 16.35 องศา ในขณะที่ความเชื่อมแน่นมีค่าประมาณ 0 เช่นเดียวกัน ตารางที่ 21 และภาพที่ 65 แสดงกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างตามอายุการบ่ม ซึ่งใช้น้ำหนักกดทับในแนวตั้งต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 21 กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรงของตัวอย่างทดสอบ ที่หน่วยแรงกดในแนวตั้ง 0.64, 1.27 และ 2.56 กก. ต่อ ตร.ซม.

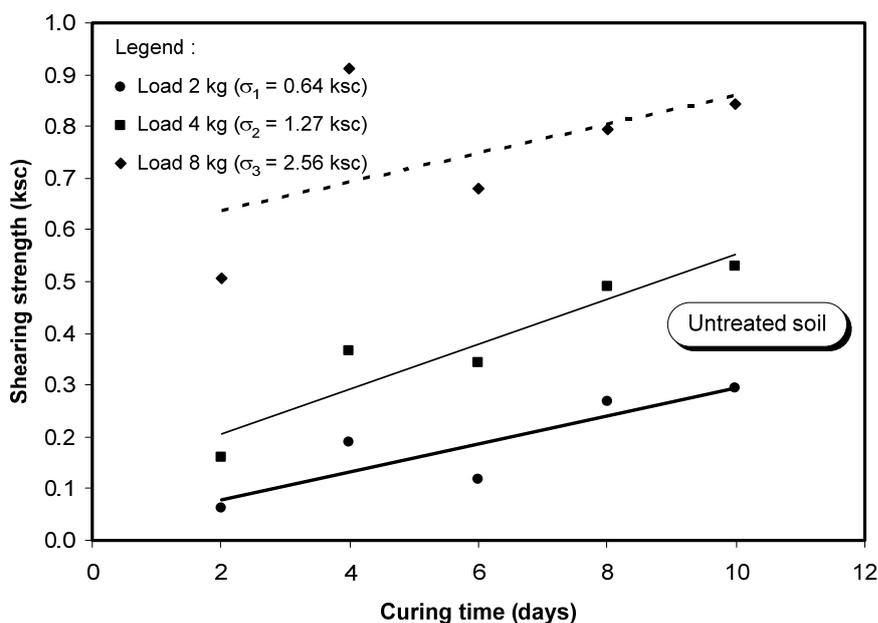
| อายุการบ่ม (วัน) | กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือน โดยตรงของตัวอย่าง (กก. ต่อ ตร.ซม.) | | | | | |
|---------------------|---|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| | ดินกระจายตัว (อ่างอุรธานีเหนือ) | | | ดินไม่กระจายตัว (อ่างกาฬสินธุ์) | | |
| | $\sigma_1 = 0.64$ | $\sigma_2 = 1.27$ | $\sigma_3 = 2.56$ | $\sigma_1 = 0.64$ | $\sigma_2 = 1.27$ | $\sigma_3 = 2.56$ |
| 2 | 0.060 | 0.109 | 0.548 | 0.062 | 0.160 | 0.506 |
| 4 | 0.082 | 0.106 | 0.509 | 0.190 | 0.365 | 0.912 |
| 6 | 0.062 | 0.105 | 0.491 | 0.118 | 0.344 | 0.680 |
| 8 | 0.064 | 0.111 | 0.530 | 0.267 | 0.491 | 0.793 |
| 10 | 0.076 | 0.127 | 0.359 | 0.293 | 0.530 | 0.844 |
| เฉลี่ย | 0.069 | 0.112 | 0.487 | 0.186 | 0.378 | 0.747 |
| Strength | c | 0 | | 0 | | |
| Parameters: | ϕ | 13.22° | | 16.35° | | |

หมายเหตุ σ เป็นหน่วยแรงกดในแนวตั้งที่กระทำตั้งฉากกับหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ



(ก) อ่างอุรธานีเหนือ

ภาพที่ 65 กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรงก่อนการปรับปรุงคุณภาพ ตามอายุการบ่ม



(ข) อ่างกาฬสินธุ์

ภาพที่ 65 (ต่อ)

คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพ

การพัฒนากำลังของดิน โดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงตามอายุการบ่มของตัวอย่างดินบริเวณอ่างอุรธานีเหนือและอ่างกาฬสินธุ์ แสดงดังภาพที่ 66 และ 67 ตัวอย่างทดสอบจะได้รับการปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมกับปูนขาวให้มีสัดส่วนเป็น 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของดินแห้ง และบ่มเป็นเวลา 10 วัน โดยนำมาทดสอบกำลังทุก ๆ 2 วัน เปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ผลการทดสอบพบว่า กำลังเฉือนของดินกระจายตัวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง อย่างไรก็ตาม ที่น้ำหนักกดทับในแนวตั้งเท่ากับ 8 กก. เมื่อเปรียบเทียบปริมาณปูนขาวที่ 0 และ 1 เปอร์เซ็นต์ กำลังเฉือนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากที่ปริมาณปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ ดินจะมีดัชนีความเหนียวลดลง (ดินร่วนขึ้น) ทำให้กำลังรับแรงเฉือนโดยตรงน้อยลงตามไปด้วย แต่ที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ดินจะมีดัชนีความเหนียวลดลงมากกว่าที่ปริมาณปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ แต่ดินจะมีความแข็งแรงมากกว่า จึงรับกำลังได้มากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 68 สำหรับกำลังรับแรงเฉือนของดินบริเวณอ่างอุรธานีเหนือและอ่างกาฬสินธุ์ จำแนกตามอายุการบ่มและปริมาณปูนขาว ที่หน่วยแรงกดในแนวตั้งต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 (ก) สรุปกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงเฉลี่ย ของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุครธานีเหนือและดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม โดยใช้น้ำหนักกดทับในแนวตั้ง 2 กิโลกรัม (0.64 กก. ต่อ ตร.ชม.)

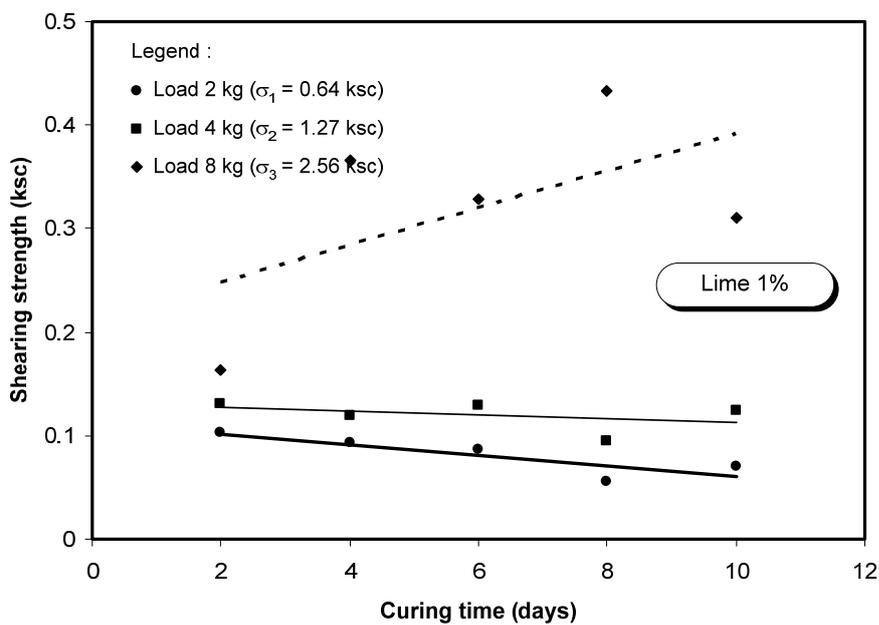
| อ่างเก็บน้ำ | ผลการจำแนกดิน กระจายตัว/ไม่กระจายตัว | ปริมาณปูนขาว (เปอร์เซ็นต์) | กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรงของตัวอย่าง (กก. ต่อ ตร.ชม.) | | | | | กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ย (กก. ต่อ ตร.ชม.) |
|---------------|---|-------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|------------|--|
| | | | บ่ม 2 วัน | บ่ม 4 วัน | บ่ม 6 วัน | บ่ม 8 วัน | บ่ม 10 วัน | |
| อุครธานีเหนือ | กระจายตัวปานกลาง | 0 | 0.06 | 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.07 |
| | | 1 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0.07 | 0.08 |
| | | 2 | 0.13 | 0.12 | 0.10 | 0.05 | 0.10 | 0.10 |
| กาฬสินธุ์ | ไม่กระจายตัว | 0 | 0.06 | 0.19 | 0.12 | 0.27 | 0.29 | 0.19 |
| | | 1 | 0.11 | 0.20 | 0.16 | 0.13 | 0.30 | 0.18 |
| | | 2 | 0.24 | 0.20 | 0.27 | 0.40 | 0.32 | 0.28 |

ตารางที่ 22 (ข) สรุปกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงเฉลี่ย ของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุครธานีเหนือและดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม โดยใช้น้ำหนักกดทับในแนวตั้ง 4 กิโลกรัม (1.27 กก. ต่อ ตร.ชม.)

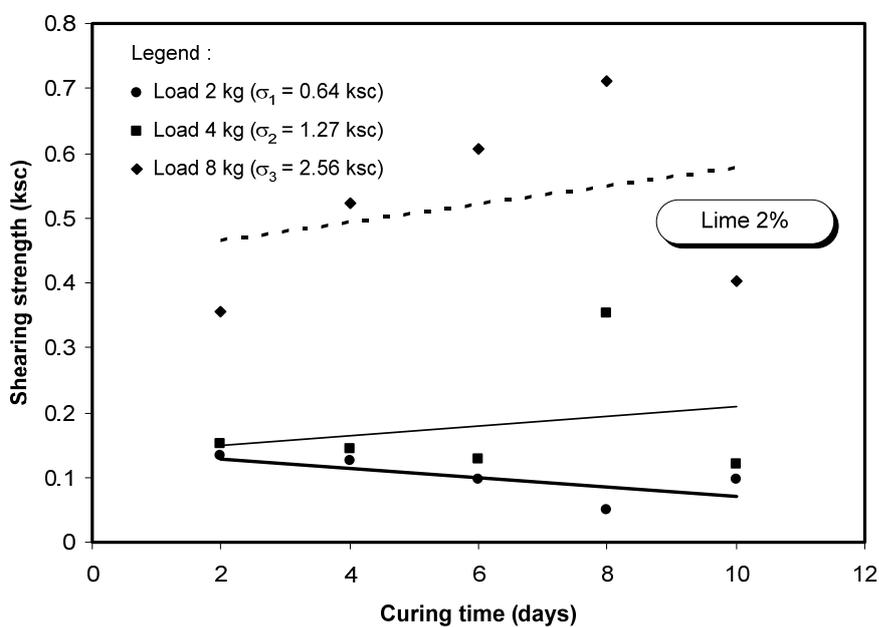
| อ่างเก็บน้ำ | ผลการจำแนกดิน กระจายตัว/ไม่กระจายตัว | ปริมาณปูนขาว (เปอร์เซ็นต์) | กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรงของตัวอย่าง (กก. ต่อ ตร.ชม.) | | | | | กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ย (กก. ต่อ ตร.ชม.) |
|---------------|---|-------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|------------|--|
| | | | บ่ม 2 วัน | บ่ม 4 วัน | บ่ม 6 วัน | บ่ม 8 วัน | บ่ม 10 วัน | |
| อุครธานีเหนือ | กระจายตัวปานกลาง | 0 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.13 | 0.11 |
| | | 1 | 0.13 | 0.12 | 0.13 | 0.10 | 0.12 | 0.12 |
| | | 2 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.35 | 0.12 | 0.18 |
| กาฬสินธุ์ | ไม่กระจายตัว | 0 | 0.16 | 0.37 | 0.34 | 0.49 | 0.53 | 0.38 |
| | | 1 | 0.49 | 0.51 | 0.50 | 0.44 | 0.62 | 0.51 |
| | | 2 | 0.63 | 0.55 | 0.58 | 0.45 | 0.68 | 0.58 |

ตารางที่ 22 (ค) สรุปกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงเฉลี่ย ของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุครธานีเหนือและดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามอายุการบ่ม โดยใช้น้ำหนักกดทับในแนวดิ่ง 8 กิโลกรัม (2.56 กก. ต่อ ตร.ชม.)

| อ่างเก็บน้ำ | ผลการจำแนกดิน กระจายตัว/ไม่กระจายตัว | ปริมาณปูนขาว (เปอร์เซ็นต์) | กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรงของตัวอย่าง (กก. ต่อ ตร.ชม.) | | | | | กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ย (กก. ต่อ ตร.ชม.) |
|---------------|---|-------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|------------|--|
| | | | บ่ม 2 วัน | บ่ม 4 วัน | บ่ม 6 วัน | บ่ม 8 วัน | บ่ม 10 วัน | |
| อุครธานีเหนือ | กระจายตัวปานกลาง | 0 | 0.55 | 0.51 | 0.49 | 0.53 | 0.36 | 0.49 |
| | | 1 | 0.16 | 0.37 | 0.33 | 0.43 | 0.31 | 0.36 |
| | | 2 | 0.36 | 0.52 | 0.61 | 0.71 | 0.40 | 0.52 |
| กาฬสินธุ์ | ไม่กระจายตัว | 0 | 0.51 | 0.91 | 0.68 | 0.79 | 0.84 | 0.75 |
| | | 1 | 0.87 | 0.81 | 0.90 | 0.83 | 0.83 | 0.85 |
| | | 2 | 1.12 | 1.09 | 1.22 | 0.96 | 1.03 | 1.09 |

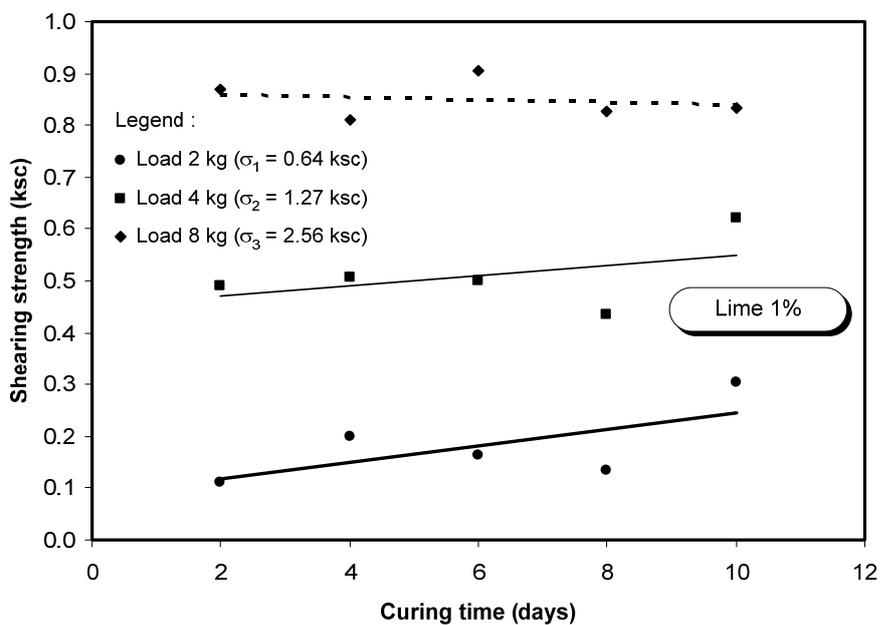


(ก) ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์

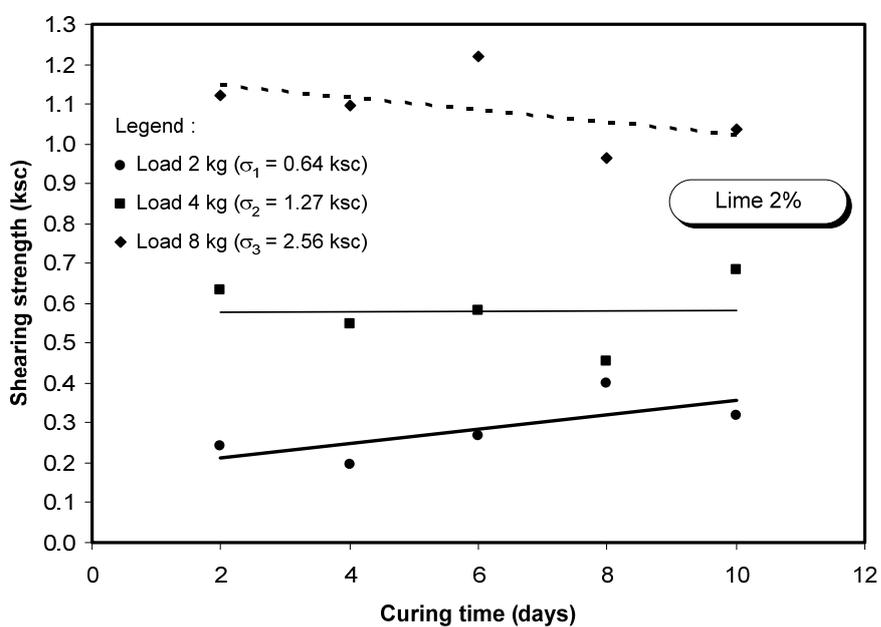


(ข) ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 66 กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรง หลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างดินบริเวณอ่างอุครธานีเหนือ ตามอายุการบ่ม

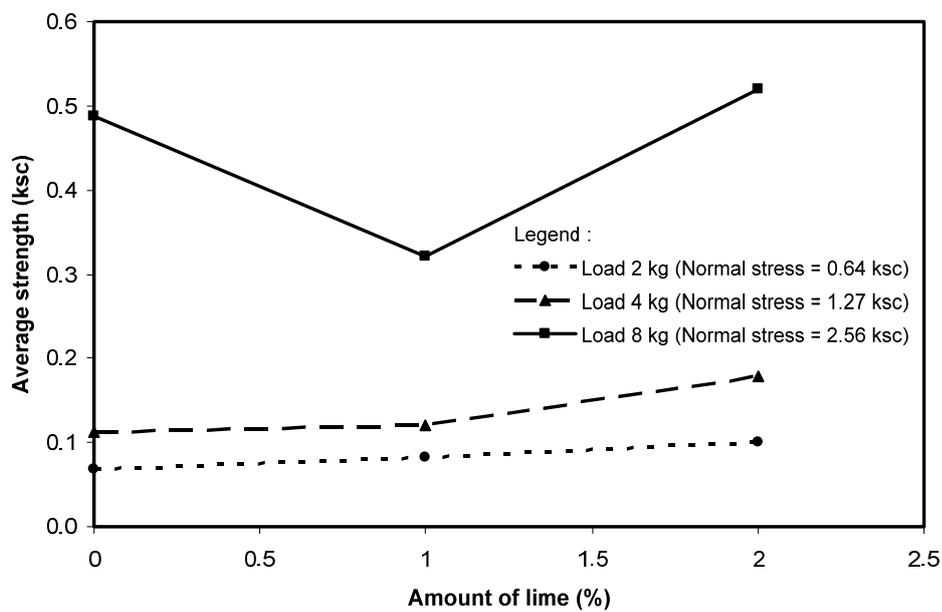


(ก) ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์

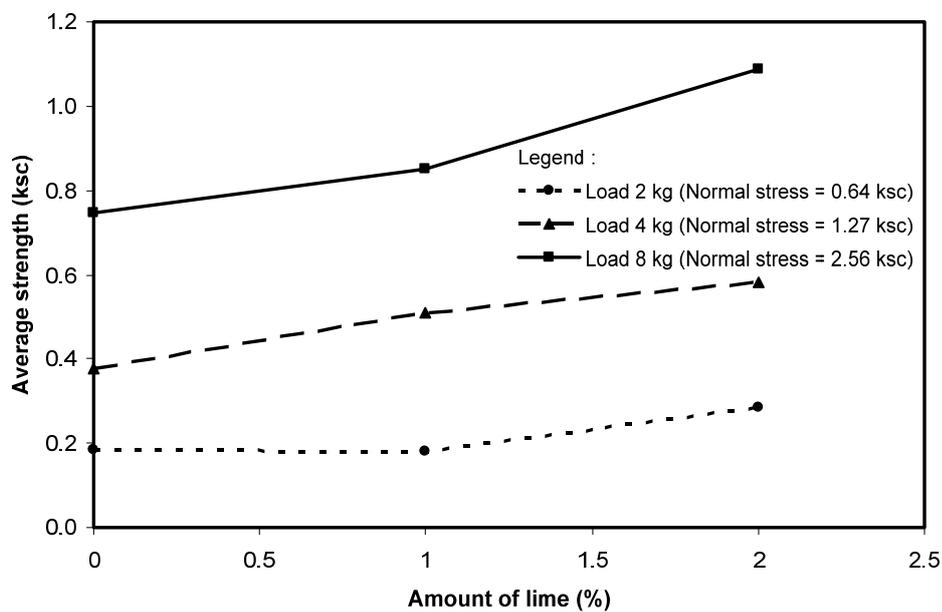


(ข) ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 67 กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรง หลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างดินบริเวณอ่างกาพินธุ์ ตามอายุการบ่ม



(ก) อ่างอุครธานีเหนื่อ



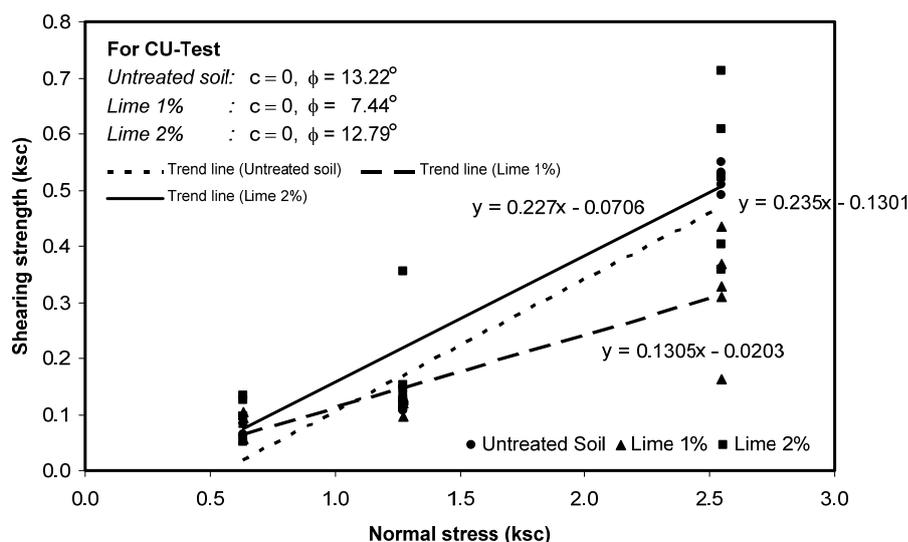
(ข) อ่างกาฬสินธุ์

ภาพที่ 68 กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรงเฉลี่ย ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างดินบริเวณอ่างอุครธานีเหนื่อและอ่างกาฬสินธุ์

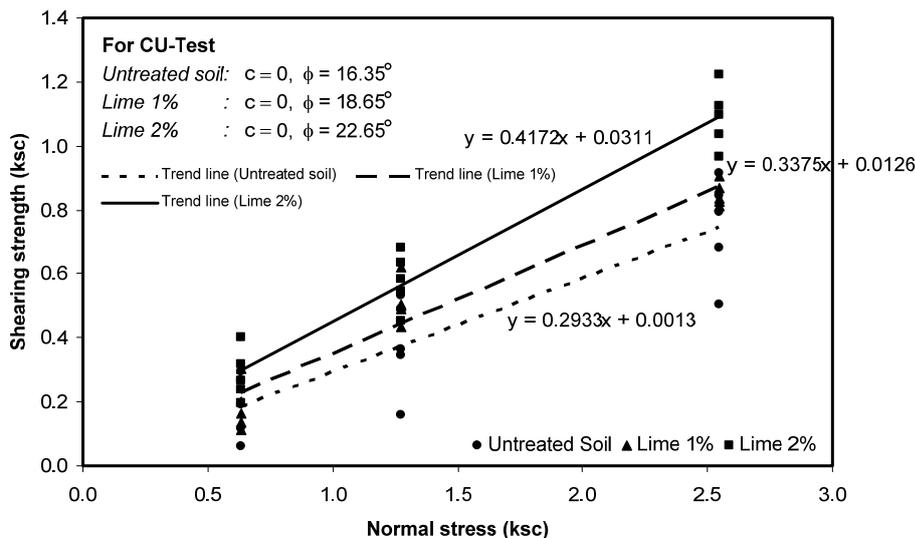
การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง จะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ทางด้านกำลังที่สำคัญ 2 ตัว คือ ค่ามุมเสียดทานภายในและค่าความเชื่อมแน่นของดิน ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณปูนขาวที่ผสมลงไปไม่ได้ช่วยให้ดินมีค่าความเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้น แต่กลับทำให้ค่าดังกล่าวลดลง เพราะดินจะมีค่าดัชนีความเหนียวลดลง ปริมาณปูนขาวที่เติมลงไป 1 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ค่ามุมเสียดทานภายในของดินบริเวณอ่างอุธรธานีเหนือลดลงจาก 13.22 องศา เป็น 7.44 องศา แต่ที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ จะไม่ทำให้มุมเสียดทานภายในลดลงมากนัก ดังแสดงในภาพที่ 69(ก) ซึ่งจะตรงข้ามกับดินบริเวณอ่างกาพสินธุ์ โดยมุมความเสียดทานภายในของดินที่ปริมาณปูนขาวหนึ่ง ๆ (ϕ_x) จะมีค่าเท่ากับมุมความเสียดทานภายในเดิมที่ปริมาณปูนขาวน้อยกว่าอยู่ 1 เปอร์เซ็นต์ (ϕ_{x-1}) บวกกับ 2 เท่าของปริมาณปูนขาวที่ผสมลงไป ($2x$) ดังแสดงในภาพที่ 69(ข) และสมการที่ 12

$$\phi_x = \phi_{x-1} + 2x \quad (12)$$

จาก Mohr-Coulomb Failure Envelope ในภาพที่ 69 จะได้สมการที่ใช้แทนความแข็งแรงของมวลดิน ดังนี้ 1) $\tau = \sigma \tan(13.22)$ 2) $\tau = \sigma \tan(7.44)$ และ 3) $\tau = \sigma \tan(12.79)$ สำหรับดินกระจายตัว (อ่างอุธรธานีเหนือ) ที่ไม่ผสมปูนขาว และดินกระจายตัวผสมปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาพสินธุ์ จะได้สมการดังนี้ 1) $\tau = \sigma \tan(16.35)$ 2) $\tau = \sigma \tan(18.65)$ และ 3) $\tau = \sigma \tan(22.65)$ สำหรับดินที่ไม่ได้ผสมปูนขาว และดินที่ผสมปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 69 (ก) Mohr-Coulomb Failure Envelope ของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุธรธานีเหนือ หลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 69 (ข) Mohr-Coulomb Failure Envelope ของดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาสลินธุ์ หลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์

12. ผลทดสอบความซึมน้ำของดิน (Hydraulic Conductivity)

คุณสมบัติด้านความซึมน้ำของดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

คุณสมบัติด้านความซึมน้ำของน้ำ ของดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัวก่อนการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ในงานวิจัยนี้จะเตรียมตัวอย่างโดยทำการการบดอัดลงในแบบมาตรฐาน และใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัด เพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.51 และ 1.57 ตัน ต่อ ลบ.ม. สำหรับดินที่กระจายตัวและดินที่ไม่กระจายตัว ตามลำดับ โดยงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นยีสั่งเคราะห์ประเภทจีโอเท็กซ์ไทล์ สำหรับเป็นวัสดุรองก่อนที่น้ำจะไหลซึมออกมา ผลการทดสอบพบว่า ดินกระจายตัวจะมีค่าความซึมน้ำเฉลี่ย เท่ากับ 7.07×10^{-9} ซม. ต่อ วินาที สูงกว่าดินที่ไม่กระจายตัวซึ่งมีค่าความซึมน้ำเฉลี่ย เท่ากับ 2.79×10^{-9} ซม. ต่อ วินาที ดังแสดงในภาพที่ 70

คุณสมบัติด้านความซึมน้ำของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพ

ผลการทดสอบความซึมน้ำของน้ำของดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัวหลังจากผสมปูนขาวที่ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ดินกระจายตัวเมื่อผสมปูนขาวที่ 1 เปอร์เซ็นต์ ค่าความซึมน้ำของดินจะไม่เพิ่มขึ้นมากนัก แต่ค่าความซึมน้ำของน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ โดยจะเพิ่มขึ้นจาก 7.46×10^{-9} ซม. ต่อ วินาที ที่ปริมาณปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ เป็น 5.84×10^{-8}

ชม. ต่อ วินาที ที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากปูนขาวที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าดัชนีความเหนียวของดินลดลง ทำให้น้ำสามารถไหลซึมผ่านได้สะดวกขึ้น สำหรับดินไม่กระจายตัว พบว่า การผสมปูนขาวที่ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ค่าความซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่อัตราการซึมผ่านโดยเฉลี่ยของน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับดินกระจายตัวจะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย และเนื่องจากความชุ่มชื้นของน้ำที่ไหลซึมผ่านแผ่นใยสังเคราะห์ออกมา น่าจะมีความสัมพันธ์กับระดับการกระจายตัวของดินในแต่ละบริเวณ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการวัดความชุ่มชื้นของน้ำที่ไหลซึมออกมาด้วย เพื่อใช้เปรียบเทียบระหว่างดินกระจายตัวกับดินที่ไม่กระจายตัวบริเวณอ่างเก็บน้ำทั้ง 2 ดังแสดงในภาพที่ 71 ผลการวัดความชุ่มชื้นของน้ำที่ไหลซึมผ่านตัวอย่างดินออกมา แสดงให้เห็นว่า ความชุ่มชื้นของน้ำโดยเฉลี่ยของตัวอย่างดินอ่างอุครธานีเหนือจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะที่ปริมาณปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ จากความชุ่มชื้นเริ่มต้น 45.45 NTU เป็น 22.41 และ 6.11 NTU ที่ปริมาณปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มากกว่าความชุ่มชื้นเริ่มต้นของอ่างกาฬสินธุ์ (24.92 NTU) แล้วความชุ่มชื้นจะค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับอ่างอุครธานีเหนือ ที่ปริมาณปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่น่าสนใจคือความชุ่มชื้นของน้ำที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าต่ำมากและมีแนวโน้มที่จะลดต่ำลงไปอีก (น้อยกว่า 5 NTU) ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำน้ำดิบมาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะการผลิตน้ำประปา

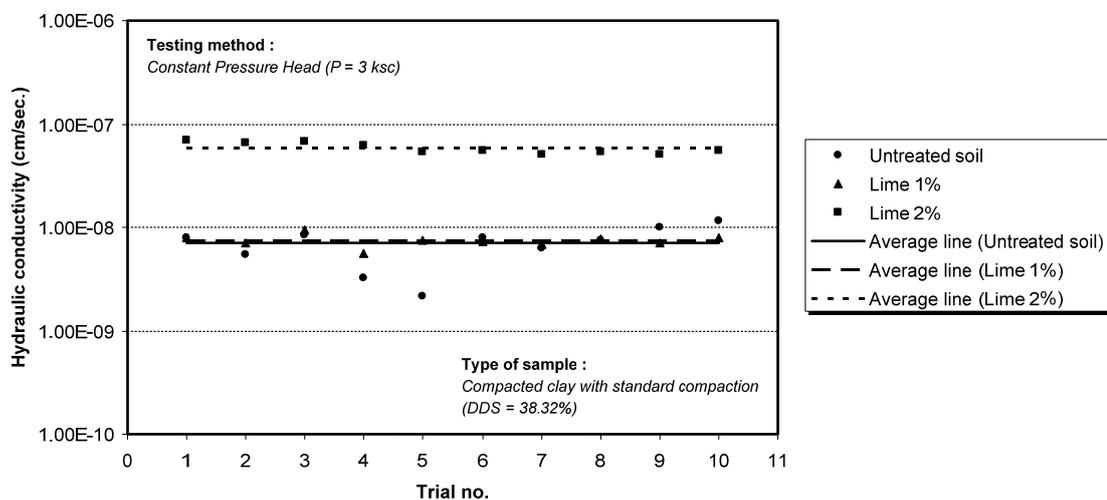
อย่างไรก็ตาม แม้ว่าค่าความซึมผ่านของน้ำในดินจะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของปูนขาวที่เพิ่มขึ้น แต่จากการทดสอบพบว่า ที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้จะทำให้ค่าความซึมผ่านของน้ำโดยเฉลี่ย ของตัวอย่างดินทั้ง 2 อ่าง เพิ่มสูงขึ้นมาก (5.84×10^{-8} และ 1.21×10^{-8} ชม. ต่อ วินาที) แต่ก็ไม่มากเกินไปกว่าข้อกำหนดของการปรับปรุงคุณภาพดินกระจายตัวด้วยปูนขาว ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 1×10^{-4} ชม. ต่อ วินาที (ศุภกิจ, 2543) ตารางที่ 23 แสดงค่าความชื้นน้ำของดินและความชุ่มชื้นของน้ำที่ไหลซึมออกมา ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างดินอ่างอุครธานีเหนือและอ่างกาฬสินธุ์

ตารางที่ 23 สรุปค่าความซึมผ่านของน้ำโดยเฉลี่ย และความขุ่นเฉลี่ยของน้ำที่ไหลซึมผ่านดิน ของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุทธรานีเหนือและดินไม่กระจายตัว บริเวณอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปุ๋ยขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้วิธี Constant Pressure Head

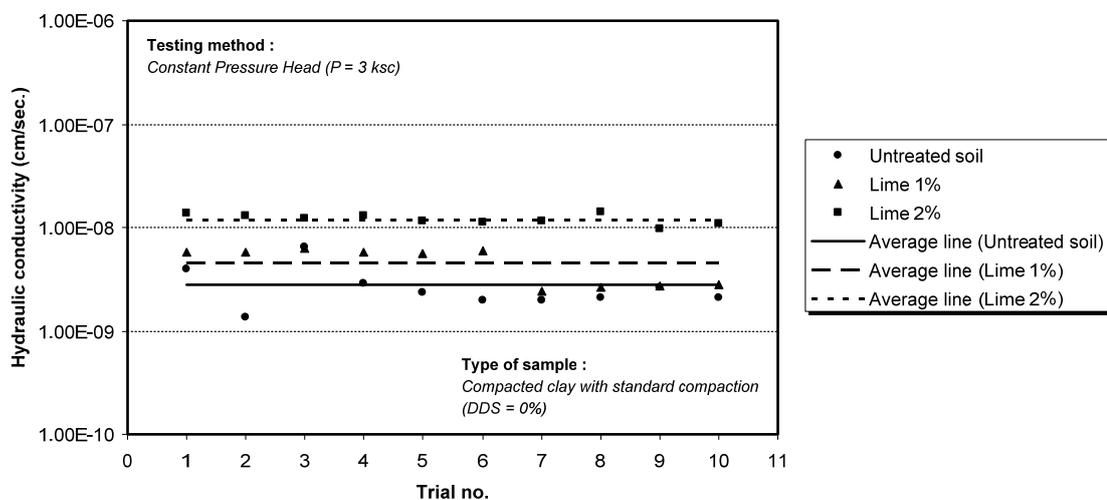
| อ่างเก็บน้ำ | ผลการจำแนกดิน กระจายตัว/ไม่กระจายตัว | ปริมาณปุ๋ยขาว (เปอร์เซ็นต์) | ค่าความซึมผ่านของดินบดอัดแบบมาตรฐาน (ซม. ต่อ วินาที) | | | | | เฉลี่ย | ความขุ่นเฉลี่ยของน้ำ ที่ไหลซึมผ่านดิน (NTU) |
|---------------|---|--------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 | | |
| อุทธรานีเหนือ | กระจายตัวปานกลาง | 0 | 7.93×10^{-9} | 5.52×10^{-9} | 8.40×10^{-9} | 3.24×10^{-9} | 2.14×10^{-9} | 7.07×10^{-9} | 45.45 |
| | | 1 | 7.97×10^{-9} | 7.06×10^{-9} | 9.47×10^{-9} | 5.56×10^{-9} | 7.43×10^{-9} | 7.46×10^{-9} | 22.41 |
| | | 2 | 7.02×10^{-8} | 6.57×10^{-8} | 6.79×10^{-8} | 6.18×10^{-8} | 5.31×10^{-8} | 5.84×10^{-8} | 6.11 |
| กาฬสินธุ์ | ไม่กระจายตัว | 0 | 3.97×10^{-9} | 1.36×10^{-9} | 6.51×10^{-9} | 2.91×10^{-9} | 2.32×10^{-9} | 2.79×10^{-9} | 24.92 |
| | | 1 | 5.74×10^{-9} | 5.80×10^{-9} | 6.34×10^{-9} | 5.85×10^{-9} | 5.67×10^{-9} | 4.59×10^{-9} | 20.76 |
| | | 2 | 1.38×10^{-8} | 1.31×10^{-8} | 1.22×10^{-8} | 1.29×10^{-8} | 1.16×10^{-8} | 1.21×10^{-8} | 5.62 |

ตารางที่ 23 (ต่อ)

| อ่างเก็บน้ำ | ผลการจำแนกดิน กระจายตัว/ไม่กระจายตัว | ปริมาณปูนขาว (เปอร์เซ็นต์) | ค่าความขุ่นน้ำของดินบดอัดแบบมาตรฐาน (ชม. ต่อ วินาที) | | | | | | ความขุ่นของน้ำ ที่ไหลซึมผ่านดิน (NTU) |
|---------------|---|-------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| | | | ครั้งที่ 6 | ครั้งที่ 7 | ครั้งที่ 8 | ครั้งที่ 9 | ครั้งที่ 10 | เฉลี่ย | |
| อุดรธานีเหนือ | กระจายตัวปานกลาง | 0 | 7.98×10^{-9} | 6.21×10^{-9} | 7.54×10^{-9} | 1.01×10^{-8} | 1.16×10^{-8} | 7.07×10^{-9} | 45.45 |
| | | 1 | 7.36×10^{-9} | 6.93×10^{-9} | 7.74×10^{-9} | 7.13×10^{-9} | 7.92×10^{-9} | 7.46×10^{-9} | 22.41 |
| | | 2 | 5.56×10^{-8} | 5.12×10^{-8} | 5.30×10^{-8} | 5.08×10^{-8} | 5.46×10^{-8} | 5.84×10^{-8} | 6.11 |
| กาฬสินธุ์ | ไม่กระจายตัว | 0 | 1.99×10^{-9} | 1.97×10^{-9} | 2.12×10^{-9} | 2.61×10^{-9} | 2.12×10^{-9} | 2.79×10^{-9} | 24.92 |
| | | 1 | 6.01×10^{-9} | 2.40×10^{-9} | 2.62×10^{-9} | 2.68×10^{-9} | 2.77×10^{-9} | 4.59×10^{-9} | 20.76 |
| | | 2 | 1.11×10^{-8} | 1.15×10^{-8} | 1.40×10^{-8} | 9.69×10^{-9} | 1.08×10^{-8} | 1.21×10^{-8} | 5.62 |

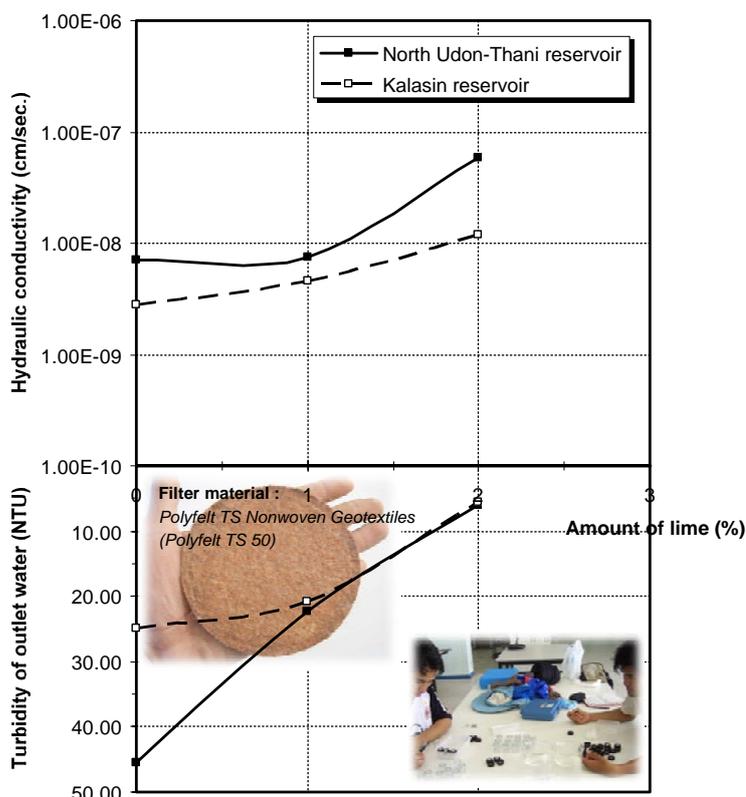


(ก) อ่างอุทธรานี้เหนือ



(ข) อ่างกาฬสินธุ์

ภาพที่ 70 ค่าความซึมน้ำโดยเฉลี่ยของดิน ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
ของดินแห้ง



ภาพที่ 71 ค่าความซึมน้ำโดยเฉลี่ยของดินและค่าความขุ่นเฉลี่ยของน้ำที่ไหลซึมออกมา บริเวณอ่างอุทธรานีเหนือและอ่างกาฬสินธุ์ ที่ปริมาณปูนขาว 0, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์

แนวทางการแก้ไขปัญหาดินกระจายตัว

13. การป้องกันการกัดเซาะผิวหน้าโดยใช้วัสดุสังเคราะห์

อัตราการไหลและความขุ่นของน้ำเมื่อไม่มีวัสดุกรอง

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะทำโดยบดอัดดินลงในแบบที่ใช้ทดสอบ Pinhole Test ให้มีความชื้นและความแน่นใกล้เคียงกับสภาพในสนามและในห้องปฏิบัติการ จากการทดสอบความแน่นของดินในสนามและการบดอัดดินแบบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้ทำการศึกษาเอาไว้แล้ว ในหัวข้อที่ 6.4 และหัวข้อที่ 9 ตามลำดับ จะทำให้ทราบปริมาณความชื้นตามธรรมชาติและความแน่นของดินในสนามขณะนั้น รวมทั้งปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) เพื่อนำมาใช้เตรียมตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ สำหรับเป็นตัวแทนของดินที่ขอบเขตต่ำสุด

(Lower Bound) และสูงสุด (Upper Bound) ตามลำดับ การบดอัดดินลงในแบบที่ใช้ทดสอบ Pinhole Test จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Harvard Miniature Tamper ซึ่งใช้สปริงหนัก 15 ปอนด์ หรือ 6.8 กก. ที่มีค่าคงที่ของสปริงค่าหนึ่ง เป็นตัวให้พลังงานในการบดอัด โดยทำการบดอัดทั้งหมด 5 ชั้น ชั้นละ 16 ครั้ง เช่นเดียวกับเมื่อทดสอบ Pinhole Test ซึ่งจะให้พลังงานต่อปริมาตรในการบดอัดประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ ของการบดอัดแบบมาตรฐาน การทดสอบกระทำโดยปล่อยให้ น้ำไหลผ่านตัวอย่างดิน ซึ่งได้จำลองรูรั่วซึมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เอาไว้แล้ว เช่นเดียวกับเมื่อทดสอบ Pinhole Test แต่จะใช้เฮดสูงกว่า 1020 มม. (เฮดสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบ Pinhole Test) คงที่ในทุก ๆ ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ เพื่อจำลองสภาพที่เกิดขึ้นจริงในสนามเมื่อมีน้ำหลากเกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้ จะมีการนำแผ่นใยสังเคราะห์ประเภทจีโอเท็กซ์ไทล์ มาใช้สำหรับเป็นวัสดุรองกอนที่น้ำจะไหลออกมา เปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีวัสดุรอง ผลการทดสอบจะพิจารณาจากความขุ่นและอัตราการไหลของน้ำ รวมทั้งลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง ตารางที่ 24 แสดงปริมาณความชื้นและน้ำหนักดินแห้งที่ต้องใช้ในการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้มีความแน่นตามที่ต้องการ ที่ขอบเขตต่ำสุดและสูงสุด

ผลการทดสอบพบว่า เมื่อไม่มีวัสดุรอง อัตราการไหลของน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มสูงขึ้น ไปเรื่อย ๆ จนไม่อาจคาดเดาได้ โดยเฉพาะการทดสอบที่ขอบเขตต่ำสุดซึ่งมีปริมาณความชื้นในสนามต่ำมาก ๆ นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ปริมาณความชื้นในการบดอัดต่ำ ๆ (น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์) จะทำให้ตัวอย่างดินเกิดการวิบัติในระหว่างการทดสอบ ซึ่งจะทำให้ทั้งอัตราการไหลและความขุ่นของน้ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลาอันสั้น โดยลักษณะของการวิบัติจะมีหลายรูปแบบ เช่น เกิดการวิบัติที่รูเจาะซึ่งได้จำลองเอาไว้ล่วงหน้า เกิดการวิบัติที่ด้านข้างของตัวอย่างซึ่งติดกับขอบแบบ หรือเกิดการวิบัติที่ผิวตัวอย่างด้านที่น้ำเข้า (ด้านที่ติดกับกรวยสำหรับเป็นรูเจาะน้ำ) โดยที่การวิบัติแบบแรกจะเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำค่อนข้างสูง น้ำจึงไหลผ่านไปยังส่วนที่อ่อนแอกว่า แทนที่จะไหลผ่านรูเจาะแคบ ๆ ส่วนการวิบัติแบบที่สองจะเกิดขึ้นง่ายกว่าแบบแรก และจะทำให้เกิดการกัดเซาะจำลองในแบบของ Pinhole ซึ่งจะทำให้เข้าใจสภาพการกัดเซาะที่เกิดขึ้นจริงในสนาม โดยที่อัตราการไหลและความขุ่นของน้ำจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับร่องการกัดเซาะดังกล่าวว่า เกิดขึ้นเป็นทางยาวจนถึงผิวของตัวอย่างด้านที่น้ำไหลออกหรือไม่ การวิบัติแบบสุดท้ายจะเกิดขึ้นบ่อยที่สุด เนื่องจากความชื้นในการบดอัดต่ำ ดังนั้นผิวของตัวอย่างด้านที่น้ำเข้าจึงถูกกัดเซาะก่อนบริเวณอื่น ๆ ส่วนจะขยายผลต่อไปจนเกิดการวิบัติเป็นแบบแรกหรือแบบที่สอง ขึ้นอยู่กับค่าดัชนีความเหนียวของดินและปริมาณส่วนละเอียดของดิน ซึ่งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับของการกระจายตัว รวมทั้งยังขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ในการเตรียมตัวอย่างด้วย

ตารางที่ 24 ปริมาณความชื้นและน้ำหนักของดินแห้งที่ต้องใช้ในการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้มีความแน่นตามที่ต้องการ ที่ขอบเขตต่ำสุดและสูงสุด

| อ่างเก็บน้ำ/ กองดินถม | ขอบเขตต่ำสุด ^{1/} | | ขอบเขตสูงสุด ^{2/} | | | น้ำหนักดินแห้งที่ต้องใช้ (W_d) ^{3/} ต่อ 1 ตัวอย่างทดสอบ (กรัม) | | |
|--------------------------|---|---|---|---|--------------|--|--------|-----------------|
| | ความชื้นของดิน ตามธรรมชาติ (w_n) | ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย ในสนาม ($\gamma_{d, avg.}$) _{field} | ปริมาณความชื้น ที่เหมาะสม ($w_{opt.}$) | ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ในห้องปฏิบัติการ ($\gamma_{d, max.}$) _{lab} | ขอบเขตต่ำสุด | ขอบเขตสูงสุด | | |
| | (เปอร์เซ็นต์) | (กรัม) | (ตัน ต่อ ลบ.ม.) | (เปอร์เซ็นต์) | | | (กรัม) | (ตัน ต่อ ลบ.ม.) |
| กองดินถม | 19.67 | 8.66 | 0.97 | - | - | - | 44.01 | - |
| อุดรธานีเหนือ | 7.53 | 4.10 | 1.20 | 23.00 | 15.76 | 1.51 | 54.45 | 68.51 |
| อุดรธานีใต้ | 4.81 | 3.16 | 1.45 | - | - | - | 65.79 | - |
| กาฬสินธุ์ | 4.01 | 2.42 | 1.33 | 24.60 | 17.52 | 1.57 | 60.34 | 71.23 |
| มุกดาหาร | 9.67 | 4.91 | 1.12 | - | - | - | 50.82 | - |
| สกลนคร | 7.51 | 3.65 | 1.07 | - | - | - | 48.55 | - |

หมายเหตุ ^{1/} ขอบเขตต่ำสุด จะใช้ปริมาณความชื้นของดินตามธรรมชาติและค่าความแน่นของดินในสนามขณะนั้น ซึ่งได้จากการทดสอบความแน่นของดินในสนาม โดยวิธีแทนที่ทราย ที่ได้ศึกษาไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.4

^{2/} ขอบเขตสูงสุด จะใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ซึ่งได้จากการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ ที่ได้ศึกษาไว้แล้วในหัวข้อที่ 9

^{3/} น้ำหนักดินแห้งที่ต้องใช้ ต่อ 1 ตัวอย่างทดสอบ คำนวณได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้
เมื่อ

$$W_d = \gamma_d \cdot (V)$$

V คือ ปริมาตรของดินในแบบ เท่ากับ 45.37 ลบ.ซม.

จะต้องพึงระลึกไว้เสมอว่า วิธีการทดสอบนี้ได้รับการออกแบบมา เพื่อใช้สำหรับจำลองการกัดเซาะที่เกิดขึ้นในสนามให้มาอยู่ในแบบขนาดเล็ก ๆ ในห้องปฏิบัติ ถึงแม้จะใช้เสดของน้ำสูง ๆ เพื่อจำลองความเร็วของน้ำท่าที่ผิวดินเนื่องจากฝนที่ตกแล้วก็ตาม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาในการทดสอบ ซึ่งจะใช้เวลาเพียง 10 นาที ต่อ 1 ตัวอย่างทดสอบเท่านั้น ซึ่งจะแตกต่างจากสภาพในสนามเมื่อฝนตกอาจกินระยะเวลานานเป็นชั่วโมงหรืออาจเป็นวัน ๆ และอาจทำให้การกัดเซาะค่อย ๆ เกิดขึ้นทีละน้อย จนในที่สุดขยายวงกว้างออกไปจนสร้างความเสียหายให้เกิดขึ้นตามมา นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องขอบเขตของตัวอย่างดินที่ถูกจำกัดไว้ในแบบ ซึ่งจะแตกต่างจากในสนามที่ขอบเขตของดินไม่มีที่สิ้นสุด อย่างไรก็ตาม จากภาพที่ 72(ก) ถึง 72(ง) จะเป็นตัวอย่างดินที่เมื่อทำการทดสอบแล้วไม่เกิดการวิบัติในลักษณะดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งจะพบเป็นส่วนน้อยที่การทดสอบที่ขอบเขตต่ำสุดสำหรับการทดสอบที่ขอบเขตสูงสุดนั้น จะเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างดินที่เก็บจากอ่างอุทธรธานีเหนือกับอ่างกาฬสินธุ์ ซึ่งได้ทำการศึกษาคุณสมบัติด้านการบดอัดดินเอาไว้แล้ว นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างของระดับการกระจายตัวมากที่สุดด้วย ผลจากการทดสอบในภาพที่ 73 จะทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างดินกระจายตัวกับดินที่ไม่กระจายตัวได้อย่างชัดเจน โดยที่อัตราการไหลของดินกระจายตัวบริเวณอ่างอุทธรธานีเหนือจะเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลของดินไม่กระจายตัวบริเวณอ่างกาฬสินธุ์เกือบจะคงที่และมีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าอัตราการไหลของดินกระจายตัวจะเพิ่มขึ้น แต่ก็เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เช่นกัน ซึ่งจะแตกต่างจากการทดสอบที่ขอบเขตต่ำสุดที่กล่าวไปแล้วข้างต้น (เปรียบเทียบภาพที่ 72(ข) และ 72(ง) กับภาพที่ 73) ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่า การบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เพื่อให้มีความหนาแน่นแห้ง ตั้งแต่ 95 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะทำให้ดินซึ่งไม่กระจายตัวอยู่แล้ว มีความสามารถในการต้านทานต่อการกัดเซาะทางกลศาสตร์ดีขึ้นมาก โดยอาจไม่จำเป็นต้องมีวัสดุกรอง แต่สำหรับดินกระจายตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นดินที่กระจายตัวรุนแรง การบดอัดดินจะช่วยให้ความสามารถในการต้านทานต่อการกัดเซาะดีขึ้นในระดับหนึ่งเท่านั้น และยังคงมีความจำเป็นต้องหาแนวทางในการแก้ปัญหาการกระจายตัวด้วยวิธีอื่น ๆ เช่น การปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว หรือการป้องกันการกัดเซาะผิวหน้าโดยใช้วัสดุโยสังเคราะห์ เพราะการบดอัดแต่เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะต้านทานต่อการกัดเซาะได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสังเกตได้จากอัตราการไหลของน้ำที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในภาพที่ 73 ถึงแม้ความชุ่มจะไม่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาจากอัตราการไหลในระยะยาวอาจเกิดการกัดเซาะขึ้นได้ และเมื่อการกัดเซาะเกิดขึ้นแล้ว ถึงแม้จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ก็มีโอกาสเป็นไปได้มากที่จะขยายการกัดเซาะดังกล่าวให้ลุกลามจนเกิดความเสียหายอย่างมากต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมได้

เมื่อเปรียบเทียบความชุ่มของน้ำที่ไหลออกมาจากตัวอย่างดินบดอัดซึ่งไม่มีวัสดุกรอง พบว่าที่ขอบเขตต่ำสุด ความชุ่มของน้ำจะมีค่าสูงมาก (เฉลี่ยประมาณ 1000 NTU) ในทุก ๆ อ่างเก็บน้ำและ

บริเวณกอนดินถมที่ทำการทดสอบ จนบางครั้งจะไม่สามารถวัดค่าความขุ่นได้ เพราะเกินขีดจำกัดของเครื่องวัดความขุ่น เมื่อเปรียบเทียบกับที่ขอบเขตสูงสุด พบว่า ความขุ่นของน้ำโดยเฉลี่ยจะต่ำกว่ามาก โดยเฉพาะอ่างกาฬสินธุ์ ความขุ่นโดยเฉลี่ยจะต่ำกว่า 10 NTU ซึ่งมีความใสเพียงพอที่จะนำน้ำดิบมาใช้ผลิตน้ำประปาได้เลยทีเดียว ตารางที่ 25 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของแผ่นใยสังเคราะห์ (จีโอเท็กซ์ไทล์ ที เอส 50) ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 25 คุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของแผ่นใยสังเคราะห์ (จีโอเท็กซ์ไทล์ ที เอส 50)

| Property | Test Standard | Unit | Polyfelt TS Nonwoven Geotextile (TS 50) |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--|
| Physical characteristics | - | - | Continuous filament, nonwoven needle punched |
| Polymer | - | - | 100% polypropylene, UV stabilized |
| Chemical resistance | - | - | No influence at pH range 2-13 |
| Tensile strength | (ave) ISO 10319 | kN/m | 15 |
| CBR puncture strength | ISO 12236 | N | 2350 |
| Effective opening size | (O ₉₀) ISO 12956 | mm | 0.10 |
| Apparent opening size | (O ₉₅) ASTM D 4751 | mm | 0.21 |
| Permittivity | ASTM D 4491 | s ⁻¹ | 2.0 |
| Vertical water flow 50 mm head | ISO 11058 | l/m ² /s (mm/s) | 85 |
| Horizontal water flow | 20 kPa ISO 12958 | l/m.h | 11 |
| | 200 kPa ISO 12958 | l/m.h | 2.9 |
| Nominal mass | ISO 9864 | g/m ² | 200 |
| Thickness | 2 kPa ISO 9863 | mm | 1.9 |

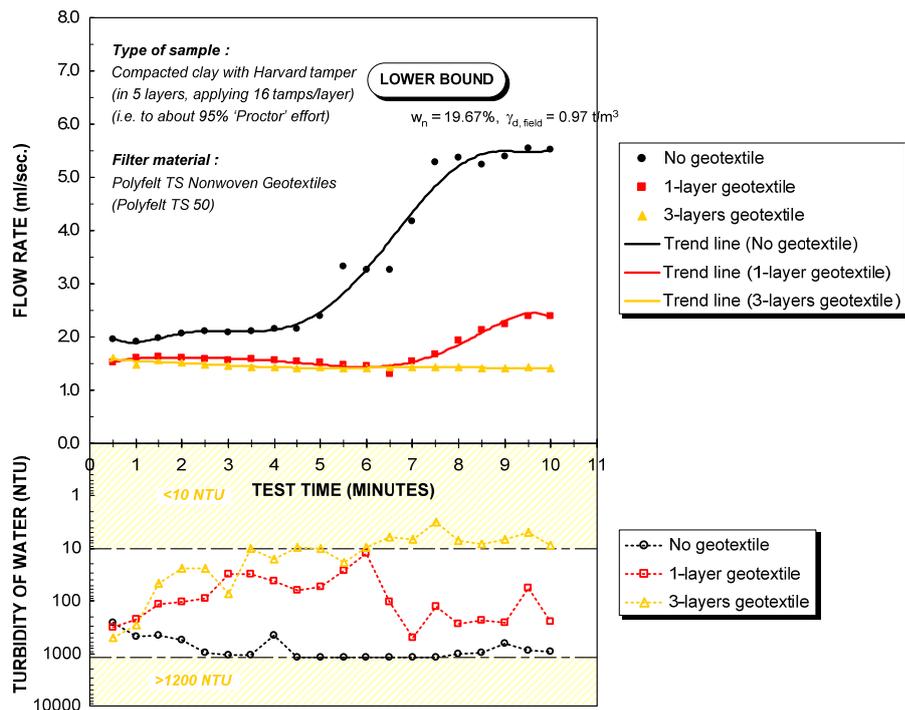
ที่มา: บริษัท โพลีเฟลท์ (ประเทศไทย) จำกัด

อัตราการไหลและความขุ่นของน้ำเมื่อมีวัสดุกรอง

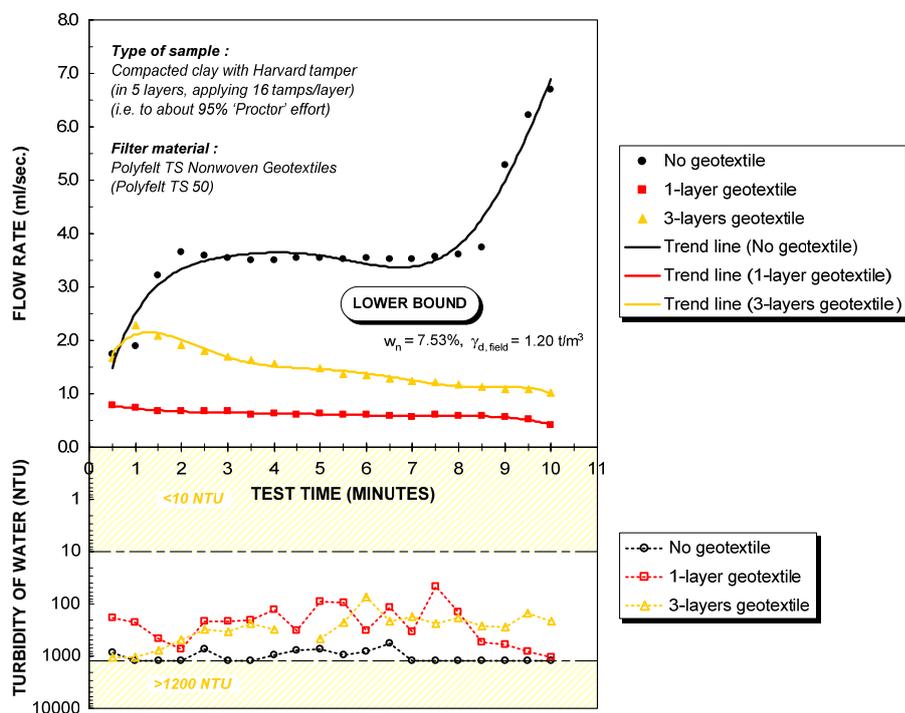
ผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีวัสดุกรอง อัตราการไหลของน้ำจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยเฉพาะเมื่อใช้วัสดุกรอง 3 ชั้น อัตราการไหลจะลดลงต่ำกว่าเมื่อใช้วัสดุกรองเพียงชั้นเดียว ที่เป็นนื้ออธิบายได้ว่า มวลดินเมื่อถูกน้ำกัดเซาะ เม็ดดินขนาดเล็ก ๆ ซึ่งมีพลังงานจลน์สูงกว่าจะถูกพัดพาไปกับน้ำได้ง่ายกว่าเม็ดดินขนาดใหญ่ เม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่ารูเปิด (Effective Opening Size, O₉₀) ของวัสดุกรองซึ่งเคลื่อนที่มาถึงก่อน ก็จะลอดผ่านวัสดุกรองออกไปกับน้ำ ส่วนเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่า

ซึ่งเคลื่อนที่มาที่หลัง ถ้ามีขนาดใหญ่กว่ารูเปิดของวัสดุกรองก็จะไม่สามารถผ่านออกไปกับน้ำได้ และ จะเกิดการสะสมของตะกอน (Filter Cake) ที่ด้านหน้าของแผ่นวัสดุกรองซึ่งสัมผัสกับตัวอย่างดิน การ สะสมของตะกอนนี้จะมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป ผลที่ตามมาคือ จะส่งผลให้น้ำไหลซึมผ่านวัสดุ กรองได้ลำบาก ทำให้อัตราการไหลของน้ำในช่วงเริ่มต้น ซึ่งยังไม่มี การสะสมของตะกอนมากนักเพิ่ม สูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุด เมื่อตะกอนสะสมมากขึ้น ๆ ก็จะทำให้ อัตราการไหลของน้ำค่อย ๆ ลดลงเป็นลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 72(ข) ถึง 72(ง) สำหรับตัวอย่างดินที่ใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดสูง ๆ กลับพบว่าพฤติกรรมของดินจะตรงกันข้ามกับที่กล่าวข้างต้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อ ใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดสูงขึ้นจนใกล้เคียงหรือต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่ดินเปลี่ยนสภาพจาก พลาสติกไปเป็นกิ่งของแข็ง (Plastic Limit, P.L.) เมื่อดินแต่ละเม็ดจะถูกหล่อลื่นด้วยน้ำ และจะมีแรง ยึดเกาะระหว่างเม็ดดินมากขึ้น จึงต้องใช้พลังงานจลน์ในการพัฒนาเม็ดดินสูงขึ้นตามไปด้วย ถ้าหาก ตัวอย่างดินเกิดการวิบัติก็จะเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน ดังนั้นเม็ดดินจึงไม่ถูกพัฒนาออกมากับน้ำหรือถ้าถูก พัฒนาออกมาก็เป็นปริมาณที่ไม่มากนัก และจะไม่เกิดการสะสมของตะกอนที่ด้านหน้าของแผ่นวัสดุ กรอง อัตราการไหลของน้ำจึงค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้น จนถึงจุดสมดุลที่ไม่มีการพัฒนาของตะกอนออกมา กับน้ำอีก อัตราการไหลของน้ำก็จะคงที่ในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 72(ก)

สำหรับความชุ่มชื้นโดยเฉลี่ยของน้ำที่ไหลออกมาเมื่อใช้วัสดุกรอง 3 ชั้น พบว่า จะต่ำกว่าเมื่อใช้ วัสดุกรองเพียงชั้นเดียว และเมื่อพิจารณาการแกว่งตัวของความชุ่มชื้นตลอดการทดสอบ พบว่า จะแกว่ง ตัวขึ้นลงอยู่ในช่วงเท่าเดิม ไม่ได้ลดลงเหมือนกับอัตราการไหลของน้ำเมื่อเวลาผ่านไป หรืออาจกล่าว ได้ว่า ความชุ่มชื้นของน้ำไม่ว่าจะมีวัสดุกรองหรือไม่ก็ตาม จะไม่ส่งผลกระทบต่อความชุ่มชื้นของน้ำที่ไหล ออกมาตลอดการทดสอบ เพียงแต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างมีกับไม่มีวัสดุกรองแล้ว พบว่า ค่าความชุ่มชื้น โดยเฉลี่ยเมื่อมีวัสดุกรองจะต่ำกว่าเมื่อไม่มีวัสดุกรอง ที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งคือ ในหลาย ๆ ครั้ง ของการทดสอบที่ใช้วัสดุกรอง 3 ชั้น ดินจะเกิดการวิบัติที่ผิวตัวอย่างด้านที่น้ำออกหรือบริเวณที่ดิน สัมผัสกับแผ่นวัสดุกรองนั่นเอง ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่า เมื่อเกิดการสะสมของตะกอนมากขึ้น ๆ ก็ จะ เกิดแรงดันของน้ำย้อนกลับ (Back Pressure) ไปปะทะกับผิวตัวอย่างด้านที่สัมผัสกับแผ่นวัสดุกรอง ซึ่งจะส่งผลให้ดินเกิดการวิบัติ และทำให้ทั้งอัตราการไหลและความชุ่มชื้นของน้ำเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะ เมื่อเตรียมตัวอย่างที่ปริมาณความชื้นในการบดอัดต่ำ ๆ แต่เหตุการณ์เช่นนี้จะไม่เกิดขึ้นกับตัวอย่างที่ ทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ เนื่องจากดินจะมีความเชื่อม แน่นมากพอที่จะต้านแรงดันน้ำย้อนกลับจากการสะสมของตะกอนที่แผ่นวัสดุกรองได้ ดังนั้นสำหรับ ดินซึ่งทำการบดอัดที่ความชื้นต่ำ ๆ หรือที่ขอบเขตต่ำสุด จะต้องพึงระวังการใช้วัสดุกรองหลาย ๆ ชั้น ซึ่งนอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองแล้ว ยังทำให้เกิดผลเสียตามมาอีกด้วย สำหรับการแก้ไขอาจทำได้โดย เพิ่มระยะทางของการเกิดแรงดันน้ำย้อนกลับ โดยเปลี่ยนตำแหน่งของแผ่นวัสดุกรองมาอยู่ด้านหลังของ ชั้นกรวดก่อนที่จะถึงรูน้ำออก เพื่อไม่ให้แผ่นวัสดุกรองสัมผัสกับตัวอย่างดินโดยตรง

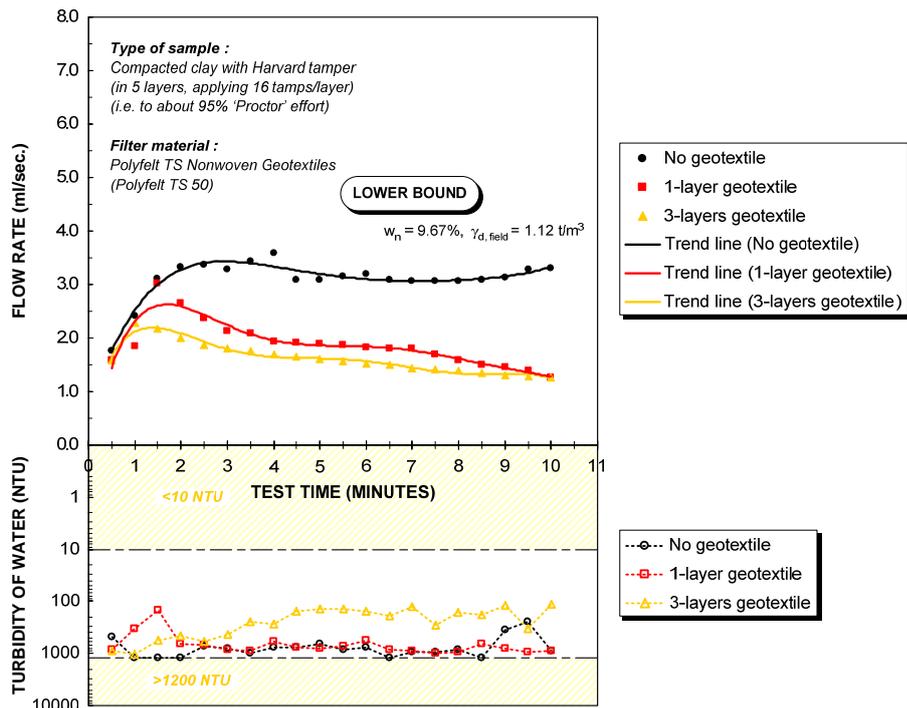


(ก) บริเวณกองดินถม

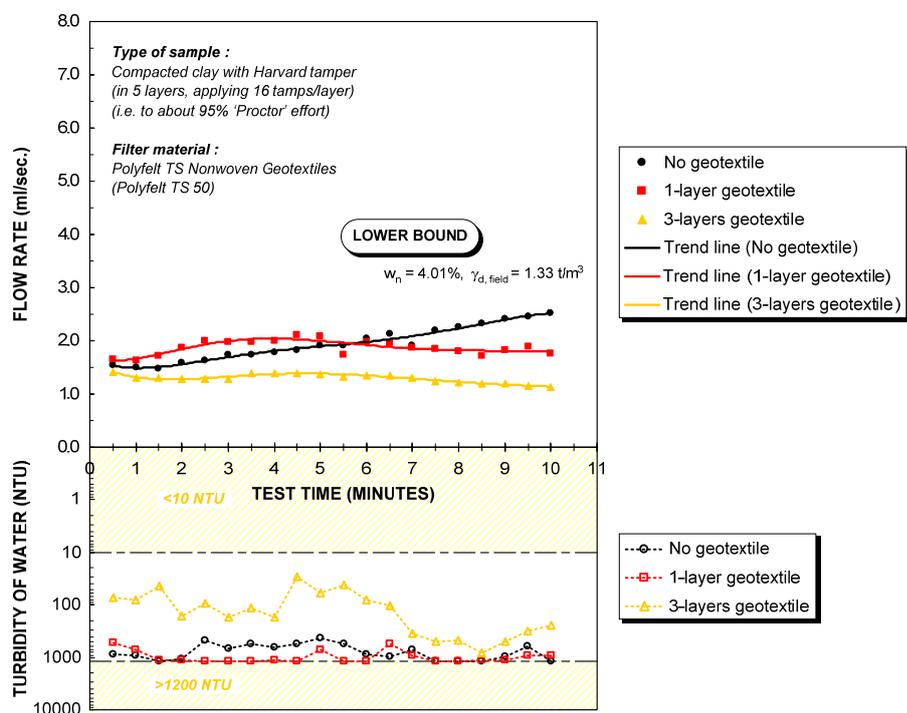


(ข) อ่างอุรธานีเหนือ

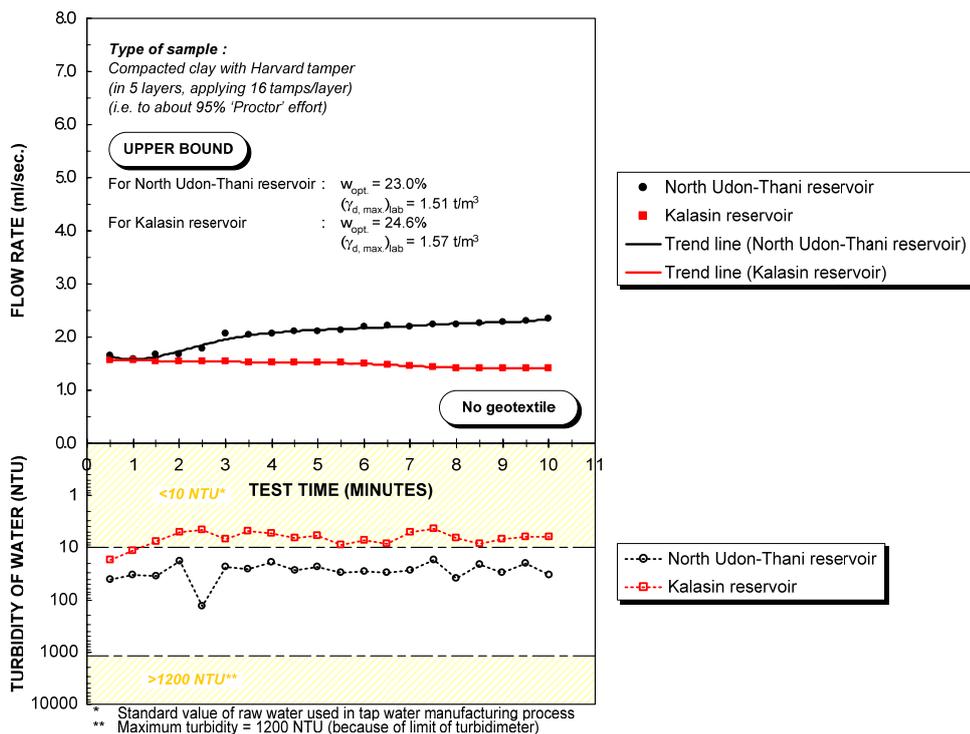
ภาพที่ 72 ความสามารถของจีโอเท็กซ์ไทล์ ที เอส 50 สำหรับทำหน้าที่เป็นวัสดุกรอง เมื่อบดอัด ที่ปริมาณความชื้นใกล้เคียงกับสภาพในสนาม



(ค) อ่างมุกดาหาร



(ง) อ่างกาฬสินธุ์

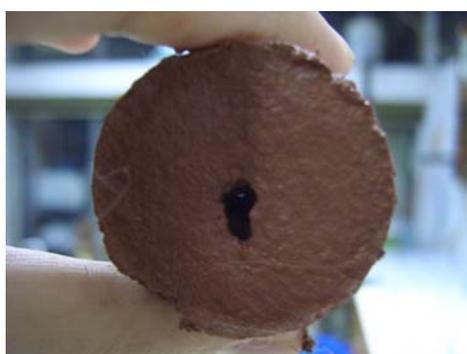


ภาพที่ 73 เปรียบเทียบอัตราการไหลและความขุ่นของน้ำ ของตัวอย่างดินอ่างอุรธานีเหนือ กับอ่างกาฬสินธุ์ เมื่อไม่มีวัสดุกรอง โดยทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

ภาพที่ 74 ถึงภาพที่ 77 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง การพัดพาของตะกอนผ่านรูเจาะดิน การสะสมของตะกอนที่แผ่นวัสดุกรอง สีและความขุ่นของน้ำที่เกิดจากเม็ดดินถูกพัดพาออกมากับน้ำ ตามลำดับ เมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดและจำนวนชั้นของวัสดุกรองแตกต่างกัน ของตัวอย่าง ดินบริเวณอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ



(ก) วัชพืชที่ค้ำข้างของตัวอย่าง (ติดกับขอบแบบ)



(ข) วัชพืชที่รูเจาะซึ่งได้จำลองไว้ล่วงหน้า



(ค) วัชพืชที่ผิวตัวอย่างด้านที่น้ำเข้า-ออก

ภาพที่ 74 ลักษณะการวัชพืชของตัวอย่าง 3 ลักษณะ เมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดสูง (รูป ก และ รูป ข) และเมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดต่ำ (รูป ค) สำหรับวัสดุกรองเพียงชั้นเดียว ซึ่งทำการบดอัดที่ขอบเขตต่ำสุด (Lower Bound)

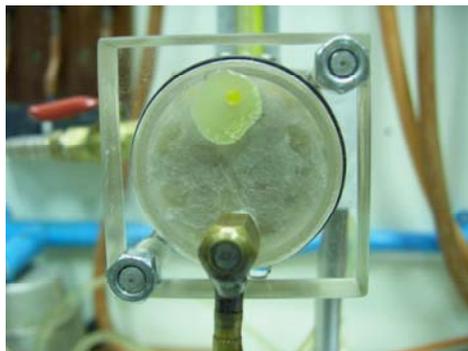


(ก) ขอบเขตต่ำสุด (ไม่มีวัสดุกรอง)

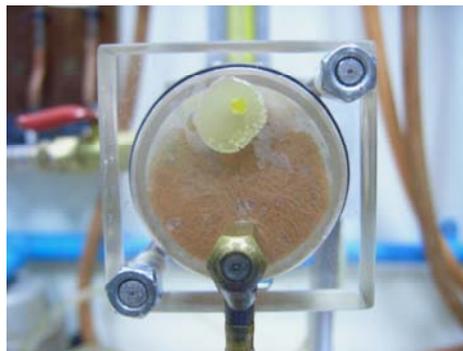


(ข) ขอบเขตสูงสุด (ไม่มีวัสดุกรอง)

ภาพที่ 75 การพัฒนาของตะกอนผ่านรูเจาะดิน เมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดต่ำ (รูป ก) และ เมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดสูง (รูป ข) ของตัวอย่างดินอ่างอุรธานีเหนื่อ



(ก) ก่อนการทดสอบ



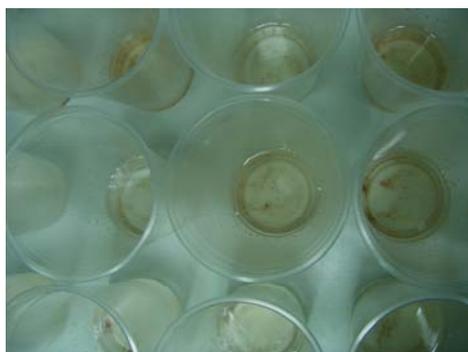
(ข) ในระหว่างการทดสอบ



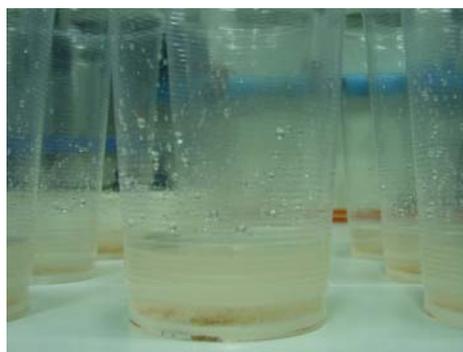
(ค) Filter Cake หลังการทดสอบ

(ซ้าย) วัสดุกรองชั้นที่ 1 (ขวา) วัสดุกรองชั้นที่ 2

ภาพที่ 76 การสะสมของตะกอนที่แผ่นวัสดุกรอง (Filter Cake) เมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดต่ำ (ทดสอบที่ขอบเขตต่ำสุด) ของตัวอย่างดินอ่างอุรธานีเหนือ สำหรับวัสดุกรอง 3 ชั้น



(ก) สีและความขุ่นของน้ำ (ด้านบน)



(ข) สีและความขุ่นของน้ำ (ด้านข้าง)

ภาพที่ 77 สีและความขุ่นของน้ำที่เกิดจากเมื่อดินถูกพัดพาออกมาพร้อมกับน้ำ เมื่อใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดต่ำ (ทดสอบที่ขอบเขตต่ำสุด) โดยไม่มีวัสดุกรอง ของตัวอย่างดินอ่างกาฬสินธุ์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ผลทดสอบการกระจายตัวของดินและการสำรวจภาคสนาม

1.1 การสำรวจภาคสนามเพื่อประเมินปริมาณของดินที่สูญหายไป เนื่องจากการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึก (Gully Erosion) บริเวณขอบอ่างเก็บน้ำ พบว่า บริเวณขอบอ่างอุครธานีเหนือถูกกัดเซาะมากที่สุด ในขณะที่อ่างสกลนครถูกกัดเซาะน้อยที่สุด โดยสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้

| | | | | | | | | |
|--------------------------|---|---------------------|---|------------------------|---|----------------------|---|-------------------|
| อุครธานีเหนือ (6.29%) | > | มุกดาหาร (4.64%) | > | อุครธานีใต้ (3.79%) | > | กาฬสินธุ์ (3.65%) | > | สกลนคร (0.45%) |
|--------------------------|---|---------------------|---|------------------------|---|----------------------|---|-------------------|

1.2 จากการวัดความลึกและความกว้างของร่องการกัดเซาะบริเวณกองดินถมและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ยกเว้นอ่างกาฬสินธุ์ พบว่า ขนาดความกว้างและความลึกของการกัดเซาะจะแปรผันตรงซึ่งกันและกัน และจะมีความสัมพันธ์กันดังสมการ $y = 0.5463x + 0.0323$ เมื่อ x และ y เป็นความกว้างและความลึกของการกัดเซาะ ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนความกว้างต่อความลึกโดยเฉลี่ยจะมีค่าคงที่เป็นประมาณ 1 ต่อ 0.60 หรือคิดเป็นมุมของการกัดเซาะประมาณ 80 องศา (1.4 เรเดียน) โดยปริมาณของดินที่ถูกกัดเซาะจะมากขึ้นเมื่อระดับการกระจายตัวเฉลี่ยมีค่าสูง

1.3 เมื่อความแน่นของดินบริเวณขอบอ่างเพิ่มขึ้น จะทำให้ความถี่และขนาดของการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกลดลง ถ้าหากความลาดชันบริเวณขอบอ่างค่อย ๆ ลดลงด้วยแล้ว ก็จะเป็นตัวเสริมให้ปริมาณของดินที่ถูกกัดเซาะลดลงตามไปด้วย สำหรับในบางอ่างเก็บน้ำความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจไม่เป็นดังที่กล่าวข้างต้นและยังมีความแปรปรวนอยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องจากผลของแฟกเตอร์อื่น ๆ เช่น ระดับการกระจายตัวของดิน ความหนาแน่นของพีชที่ปกคลุมดินในแต่ละบริเวณ ฯลฯ สำหรับความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของดินบริเวณขอบอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้

| | | | | | | |
|----------------|---|----------------|---|----------------|---|-----------------------|
| อุครธานีใต้ | > | กาฬสินธุ์ | > | อุครธานีเหนือ | > | มุกดาหารและ สกลนคร |
| 1.45 ตัน/ลบ.ม. | | 1.33 ตัน/ลบ.ม. | | 1.20 ตัน/ลบ.ม. | | 1.07 ตัน/ลบ.ม. |

สำหรับความถี่เฉลี่ยของการกัดเซาะ สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้

| | | | | | | | | |
|----------------|---|----------------|---|----------------|---|----------------|---|----------------|
| มูกดาหาร | > | อุครธานีเหนือ | > | อุครธานีใต้ | > | กาฬสินธุ์ | > | สกลนคร |
| 0.48 ร่อง/เมตร | | 0.27 ร่อง/เมตร | | 0.25 ร่อง/เมตร | | 0.13 ร่อง/เมตร | | 0.05 ร่อง/เมตร |

1.4 ผลจากการจำแนกดินกระจายตัวโดยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี ประกอบกับการประเมินปริมาณของดินที่ถูกกัดเซาะรอบอ่างเก็บน้ำ แสดงให้เห็นว่า บริเวณอ่างมูกดาหาร อ่างอุครธานี และกองดินถมข้างอ่างอุครธานี เป็นโซนที่ดินกระจายตัวปานกลางถึงกระจายตัวสูงและมีแนวโน้มว่าดินจะกระจายตัวสูงขึ้นเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังการนำดินในบริเวณนี้ไปใช้งาน สำหรับบริเวณอ่างกาฬสินธุ์เป็นโซนที่ดินกระจายตัวเล็กน้อย และพบว่าบริเวณขอบอ่างในบางตำแหน่ง โดยเฉพาะที่ผิวบน ดินจะมีการกระจายตัวสูงซึ่งพบเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น

1.5 การจำแนกดินกระจายตัวด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น Double Hydrometer Test, Pinhole Test และ Crumb Test บางครั้งอาจให้ผลการจำแนกแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องใช้การทดสอบทางเคมีมาช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งโดยทั่วไปจะสรุปผลการจำแนกดินกระจายตัวจาก 3 ใน 5 การทดสอบที่ให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

2. การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ปูนขาว

2.1 ตัวอย่างดินบริเวณกองดินถมซึ่งมีระดับการกระจายตัวสูง (DDS เริ่มต้นเท่ากับ 72.21 เปอร์เซ็นต์) พบว่าต้องใช้ปริมาณปูนขาวอย่างน้อย 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง เพื่อลดการกระจายตัวของดินลงจนเป็นที่น่าพอใจ สำหรับตัวอย่างดินซึ่งมีระดับการกระจายตัวปานกลาง บริเวณอ่างอุครธานีเหนือ (DDS เริ่มต้นเท่ากับ 51.30 เปอร์เซ็นต์) และระดับการกระจายตัวเล็กน้อย (DDS เริ่มต้นเท่ากับ 36.60 เปอร์เซ็นต์) บริเวณอ่างหนองคาย พบว่าต้องใช้ปริมาณปูนขาวอย่างน้อย 1.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง ตามลำดับ

2.2 การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวโดยใช้ปูนขาว (Lime Treatment) เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายตัวของดินโดยตรง เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange) ระหว่างโซเดียมอออนที่ผิวอนุภาคของดินเหนียวกับแคลเซียมอออนจากปูนขาว ซึ่งจะทำให้ความหนาของชั้นประจุบวก (Double Layer) ลดลง ส่งผลให้แรงผลักระหว่างอนุภาคเม็ดดินลดลง ดินจึงไม่เกิดการกระจายตัว ในขณะที่เดียวกันปูนขาวยังทำหน้าที่เสมือนเป็นสารเชื่อมประสาน ทำให้อนุภาคดินจับตัวใหญ่ขึ้น (Flocculation-Agglomeration) ซึ่งจะทำให้ความเหนียวของดินลดลงมาก นอกจากนี้ยังทำให้กำลังของดินผสมปูนขาวเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยา Pozzolanic

3. คุณสมบัติด้านกำลังและความชื้นน้ำของดิน

3.1 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัวผสมปูนขาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง กำลังเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 1.6 และ 2.2 เท่าของดินที่ไม่ได้ผสมปูนขาว สำหรับดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัว ตามลำดับ และเมื่อพิจารณากำลังตามอายุการบ่ม พบว่า จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

3.2 เปอร์เซ็นต์ความเครียดที่กำลังรับแรงอัดสูงสุด (Strain at Failure) ของดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัวผสมปูนขาวมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง เปอร์เซ็นต์ความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างดินจะต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ (เมื่อไม่ได้ผสมปูนขาว เปอร์เซ็นต์ความเครียดเฉลี่ยประมาณ 6.2 และ 7.5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัว ตามลำดับ)

3.3 กำลังเฉลี่ยของดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัวโดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวและอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง กำลังเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 1.1 ถึง 1.6 เท่าของดินที่ไม่ได้ผสมปูนขาว

3.4 มุมความเสียดทานภายในของดินไม่กระจายตัวโดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนโดยตรงจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2 และ 6 องศา ที่ปริมาณปูนขาว 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง ตามลำดับ สำหรับดินกระจายตัว จะพบว่าที่ปริมาณปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ มุมความเสียดทานภายในลดลงประมาณ 6 องศา เนื่องจากการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินกับปูนขาวทำให้เม็ดดินจับตัวกัน แต่ที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ กลับพบว่ามุมความเสียดทานภายในเพิ่มขึ้นประมาณ 6 องศา เนื่องจากปริมาณปูนขาวที่เหลือจากการแลกเปลี่ยนประจุบวกเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ทำให้กำลังของดินผสมปูนขาวเพิ่มขึ้น

3.5 ค่าความชื้นน้ำเฉลี่ยของดินกระจายตัวและดินไม่กระจายตัวผสมปูนขาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง ค่าความชื้นน้ำจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10 เท่า ของดินที่ไม่ได้ผสมปูนขาวและดินที่ผสมปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ (10^9 ชม. ต่อ วินาที เป็น 10^8 ชม. ต่อ วินาที)

4. การป้องกันการกัดเซาะโดยใช้วัสดุโยสังเคราะห์

4.1 การป้องกันการกัดเซาะโดยใช้วัสดุโยสังเคราะห์ (จีโอเท็กซ์ไทล์ ที่ เอส 50) ในดิน กระจายตัวบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดตั้งแต่ 95 เปอร์เซ็นต์ จะช่วยให้ดินมีความต้านทานต่อการกัดเซาะดีขึ้น แต่ในระยะยาวอาจใช้ไม่ได้ผล โดยเฉพาะดินที่มีการกระจายตัวสูง ส่วนการบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นและความแน่นใกล้เคียงกับสภาพในสนาม พบว่า จะเกิดการกัดเซาะขึ้น แม้ว่าจะใช้วัสดุกรองถึง 3 ชั้น

4.2 การใช้แผ่นโยสังเคราะห์สำหรับเป็นวัสดุกรองในดินบดอัด จะช่วยให้อัตราการไหล ของน้ำค่อย ๆ ลดลงจนสม่ำเสมอ เพราะเกิดการสะสมของตะกอน (Filter Cake) ที่ด้านหน้าแผ่นกรอง ซึ่งจะทำความชุ่มของน้ำที่ผ่านวัสดุกรองออกมาค่อย ๆ ลดลง

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากชั้นดินในวิทยาเขตโดยเฉพาะบริเวณอ่างเก็บน้ำมีความซับซ้อน ดังนั้นควรมีการเจาะดินเพิ่มเติมโดยใช้ระยะห่างระหว่างหลุมเจาะน้อยลงและเจาะให้มีความลึกมากขึ้น เพื่อจะได้ทราบข้อมูลทั้งในแนวดิ่งและแนวราบถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2. วิธีการจำแนกดินกระจายตัวมีความไม่แน่นอนสูง จึงต้องอาศัยวิธีการทดสอบดินกระจายตัวหลาย ๆ วิธีประกอบกันทั้งทางกายภาพและทางเคมี รวมทั้งพิจารณาคุณสมบัติพื้นฐานของดิน แร่ดินเหนียวที่เป็นองค์ประกอบ และการสำรวจภาคสนามร่วมด้วย

3. จากการสังเกตวิธีการปลูกหญ้าแฝกตามลาดของอ่างเก็บน้ำพบว่า มีวิธีการปลูก 2 แบบด้วยกันคือ ปลูกโดยมีระยะห่างระหว่างกอเท่า ๆ กัน เป็นแนวขวางกับลาดของอ่างเก็บน้ำ และการปลูกชิดกันเป็นแนวขวางกับลาดของอ่างเก็บน้ำโดยไม่ใช้ระยะห่างระหว่างกอ ซึ่งการปลูกแบบหลังน่าจะให้ผลที่ดีกว่าในแง่ของการป้องกันการกัดเซาะจากน้ำฝน โดยสังเกตจากความถี่ของการกัดเซาะเป็นร่องลึก (Gully Erosion) แบบแรกจะเกิดการกัดเซาะขึ้นระหว่างกอของหญ้าแฝกจากลาดด้านบนเป็นทางยาวลงไปถึงด้านล่าง โดยความถี่ของการกัดเซาะจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างกอหญ้าแฝกโดยประมาณ ส่วนความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับระดับการกระจายตัวของดินและความแน่นของดินในบริเวณนั้น

4. แนวทางการแก้ปัญหาดินกระจายตัวในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง แยกออกจากกัน ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว หากต้องการให้โครงสร้างดินมีความมั่นคงและใช้งานได้อย่างปลอดภัยในระยะยาว ควรมีการบูรณาการแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวเข้าด้วยกัน ควบคู่ไปกับการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างที่ดี ก็จะทำให้การแก้ปัญหามุ่งสู่เป้าหมายสูงสุด

5. การจำลองสภาพการกัดเซาะเป็นร่องน้ำแบบลึกในสนามมาอยู่ในแบบของ Pinhole นั้น ถ้าออกแบบเครื่องมือใหม่ให้สามารถปรับองศาความลาดของแบบได้ตามต้องการ ก็จะจำลองสภาพการกัดเซาะในห้องปฏิบัติการได้ใกล้เคียงกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงในสนามเมื่อความลาดชันเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้หากสามารถปรับเสถียรของน้ำได้ตามต้องการ แทนที่จะจำกัดอยู่ที่ 40 นิ้ว (1020 มม.) ก็จะจำลองสภาพเวลาเกิดน้ำหลากได้ดียิ่งขึ้น

6. จากผลการทดสอบ ทำให้ทราบว่าปริมาณความชื้นในการบดอัดมีผลอย่างมากต่อลักษณะการวิบัติและความรุนแรงของการกัดเซาะ ดังนั้นหากต้องการทราบความสัมพันธ์ระหว่างความชุ่มชื้นของน้ำในอ่างกับปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ เพียงแค่วัดความชุ่มชื้นของน้ำในอ่างในช่วงเวลาต่าง ๆ เช่น สัปดาห์ละครั้งหรือเดือนละครั้ง แล้วมาพล็อตความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนในช่วงเวลานั้น ๆ ก็จะช่วยให้ทราบความสัมพันธ์ดังกล่าวว่าจะเป็นไปในทิศทางใด

จากการสังเกตพบว่า ช่วงรอยต่อระหว่างหน้าแล้งกับหน้าฝนน่าจะให้น้ำในอ่างเก็บน้ำมีความชุ่มชื้นสูงสุดในรอบปี เนื่องจากช่วงรอยต่อนี้ปริมาณความชื้นในดินจะต่ำที่สุด เมื่อฝนตกจะทำให้ผิวดินที่แห้งซึ่งอยู่ด้านบนถูกกัดเซาะ โดยน้ำท่าและพัดพาเอาตะกอนไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำ เมื่อปริมาณความชื้นในดิน โดยเฉพาะที่ผิวดินสูงขึ้น การกัดเซาะในลักษณะดังกล่าวก็จะค่อย ๆ ลดลงจนเกือบคงที่เมื่อดินอิ่มตัว ประกอบกับตะกอนที่แขวนลอยอยู่ในอ่างเก็บน้ำส่วนหนึ่งที่ปลงงานในการพัดพาต่ำกว่าน้ำหนักของเม็ดดินก็จะตกตะกอนลงสู่ก้นอ่าง เมื่อเวลาผ่านไปจึงทำให้น้ำในอ่างค่อย ๆ ไส้ขึ้น จนถึงช่วงรอยต่อระหว่างหน้าแล้งกับหน้าฝนอีกครั้ง

7. สำหรับการทดสอบด้านกำลังและความซึมผ่านของน้ำนั้น จะใช้ตัวแทนของดินเพียง 2 ประเภทเท่านั้น ได้แก่ ตัวอย่างดินกระจายตัวปานกลางบริเวณขอบอ่างอุตรธานีเหนือ และตัวอย่างดินไม่กระจายตัวบริเวณขอบอ่างกาฬสินธุ์ ซึ่งหากสามารถหาตัวแทนของดินที่กระจายตัวสูงได้ ก็อาจทำให้เห็นความต่างหรือความเหมือนของกำลังและความซึมผ่านของน้ำได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

8. การทดสอบความสามารถของจีไอเท็กซ์ไทล์สำหรับทำหน้าที่เป็นวัสดุกรอง หากมีการทำ Scanning Electron Microscope (SEM) ของแผ่นวัสดุกรองแต่ละชั้นซึ่งมีตะกอนสะสมอยู่ไม่เท่ากัน ภายหลังจากการทดสอบ ก็จะช่วยให้สามารถบอกความหนาแน่นของตะกอนที่สะสมอยู่ได้ชัดเจนกว่าการสังเกตด้วยตาเปล่า

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- บุญชัย เชิญเกียรติประดับ. 2539. การศึกษาผลการผสมปูนขาวกับดินฐานรากอ่อนในห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มันสิน ตันทุลเวศม์. 2546. **คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ**. พิมพ์ครั้งที่ 4. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ศุภกิจ นนทนานันท์. 2537. **การปรับปรุงคุณภาพดิน**. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ศุภกิจ นนทนานันท์. 2543. **การปรับปรุงคุณภาพดินกระจายตัวเพื่อใช้ในงานเขื่อนดิน**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย.
- อร่ามศรี พัฒนโสภณ. 2541. **ดินกระจายตัวในประเทศไทย**. ฝ่ายดินด้านวิทยาศาสตร์ สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน, นนทบุรี.
- อร่ามศรี พัฒนโสภณ และสมบูรณ์ มั่นความดี. 2534. การใช้แผ่นใยสังเคราะห์จีโอเทกซ์ไทล์เป็นวัสดุกรองในเขื่อนดินที่สร้างด้วยดินกระจายตัว. **ว. เกษตรศาสตร์ (วิทย)**, 25(1).
- Aitchison, G.D. and C.C. Wood. 1965. Some Interactions of Compaction, Permeability and Post-Construction Deflocculation Affecting the Probability of Piping Failure in Small Earth Dams. **Proceeding, 6th International Conference on SM & FE**.
- Bell, F.G. 1992. **Engineering Properties of Soils and Rocks**. 3rd ed. Butterworth, Heinemann Ltd., Great Britain.
- Broms, B.B. 1986. **Stabilization of Soft Clay with Lime Columns**, p. 104. *Cited by* D.T. Bergado, J.C. Chai, M.C. Alfrado and A.S. Balasubramaniam. 1992. Improvement Technique of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 217 p.

- Brom, B.B. and P. Boman. 1978. **Stabilization of Soil with Lime Columns**. Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, 92 p.
- Cole, B.A., C. Ratanasen, P. Maiklad, T.B. Liggins and S. Chirapuntu. 1977. Dispersive Clay in Irrigation Dams in Thailand, pp. 25-41. **A Symposium Presented at the Seventy-ninth Annual Meeting**, 27 June-2 July 1976, ASTM Special Technical Publication 623.
- Davidson, D.T., G. Noguera and J.B. Sheeler. 1961. **Powder vs Slurry Application of Lime for Soil Stabilization**, pp. 30-42. *in* D.T. Davidson and Associates. Soil Stabilization with Lime. Bulletin No. 195, Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State University, Ames, Iowa, U.S.A.
- Decker, R.S. and L.P. Dunnigan. 1977. Development and Use of the Soil Conservation Service Dispersion Test, pp. 94-109. **A Symposium Presented at the Seventy-ninth Annual Meeting**, 27 June-2 July 1976, ASTM Special Technical Publication 623.
- Diamond, S. and E.B. Kinter. 1965. Mechanisms of Soil-Lime Stabilization, An Interpretive Review. **Highway Research Record Bulletin 92**, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C., U.S.A.
- Dumbleton, M.J. 1962. **Investigations to Assess the Potentialities of Lime for Soil Stabilization in United Kingdom**, p. 84. *Cited by* P.T. Sherwood. Soil Stabilization with Cement and Lime. HMSO, London, UK., 153 p.
- Eades, J.L. and R.E. Grim. 1960. Reactions of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization. **Highway Research Board Bulletin 262**. National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C., U.S.A.
- Emerson, W.W. 1967. A Classification of Soil Aggregates Based on Their Coherence in Water, **Australian Journal of Soil Research, Vol. 5: 47-57.**

- Gibbs, H.J. and W.G. Holtz. 1962. A Study of Erosion and Tractive Force Characteristics in Relation to Soil Mechanics Properties Earth Research Program. **Soil Engineering Report No. EM-643**. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado. *Cited by* Haliburton, T.A., Petry, T.M. and M.L. Hayden. 1975. Identification and Treatment of Dispersive Clay Soils. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Grant, K., O.G. Ingles, I.A. Lawrence and P.J. Sommerville. 1977. Protecting a Dispersive Soil Storage by Water Treatment, pp. 191-201. **A Symposium Presented at the Seventy-ninth Annual Meeting**, 27 June-2 July 1976, ASTM Special Technical Publication 623.
- Gray, D.H. and A.T. Leiser. 1982. **Biotechnical Slope Protection and Erosion Control**. Van Nostrand Reinhold Co., New York, 271 p.
- Haliburton, T.A., T.M. Petry and M.L. Hayden. 1975. **Identification and Treatment of Dispersive Clay Soils**. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Hausmann, M.R. 1990. **Engineering Principles of Ground Modification**. McGraw-Hill Publ. Co., Sydney, 632 p.
- Hengchaovanich, D. 1998. Vetiver Grass for Slope Stabilization and Erosion Control. Office of the Royal Development Projects Board, The FAO Regional Office for Asia and the Pacific, **Pacific Rim Vetiver Network Technical Bulletin No. 1998/2**, Bangkok, Thailand.
- Herrin, M. and H. Mitchell. 1961. Lime-Soil Mixtures. **Highway Research Board Bulletin No. 304**, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.
- Hilt, G.H. and D.T. Davidson. 1960. Lime Fixation in Clay Soils. **Highway Research Record Bulletin 262**, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C., U.S.A.

Ingles, O.G. 1970. **Mechanism of Clay Stabilization with Inorganic Acids and Alkalis**, pp. 137-139.
Cited by O.G. Ingles and J.B. Metcalf. Soil Stabilization Principles and Practice. Butterworth,
 Sydney, Australia, 374 p.

Ingles, O.G. and J.B. Metcalf. 1972. **Soil Stabilization Principles and Practice**. Butterworth,
 Sydney, Australia, 374 p.

Laguros, J.G., D.T. Davidson and R.L. Handy. 1965. **Evaluation of Lime stabilization of Loess**,
 pp. 30-42. *in* D.T. Davidson and Associates. Soil Stabilization with Lime. Bulletin No. 195,
 Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State University, Ames, Iowa, U.S.A.

Lambe, T.W. and R.V. Whitman. 1969. **Soil Mechanics**. John Wiley & Son. Inc., 553 p.

Lu, L.W., D.T. Davidson, R.L. Handy and J.G. Laguros. 1957. The Calcium-Magnesium Ratio in
 Soil Lime Stabilization. **Highway Research Record Bulletin 36**, National Research
 Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C., U.S.A.

Richards, L.A. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. **Agriculture
 Handbook No. 60**. United States Department of Agriculture.

Rosser, G.K. and R.K. Moore. 1980. Lime Treatment of Alabama Black-Belt Soils. **Alabama
 Highway Research HPR No. 93**. Department of Civil Engineering, Auburn University.

Ruenkraitergsa, T. 1982. **Principle of Soil Stabilization**, น. 27. *อ้างโดย* ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์
 และสุเชษฐ์ เอี่ยมเชย. ความคงทนของดินซีเมนต์. กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวง,
 กรุงเทพฯ, 134 หน้า.

Ryker, N.L. 1977. Encountering Dispersive Clays on Soil Conservation Service Projects in
 Oklahoma, pp. 370-389. **A Symposium Presented at the Seventy-ninth Annual Meeting**,
 27 June-2 July 1976, ASTM Special Technical Publication 623.

Schlosser, F. and N.T. Long. 1974. Recent Results in French Research on Reinforced Earth.

J. Const. Div., ASCE, 100 (CO3): 223-237.

Sherard, J.L., L.P. Dunnigan and R.S. Decker. 1977. Some Engineering Problems with Dispersive

Clays, pp. 3-12. **A Symposium Presented at the Seventy-ninth Annual Meeting,**

27 June-2 July 1976, ASTM Special Technical Publication 623.

Sherard, J.L., F. ASCE, L.P. Dunnigan and R.S. Decker. 1976. Identification and Nature of

Dispersive Soils, pp. 287-301. **Journal of the Geotechnical Engineering Division.**

Sherard, J.L., F. ASCE, L.P. Dunnigan, R.S. Decker and E.F. Steele. 1976. Pinhole Test for

Identifying Dispersive Soils. **ASCE Geotechnical Division, Vol. 102: 69-87.**

Sherwood, P.T. 1993. **Soil Stabilization with Cement and Lime.** HMSO, London, UK, 153 p.

Shieh, J.L. 1981. **Engineering Properties of Dispersive Soil.** M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology.

Statton, C.T. and J.K. Mitchell. 1977. Influence of Eroding Solution Composition of Dispersive

Behavior of a Compacted Clay Shale, pp. 398-407. **A Symposium Presented at the**

Seventy-ninth Annual Meeting, 27 June-2 July 1976, ASTM Special Technical

Publication 623.

Udomchoke, V. 1991. **Origin and Engineering Characterics of the Problem Soils in the Korat**

Basin, Northeastern Thailand. D. Thesis, Asian Institute of Technology.

Vidal, H. 1969. The Principle of Reinforced Earth. **Highway Research Record Bulletin 282.**

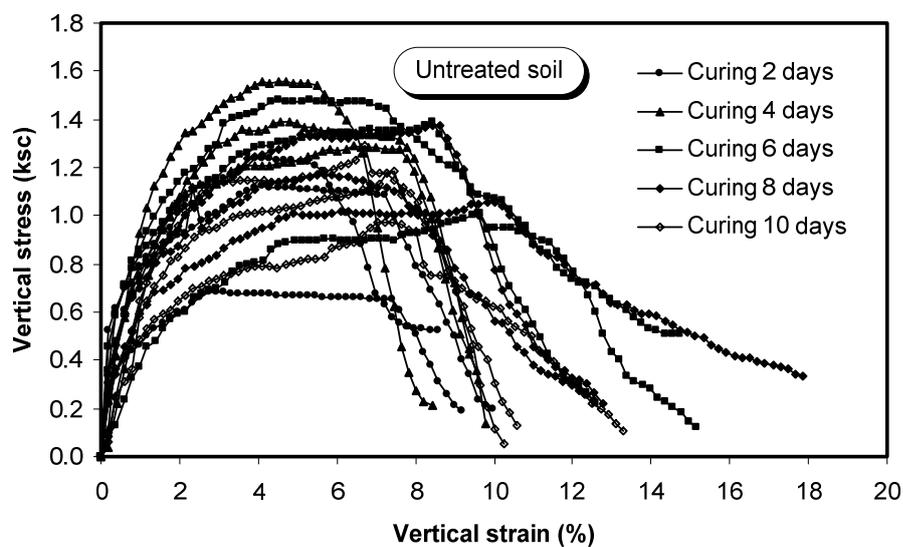
Wu, T.H. 1976. Investigation of Landslides on Prince of Wales Island. **Geotechnical Engineering**

Report 5, Civil Engineering Department, Ohio State University, Columbus, Ohio.

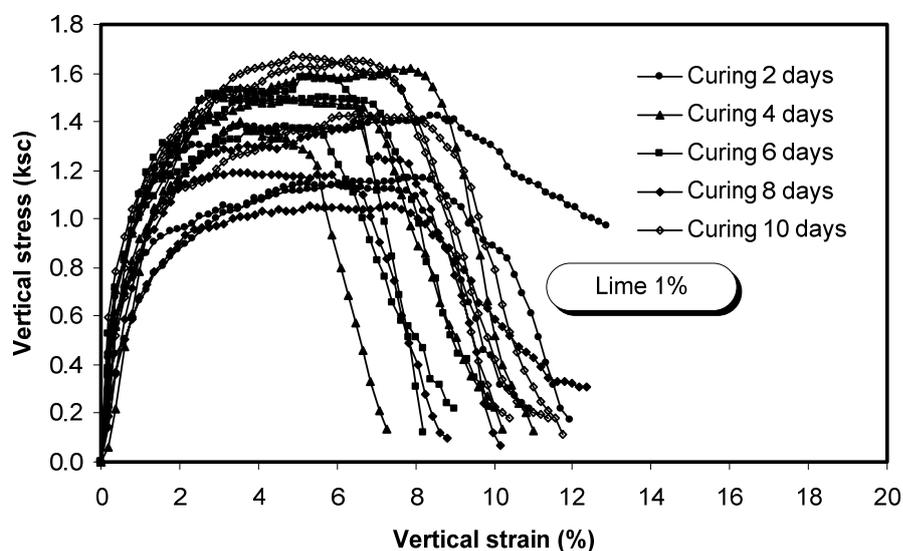
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

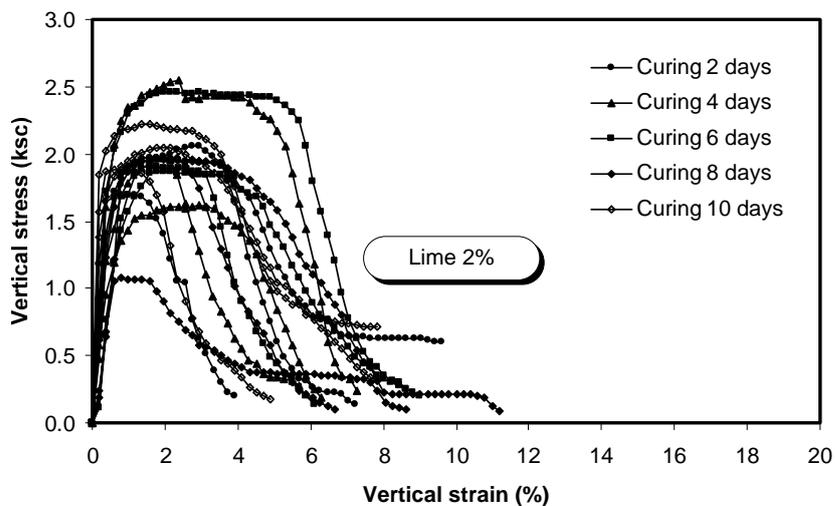
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดิน
ก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว



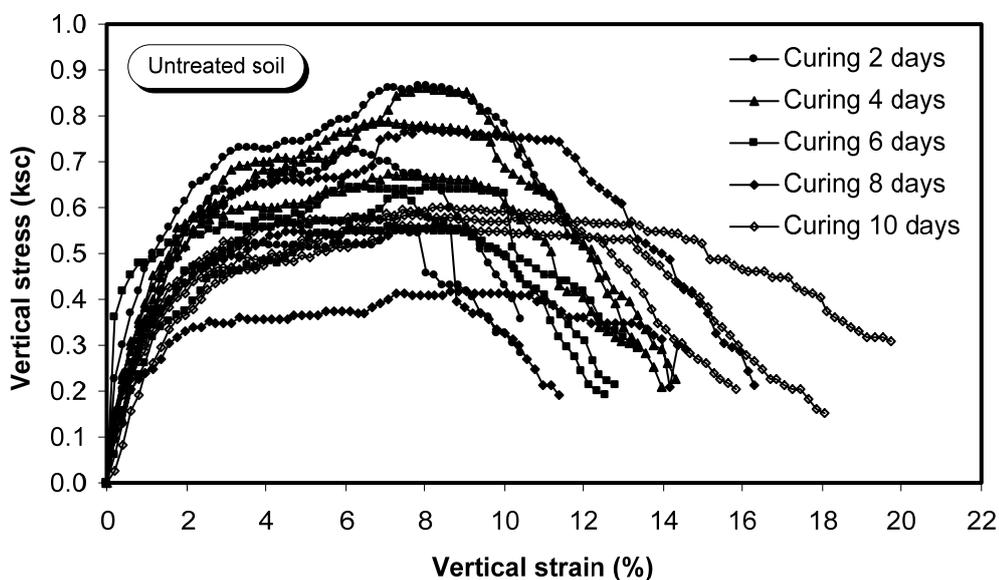
ภาพผนวกที่ ก1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินกระจายตัวที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว จากการทดสอบ Unconfined Compression Test



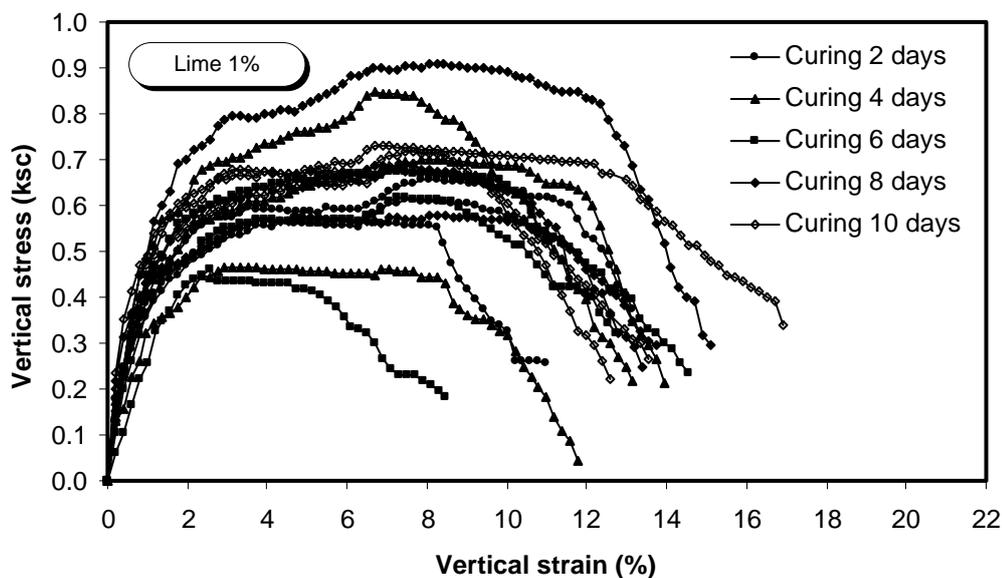
ภาพผนวกที่ ก2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินกระจายตัวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบ Unconfined Compression Test



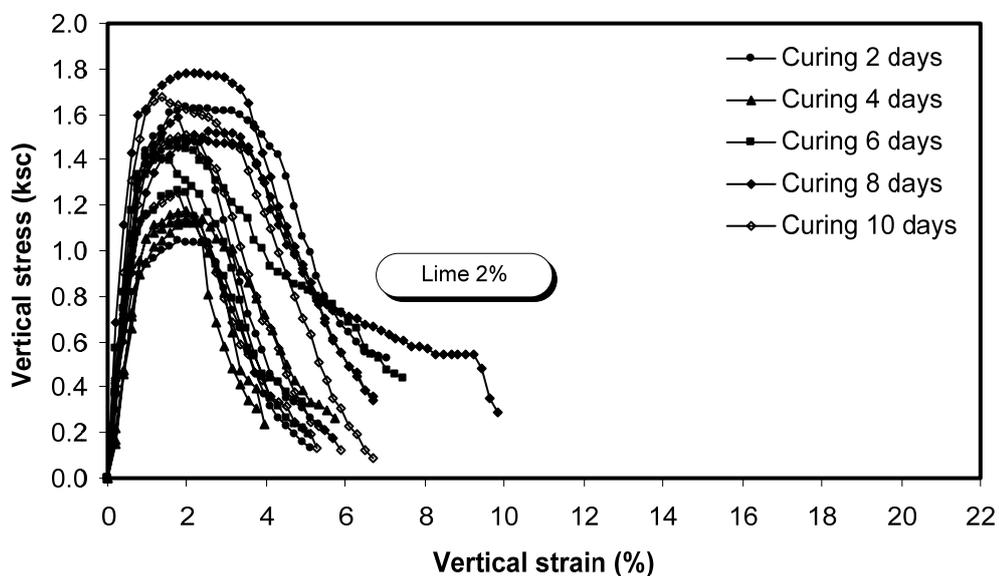
ภาพผนวกที่ ก3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินกระจายตัวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบ Unconfined Compression Test



ภาพผนวกที่ ก4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินไม่กระจายตัวที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว จากการทดสอบ Unconfined Compression Test



ภาพผนวกที่ ก5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินไม่กระจายตัวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 1 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบ Unconfined Compression Test



ภาพผนวกที่ ก6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Vertical Stress) และความเครียด (Vertical Strain) ของดินไม่กระจายตัวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบ Unconfined Compression Test

ภาคผนวก ข

ผลทดสอบ Double Hydrometer Test

ตารางผนวกที่ ข1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดดินกับเปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าที่ระบุจากการทดสอบ Double Hydrometer Test

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | KS1-3 | | | | M1-1 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.071027 | 84.349325 | 0.089860 | 49.523733 | 0.076944 | 60.635950 | 0.098561 | 33.834961 |
| Test | 0.050366 | 83.817153 | 0.063933 | 46.222151 | 0.054725 | 59.870828 | 0.070003 | 32.108687 |
| | 0.035963 | 81.954550 | 0.045365 | 44.335532 | 0.038975 | 58.914425 | 0.049674 | 30.727668 |
| | 0.025779 | 79.293688 | 0.032300 | 40.562296 | 0.027911 | 57.192899 | 0.035248 | 29.346650 |
| | 0.024583 | 79.027601 | 0.031326 | 40.562296 | 0.026442 | 56.810338 | 0.034033 | 29.346650 |
| | 0.017689 | 75.834567 | 0.022331 | 36.317404 | 0.018985 | 54.897532 | 0.024177 | 27.620376 |
| | 0.012773 | 71.843274 | 0.015903 | 32.544167 | 0.013664 | 52.602165 | 0.017190 | 25.548848 |
| | 0.009480 | 68.650240 | 0.011655 | 30.657549 | 0.010165 | 50.115517 | 0.012612 | 23.822574 |
| | 0.006800 | 65.723291 | 0.008306 | 26.412658 | 0.007347 | 47.055028 | 0.008950 | 22.441556 |
| | 0.004691 | 62.530257 | 0.005899 | 24.054385 | 0.005325 | 43.420696 | 0.006323 | 22.786810 |
| | 0.003516 | 59.869395 | 0.004166 | 21.224457 | 0.003832 | 40.742768 | 0.004507 | 19.679518 |
| | 0.002534 | 56.942447 | 0.003234 | 16.507911 | 0.002754 | 36.343314 | 0.003210 | 12.429169 |
| | 0.001863 | 54.547671 | 0.002294 | 12.734674 | 0.001935 | 33.091544 | 0.002278 | 5.869330 |
| | 0.001087 | 47.363344 | 0.001300 | 3.773237 | 0.001295 | 28.118248 | 0.001479 | 3.797802 |
| | 0.000961 | 47.363344 | 0.001145 | 3.301582 | 0.000977 | 26.205442 | 0.001101 | 3.797802 |
| | 0.000530 | 41.243361 | | | 0.000618 | 24.292636 | 0.000691 | 2.071528 |
| | 0.000417 | 41.243361 | | | 0.000400 | 21.805988 | 0.000441 | 1.726274 |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | M2-1 | | | | M2-2 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.074874 | 83.358182 | 0.090550 | 78.636320 | 0.079165 | 77.770801 | 0.096138 | 60.811776 |
| Test | 0.053501 | 81.579197 | 0.064556 | 75.041517 | 0.056613 | 75.750780 | 0.068303 | 58.559488 |
| | 0.038166 | 80.054352 | 0.045741 | 74.142816 | 0.040640 | 72.973251 | 0.048480 | 56.757658 |
| | 0.027377 | 77.512944 | 0.032572 | 70.997363 | 0.029200 | 69.943220 | 0.034505 | 53.604454 |
| | 0.025829 | 77.512944 | 0.031282 | 70.997363 | 0.027673 | 69.943220 | 0.033239 | 53.604454 |
| | 0.018551 | 74.971536 | 0.022168 | 70.098662 | 0.019907 | 66.913189 | 0.023597 | 51.802624 |
| | 0.012519 | 72.938410 | 0.015692 | 69.649312 | 0.014410 | 62.620645 | 0.016817 | 48.198963 |
| | 0.009856 | 70.142861 | 0.011497 | 68.301261 | 0.010706 | 59.338111 | 0.012318 | 46.847590 |
| | 0.006925 | 68.363875 | 0.007315 | 62.909056 | 0.007726 | 55.298069 | 0.008769 | 43.694387 |
| | 0.005062 | 65.314186 | 0.005906 | 56.618150 | 0.005558 | 51.763033 | 0.006271 | 38.288896 |
| | 0.003663 | 60.993792 | 0.004242 | 47.631142 | 0.003996 | 48.227997 | 0.004589 | 21.171507 |
| | 0.002535 | 58.452384 | 0.003130 | 29.207776 | 0.002858 | 45.702971 | 0.003329 | 7.657779 |
| | 0.001879 | 55.910976 | 0.002272 | 15.727264 | 0.001745 | 41.662929 | 0.002039 | 6.306406 |
| | 0.001344 | 52.607146 | 0.001632 | 7.189606 | 0.001242 | 36.865380 | 0.001429 | 3.603661 |
| | 0.001023 | 49.557456 | 0.001227 | 6.290906 | 0.000726 | 33.835348 | 0.000818 | 3.603661 |
| | 0.000600 | 45.491203 | 0.000711 | 4.493504 | 0.000541 | 31.562825 | 0.000605 | 2.252288 |
| | 0.000469 | 43.712218 | 0.000550 | 3.145453 | 0.000373 | 29.795307 | 0.000414 | 2.252288 |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | M3-1 | | | | M3-2 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.073636 | 53.738685 | 0.095681 | 25.756870 | 0.082380 | 54.994967 | 0.107665 | 22.335578 |
| Test | 0.052746 | 52.203294 | 0.067951 | 24.241760 | 0.058507 | 54.474510 | 0.076456 | 20.846539 |
| | 0.037665 | 51.009101 | 0.048256 | 22.726650 | 0.041788 | 53.260110 | 0.054200 | 19.953116 |
| | 0.027037 | 49.132512 | 0.034326 | 20.605496 | 0.029924 | 51.698739 | 0.038487 | 18.464077 |
| | 0.025696 | 48.620715 | 0.033177 | 20.605496 | 0.028310 | 51.525253 | 0.037212 | 18.464077 |
| | 0.018599 | 45.891131 | 0.023545 | 19.393408 | 0.020356 | 49.616910 | 0.026431 | 16.975039 |
| | 0.013539 | 42.308552 | 0.016768 | 16.969232 | 0.013198 | 46.667653 | 0.018722 | 16.379424 |
| | 0.010085 | 39.749567 | 0.012300 | 15.454122 | 0.010913 | 45.106282 | 0.013733 | 14.890385 |
| | 0.007313 | 36.337587 | 0.008743 | 13.635990 | 0.007876 | 42.503997 | 0.009753 | 13.401347 |
| | 0.005117 | 33.266805 | 0.005981 | 11.211814 | 0.005650 | 40.595654 | 0.006933 | 11.614500 |
| | 0.003785 | 31.390216 | 0.004391 | 10.605770 | 0.004053 | 37.819883 | 0.004890 | 10.423270 |
| | 0.002706 | 28.490033 | 0.003098 | 8.787638 | 0.002902 | 35.217597 | 0.003452 | 8.934231 |
| | 0.001920 | 26.442845 | 0.002174 | 7.272528 | 0.002068 | 32.441826 | 0.002532 | 7.445193 |
| | 0.001104 | 24.907454 | 0.001279 | 1.818132 | 0.001251 | 28.451655 | 0.001463 | 4.467116 |
| | 0.000968 | 21.324875 | 0.001084 | 0.000000 | 0.001054 | 26.716798 | 0.001224 | 1.489039 |
| | 0.000629 | 18.765890 | | | 0.000687 | 23.941027 | 0.000783 | 0.000000 |
| | 0.000432 | 18.424692 | | | 0.000474 | 23.420570 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | M3-3 | | | | S1-2 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.080730 | 47.494620 | 0.103540 | 24.081138 | 0.072319 | 43.865161 | 0.088645 | 33.016788 |
| Test | 0.057741 | 46.280700 | 0.073535 | 22.743297 | 0.051785 | 42.575009 | 0.062920 | 32.038513 |
| | 0.041402 | 44.763300 | 0.052088 | 22.208161 | 0.037518 | 39.994706 | 0.044659 | 31.060238 |
| | 0.030031 | 41.880240 | 0.037023 | 20.602751 | 0.027082 | 37.701103 | 0.031638 | 30.571100 |
| | 0.028506 | 41.728500 | 0.035764 | 20.602751 | 0.025645 | 37.987803 | 0.030464 | 30.571100 |
| | 0.020705 | 38.845440 | 0.025452 | 18.729774 | 0.018538 | 35.694200 | 0.021715 | 28.614550 |
| | 0.014998 | 36.114120 | 0.018079 | 17.391933 | 0.013354 | 33.687297 | 0.015416 | 27.636274 |
| | 0.011166 | 33.838020 | 0.013227 | 16.856797 | 0.009840 | 32.683846 | 0.011347 | 25.679724 |
| | 0.008063 | 31.258440 | 0.009411 | 14.983819 | 0.007064 | 30.963643 | 0.008070 | 24.212311 |
| | 0.005810 | 28.830600 | 0.006647 | 12.843274 | 0.004864 | 29.386791 | 0.005958 | 12.717578 |
| | 0.004148 | 26.857980 | 0.004734 | 11.505433 | 0.003618 | 28.096639 | 0.004369 | 0.489138 |
| | 0.002967 | 24.581880 | 0.003327 | 9.900023 | 0.002562 | 27.953289 | | |
| | 0.002309 | 23.216220 | 0.002745 | 6.154069 | 0.001819 | 27.809939 | | |
| | 0.001306 | 20.484900 | 0.001494 | 1.337841 | 0.001181 | 25.659686 | | |
| | 0.001091 | 18.664020 | 0.001229 | 0.535136 | 0.000919 | 23.939483 | | |
| | 0.000698 | 17.298360 | 0.000776 | 0.000000 | 0.000553 | 23.652783 | | |
| | 0.000478 | 16.691400 | | | 0.000443 | 23.509433 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | S1-3 | | | | S2-2 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.074451 | 73.830568 | 0.090390 | 64.335571 | 0.078284 | 71.565353 | 0.094340 | 60.763657 |
| Test | 0.052875 | 73.131856 | 0.064295 | 61.845162 | 0.056132 | 69.218948 | 0.067097 | 58.249298 |
| | 0.037873 | 71.035720 | 0.045641 | 60.184889 | 0.039963 | 68.045745 | 0.047627 | 56.573060 |
| | 0.027156 | 68.706680 | 0.032399 | 58.524616 | 0.028449 | 66.872543 | 0.033965 | 52.801522 |
| | 0.025664 | 68.706680 | 0.031158 | 58.524616 | 0.026929 | 66.872543 | 0.032702 | 52.801522 |
| | 0.018424 | 66.377640 | 0.022147 | 56.449275 | 0.019183 | 65.699340 | 0.023171 | 51.963403 |
| | 0.013221 | 64.048600 | 0.015741 | 54.373934 | 0.013013 | 62.883654 | 0.016483 | 49.449045 |
| | 0.009794 | 61.719560 | 0.011554 | 52.298593 | 0.010179 | 61.241171 | 0.012074 | 48.191866 |
| | 0.006994 | 60.089232 | 0.008187 | 51.468457 | 0.007317 | 58.425485 | 0.008787 | 35.620075 |
| | 0.005020 | 57.527288 | 0.005836 | 41.091752 | 0.005271 | 55.140518 | 0.006475 | 16.343328 |
| | 0.003592 | 55.431152 | 0.004558 | 2.075341 | 0.003823 | 50.447708 | 0.004699 | 3.352478 |
| | 0.002552 | 53.567920 | 0.003231 | 0.830136 | 0.002736 | 46.928100 | 0.003331 | 2.095299 |
| | 0.001965 | 50.540168 | | | 0.002397 | 45.520257 | 0.003073 | 2.095299 |
| | 0.001245 | 47.745320 | | | 0.001399 | 40.827447 | 0.001645 | 2.095299 |
| | 0.000933 | 43.320144 | | | 0.001023 | 36.838559 | | |
| | 0.000567 | 43.553048 | | | 0.000616 | 34.961435 | | |
| | 0.000450 | 42.621432 | | | 0.000494 | 32.849670 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | S2-3 | | | | S2-4 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.072632 | 27.635521 | 0.092458 | 16.559624 | 0.072965 | 61.763823 | 0.090681 | 49.494242 |
| Test | 0.052388 | 26.399428 | 0.065731 | 15.613359 | 0.052348 | 59.827653 | 0.064307 | 48.433651 |
| | 0.038010 | 24.721872 | 0.046686 | 14.824806 | 0.037541 | 57.891483 | 0.045559 | 47.726591 |
| | 0.027750 | 22.514562 | 0.033274 | 13.405410 | 0.027057 | 55.180845 | 0.032307 | 46.666000 |
| | 0.026380 | 22.514562 | 0.032127 | 13.405410 | 0.025611 | 55.180845 | 0.031092 | 46.666000 |
| | 0.019207 | 20.572129 | 0.022865 | 12.301435 | 0.018484 | 52.470207 | 0.022053 | 45.605409 |
| | 0.013997 | 18.453112 | 0.016213 | 11.828303 | 0.013219 | 50.921271 | 0.015641 | 44.544818 |
| | 0.010394 | 17.217018 | 0.011916 | 10.724328 | 0.009775 | 49.178718 | 0.011423 | 44.544818 |
| | 0.007487 | 15.804340 | 0.008449 | 10.251196 | 0.006987 | 47.629782 | 0.008085 | 44.191288 |
| | 0.005372 | 14.656538 | 0.006022 | 8.831799 | 0.005013 | 45.499995 | 0.005780 | 40.302454 |
| | 0.003844 | 13.685322 | 0.004281 | 7.885535 | 0.003581 | 43.951059 | 0.004203 | 30.050076 |
| | 0.002763 | 12.802398 | 0.003069 | 5.362164 | 0.002561 | 42.208506 | 0.003142 | 5.302955 |
| | 0.001972 | 12.007766 | 0.002218 | 2.365661 | 0.001831 | 41.434038 | 0.002223 | 4.949424 |
| | 0.001291 | 11.124842 | 0.001456 | 1.261686 | 0.001227 | 39.497868 | 0.001511 | 2.474712 |
| | 0.000956 | 10.330211 | 0.001063 | 0.788554 | 0.000896 | 38.529783 | 0.001090 | 1.767652 |
| | 0.000693 | 9.712164 | 0.000763 | 1.103975 | 0.000652 | 36.593613 | | |
| | 0.000455 | 9.270702 | 0.000496 | 1.419396 | 0.000424 | 36.206379 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | S3-2 | | | | S3-3 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.074243 | 44.168985 | 0.092512 | 31.312250 | 0.073048 | 22.863803 | 0.089009 | 17.959872 |
| Test | 0.053105 | 43.047233 | 0.065905 | 29.308266 | 0.051867 | 22.632855 | 0.063646 | 16.276134 |
| | 0.038186 | 41.364605 | 0.046688 | 28.807270 | 0.038105 | 20.400363 | 0.045376 | 15.013331 |
| | 0.027662 | 38.840663 | 0.033195 | 27.304282 | 0.027952 | 18.090888 | 0.032375 | 13.610216 |
| | 0.026215 | 38.840663 | 0.031999 | 27.304282 | 0.026983 | 17.321063 | 0.031235 | 13.610216 |
| | 0.018885 | 37.017816 | 0.022693 | 26.552788 | 0.019533 | 15.858395 | 0.022401 | 11.505543 |
| | 0.013614 | 35.054750 | 0.016078 | 26.051792 | 0.014109 | 14.472710 | 0.015928 | 10.663674 |
| | 0.010076 | 33.652560 | 0.011753 | 25.801294 | 0.010434 | 13.625903 | 0.011728 | 9.400871 |
| | 0.006631 | 33.091684 | 0.008375 | 23.797310 | 0.007469 | 12.779095 | 0.008397 | 7.436510 |
| | 0.005136 | 31.549275 | 0.005978 | 21.292330 | 0.005419 | 10.931515 | 0.005990 | 6.033395 |
| | 0.003657 | 30.147085 | 0.004261 | 17.534860 | 0.003844 | 10.392638 | 0.004254 | 5.331837 |
| | 0.002617 | 28.744895 | 0.003063 | 11.272410 | 0.002757 | 9.622813 | 0.003013 | 5.051214 |
| | 0.001998 | 27.623143 | 0.002349 | 8.767430 | 0.001969 | 8.852988 | 0.002132 | 4.910903 |
| | 0.001323 | 26.361172 | 0.001568 | 4.258466 | 0.001388 | 8.776005 | 0.001519 | 3.648099 |
| | 0.000938 | 25.940515 | 0.001114 | 2.504980 | 0.000828 | 7.544285 | 0.000893 | 2.806230 |
| | 0.000672 | 24.538325 | 0.000786 | 1.753486 | 0.000601 | 7.544285 | 0.000648 | 2.104673 |
| | 0.000439 | 23.556792 | | | | | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | S4-2 | | | | S4-3 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.073882 | 73.502144 | 0.090159 | 68.539408 | 0.069483 | 31.450464 | 0.088756 | 18.650891 |
| Test | 0.052627 | 72.353673 | 0.063880 | 67.682665 | 0.049493 | 30.959051 | 0.062817 | 18.474939 |
| | 0.037590 | 70.745814 | 0.045260 | 66.825923 | 0.035852 | 29.288245 | 0.044458 | 18.298987 |
| | 0.026956 | 68.448872 | 0.032067 | 65.969180 | 0.025976 | 27.519156 | 0.031493 | 17.947084 |
| | 0.025462 | 68.448872 | 0.030807 | 65.969180 | 0.024679 | 27.322591 | 0.030374 | 17.947084 |
| | 0.018282 | 66.151930 | 0.021901 | 63.827324 | 0.017829 | 25.848350 | 0.021581 | 17.067325 |
| | 0.013082 | 64.314376 | 0.015585 | 61.257096 | 0.012887 | 24.275827 | 0.015318 | 16.363517 |
| | 0.009680 | 62.247128 | 0.011441 | 59.115239 | 0.009549 | 23.194717 | 0.011250 | 15.307807 |
| | 0.006903 | 60.868963 | 0.008115 | 57.830126 | 0.006831 | 22.310173 | 0.008030 | 13.548289 |
| | 0.004950 | 58.572021 | 0.005774 | 55.259898 | 0.004891 | 21.327346 | 0.005943 | 4.398795 |
| | 0.003576 | 54.896914 | 0.004285 | 33.841333 | 0.003471 | 21.032498 | 0.004148 | 0.879759 |
| | 0.002552 | 53.289054 | 0.003207 | 2.998599 | 0.002469 | 20.147954 | 0.003008 | 0.703807 |
| | 0.002099 | 51.221807 | 0.002272 | 2.141857 | 0.001759 | 19.361692 | 0.002123 | 0.703807 |
| | 0.001299 | 48.924865 | 0.001681 | 2.141857 | 0.001263 | 19.165127 | | |
| | 0.000934 | 46.857617 | 0.001144 | 1.285114 | 0.000816 | 18.182300 | | |
| | 0.000667 | 44.790369 | | | 0.000631 | 17.494321 | | |
| | 0.000435 | 43.182510 | | | 0.000437 | 17.101190 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | S4-4 | | | | NP1-1 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.071780 | 79.370265 | 0.088699 | 67.141629 | 0.072058 | 75.161331 | 0.089789 | 52.892738 |
| Test | 0.050908 | 78.881833 | 0.062720 | 67.141629 | 0.051542 | 73.252472 | 0.063609 | 52.046454 |
| | 0.036424 | 76.928103 | 0.044350 | 67.141629 | 0.036909 | 71.105005 | 0.045188 | 49.930744 |
| | 0.026053 | 74.974373 | 0.031391 | 66.708457 | 0.026458 | 68.718931 | 0.032041 | 48.661319 |
| | 0.024571 | 74.974373 | 0.030158 | 66.708457 | 0.025070 | 68.480324 | 0.030875 | 48.661319 |
| | 0.017650 | 72.532211 | 0.021439 | 64.542598 | 0.018018 | 65.855642 | 0.021918 | 46.968751 |
| | 0.012653 | 70.334266 | 0.015224 | 62.809911 | 0.012961 | 62.992354 | 0.015529 | 46.122467 |
| | 0.009081 | 67.892104 | 0.011141 | 61.943567 | 0.009663 | 59.413243 | 0.011385 | 44.429900 |
| | 0.006699 | 66.182590 | 0.007944 | 58.478193 | 0.006942 | 56.549954 | 0.008097 | 41.891048 |
| | 0.004791 | 64.228861 | 0.005611 | 55.445990 | 0.005004 | 52.970843 | 0.005439 | 40.198481 |
| | 0.003261 | 60.565618 | 0.004151 | 36.386431 | 0.003592 | 48.914517 | 0.004059 | 38.082771 |
| | 0.002481 | 57.879239 | 0.003119 | 2.165859 | 0.002584 | 44.380976 | 0.002928 | 26.657940 |
| | 0.001770 | 55.437077 | 0.002221 | 2.165859 | 0.002247 | 43.903762 | 0.001390 | 3.385135 |
| | 0.001291 | 52.506483 | 0.001591 | 2.165859 | 0.001190 | 36.984147 | 0.001126 | 0.846284 |
| | 0.000848 | 50.064321 | 0.001125 | 2.165859 | 0.000982 | 34.598073 | 0.000705 | 0.000000 |
| | 0.000650 | 49.087456 | | | 0.000621 | 31.973392 | | |
| | 0.000451 | 46.401078 | | | 0.000425 | 30.303140 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | NP1-2 | | | | NP1-3 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.070497 | 82.610630 | 0.085197 | 69.243300 | 0.072537 | 73.424923 | 0.088849 | 56.999124 |
| Test | 0.049990 | 82.072450 | 0.060243 | 69.243300 | 0.051732 | 72.008365 | 0.063186 | 54.502812 |
| | 0.035597 | 80.727000 | 0.042681 | 68.288220 | 0.036940 | 70.355714 | 0.044932 | 52.006500 |
| | 0.025241 | 80.188820 | 0.030239 | 67.333140 | 0.026337 | 68.939156 | 0.031921 | 49.926240 |
| | 0.023879 | 79.919730 | 0.029081 | 67.333140 | 0.024978 | 68.466970 | 0.030747 | 49.926240 |
| | 0.016937 | 79.381550 | 0.020585 | 66.855600 | 0.017822 | 67.050412 | 0.021850 | 47.845980 |
| | 0.012087 | 77.767010 | 0.014631 | 64.467900 | 0.012770 | 64.925575 | 0.015542 | 45.349668 |
| | 0.008880 | 76.690650 | 0.010751 | 61.602660 | 0.009460 | 62.564645 | 0.011394 | 43.685460 |
| | 0.006363 | 74.268840 | 0.007679 | 56.827260 | 0.006857 | 58.314971 | 0.008135 | 39.524940 |
| | 0.004461 | 71.308850 | 0.005590 | 42.501060 | 0.004926 | 55.481855 | 0.005807 | 35.364420 |
| | 0.003282 | 67.272500 | 0.004088 | 24.832080 | 0.003513 | 53.120925 | 0.003963 | 31.619952 |
| | 0.002356 | 63.774330 | 0.002941 | 12.416040 | 0.002527 | 49.579530 | 0.002934 | 27.875484 |
| | 0.001698 | 58.930710 | 0.002080 | 7.640640 | 0.001831 | 47.218600 | 0.002186 | 25.379172 |
| | 0.001035 | 55.163450 | 0.001283 | 2.387700 | 0.001126 | 43.913298 | 0.001331 | 12.065508 |
| | 0.000875 | 51.665280 | 0.001062 | 0.000000 | 0.000941 | 41.316275 | 0.001102 | 7.904988 |
| | 0.000617 | 50.319830 | | | 0.000654 | 40.844089 | | |
| 0.000426 | 47.628930 | | | 0.000452 | 37.302694 | | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | NP1-4 | | | | NP1-5 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.075623 | 70.089305 | 0.093238 | 50.556220 | 0.076516 | 75.638345 | 0.093283 | 60.007909 |
| Test | 0.054000 | 68.480698 | 0.066357 | 47.631480 | 0.054710 | 73.641293 | 0.066272 | 57.699913 |
| | 0.038395 | 67.561494 | 0.047222 | 44.706740 | 0.039004 | 72.143504 | 0.046949 | 56.776714 |
| | 0.027482 | 65.493285 | 0.033482 | 43.453280 | 0.027913 | 69.896820 | 0.033260 | 55.853515 |
| | 0.026014 | 65.493285 | 0.032287 | 43.453280 | 0.026325 | 70.645715 | 0.032035 | 55.853515 |
| | 0.018640 | 63.425076 | 0.022941 | 41.364180 | 0.018834 | 68.648663 | 0.022765 | 53.545519 |
| | 0.013390 | 60.897265 | 0.016299 | 39.275080 | 0.013510 | 66.152348 | 0.016193 | 50.775923 |
| | 0.009915 | 58.599255 | 0.011971 | 36.768160 | 0.010004 | 63.656033 | 0.011884 | 48.467927 |
| | 0.007088 | 56.760847 | 0.008536 | 33.007780 | 0.007189 | 60.660455 | 0.008444 | 46.159930 |
| | 0.005111 | 53.313832 | 0.006036 | 29.247400 | 0.005151 | 58.164140 | 0.006005 | 43.390334 |
| | 0.003600 | 50.326419 | 0.004306 | 26.322660 | 0.003669 | 55.917456 | 0.004274 | 40.159139 |
| | 0.002599 | 48.258210 | 0.003067 | 22.980100 | 0.002652 | 51.174458 | 0.003056 | 34.619948 |
| | 0.002053 | 45.500598 | 0.002481 | 22.144460 | 0.002285 | 49.926300 | 0.002772 | 30.003955 |
| | 0.001208 | 42.283384 | 0.001419 | 14.623700 | 0.001261 | 45.682565 | 0.001472 | 19.387171 |
| | 0.000992 | 39.985374 | 0.001157 | 10.445500 | 0.001030 | 43.186250 | 0.001192 | 15.232777 |
| | 0.000687 | 39.525772 | | | 0.000700 | 42.686987 | | |
| | 0.000471 | 35.619155 | | | 0.000479 | 39.192146 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | NP1-6 | | | | NP1-7 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.075189 | 76.934325 | 0.094638 | 53.233154 | 0.072831 | 72.871362 | 0.088988 | 58.983629 |
| Test | 0.053564 | 75.750720 | 0.067109 | 52.004697 | 0.051723 | 72.175138 | 0.063105 | 57.701376 |
| | 0.038154 | 74.567115 | 0.047453 | 52.004697 | 0.036731 | 71.478915 | 0.044622 | 57.701376 |
| | 0.027174 | 73.383510 | 0.033649 | 50.776239 | 0.026157 | 70.318543 | 0.031613 | 56.846541 |
| | 0.025615 | 73.383510 | 0.032403 | 50.776239 | 0.024919 | 68.926097 | 0.030421 | 56.846541 |
| | 0.018200 | 72.673347 | 0.023073 | 47.909839 | 0.017675 | 68.461948 | 0.021511 | 56.846541 |
| | 0.013073 | 70.306137 | 0.016380 | 46.271895 | 0.012651 | 66.605353 | 0.015304 | 54.282035 |
| | 0.009694 | 67.938927 | 0.012033 | 43.814981 | 0.009363 | 64.516683 | 0.011267 | 50.862694 |
| | 0.006967 | 65.334996 | 0.008575 | 40.539094 | 0.006840 | 59.178972 | 0.008202 | 38.040166 |
| | 0.004942 | 57.996645 | 0.006081 | 39.310637 | 0.004896 | 57.090302 | 0.006046 | 18.378957 |
| | 0.003616 | 55.392714 | 0.004175 | 33.987321 | 0.003463 | 54.537484 | 0.004297 | 12.822528 |
| | 0.002643 | 50.895015 | 0.003133 | 20.883776 | 0.002470 | 53.377112 | 0.003054 | 7.266099 |
| | 0.001988 | 48.054363 | 0.002438 | 15.969946 | 0.002069 | 47.575252 | 0.002621 | 6.411264 |
| | 0.001091 | 44.503548 | 0.001312 | 4.094858 | 0.001087 | 40.148871 | 0.001291 | 2.137088 |
| | 0.000927 | 43.793385 | | | 0.000923 | 38.756425 | 0.001090 | 0.000000 |
| | 0.000651 | 35.981592 | | | 0.000621 | 36.667755 | | |
| | 0.000461 | 34.797987 | | | 0.000442 | 33.650788 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | NP2-1 | | | | NP2-2 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.074276 | 66.835742 | 0.090195 | 51.098041 | 0.071627 | 65.225472 | 0.089791 | 44.607888 |
| Test | 0.052821 | 65.970555 | 0.063778 | 51.098041 | 0.051152 | 63.798665 | 0.063780 | 42.749226 |
| | 0.037665 | 64.672773 | 0.045270 | 49.606127 | 0.036573 | 62.168028 | 0.045342 | 40.518832 |
| | 0.026891 | 63.158695 | 0.032284 | 46.249322 | 0.026318 | 59.518243 | 0.032176 | 39.031902 |
| | 0.025348 | 63.591289 | 0.031088 | 46.249322 | 0.025081 | 59.518243 | 0.031172 | 39.031902 |
| | 0.018170 | 61.644617 | 0.022203 | 42.519538 | 0.018067 | 56.868458 | 0.022146 | 37.173240 |
| | 0.013000 | 59.914241 | 0.015824 | 39.535710 | 0.012989 | 54.422503 | 0.015732 | 35.314578 |
| | 0.009522 | 59.481648 | 0.011276 | 36.551883 | 0.009626 | 52.180378 | 0.011574 | 32.340719 |
| | 0.006925 | 55.155710 | 0.008337 | 31.703164 | 0.006905 | 49.938252 | 0.008199 | 31.597254 |
| | 0.004832 | 52.127553 | 0.005933 | 29.092315 | 0.004825 | 47.899956 | 0.005850 | 27.879930 |
| | 0.003577 | 48.883099 | 0.004213 | 25.735510 | 0.003488 | 44.231023 | 0.004085 | 17.843155 |
| | 0.002571 | 44.989755 | 0.002985 | 24.243596 | 0.002560 | 41.988898 | 0.003078 | 5.575986 |
| | 0.002348 | 44.340865 | 0.002878 | 23.497639 | 0.001917 | 39.746772 | 0.002379 | 1.858662 |
| | 0.001142 | 36.554176 | 0.001331 | 8.578503 | 0.001085 | 35.670180 | 0.001289 | 0.000000 |
| | 0.000962 | 35.256395 | 0.001117 | 5.594676 | 0.000969 | 34.447202 | | |
| | 0.000642 | 32.877129 | 0.000734 | 4.848719 | 0.000624 | 31.593588 | | |
| | 0.000455 | 29.848972 | 0.000515 | 1.864892 | 0.000449 | 28.332314 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | NK1-1 | | | | NK1-2 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.073687 | 71.061256 | 0.092811 | 43.944934 | 0.079136 | 63.814078 | 0.100872 | 38.676729 |
| Test | 0.052252 | 70.612920 | 0.065920 | 41.947437 | 0.056195 | 63.212058 | 0.071642 | 36.834980 |
| | 0.037207 | 69.492080 | 0.046982 | 38.351942 | 0.040292 | 61.205326 | 0.050881 | 34.993231 |
| | 0.026708 | 67.026232 | 0.033395 | 35.954946 | 0.028878 | 59.198594 | 0.036041 | 34.256531 |
| | 0.025466 | 66.802064 | 0.032380 | 35.954946 | 0.027590 | 58.797248 | 0.034940 | 34.256531 |
| | 0.018351 | 63.887880 | 0.023001 | 33.957449 | 0.020016 | 55.185130 | 0.024775 | 33.151482 |
| | 0.013251 | 60.525360 | 0.016382 | 30.761454 | 0.014348 | 53.178398 | 0.017550 | 32.414782 |
| | 0.009861 | 57.387008 | 0.011985 | 29.962455 | 0.010730 | 49.566280 | 0.012840 | 31.678083 |
| | 0.007082 | 54.696992 | 0.008550 | 25.967461 | 0.007752 | 46.154836 | 0.008128 | 23.206037 |
| | 0.005097 | 51.558640 | 0.006099 | 21.972467 | 0.005478 | 43.546084 | 0.006599 | 20.259239 |
| | 0.003674 | 47.971952 | 0.004361 | 6.791490 | 0.004023 | 40.937333 | 0.004276 | 12.892243 |
| | 0.002518 | 43.712760 | 0.003191 | 0.000000 | 0.002900 | 37.525888 | 0.003340 | 7.735346 |
| | 0.002154 | 42.367752 | | | 0.002630 | 37.124542 | 0.001507 | 0.000000 |
| | 0.001149 | 37.436056 | | | 0.001279 | 32.509058 | | |
| | 0.001023 | 36.539384 | | | 0.001135 | 31.104346 | | |
| | 0.000652 | 33.401032 | | | 0.000715 | 29.097614 | | |
| | 0.000463 | 30.262680 | | | 0.000504 | 26.689536 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | NK1-3 | | | | NK1-4 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.078106 | 69.722250 | 0.098695 | 47.196600 | 0.079108 | 51.097946 | 0.098557 | 34.666449 |
| Test | 0.055628 | 68.649600 | 0.070108 | 45.308736 | 0.056565 | 49.800220 | 0.069817 | 34.083820 |
| | 0.039615 | 67.576950 | 0.049709 | 44.176018 | 0.040653 | 47.853632 | 0.049502 | 33.209876 |
| | 0.028404 | 65.431650 | 0.035213 | 43.420872 | 0.029165 | 46.069259 | 0.035191 | 31.461988 |
| | 0.027020 | 65.431650 | 0.034094 | 43.420872 | 0.027823 | 46.069259 | 0.034088 | 31.461988 |
| | 0.019307 | 63.929940 | 0.024247 | 41.155435 | 0.019924 | 44.609318 | 0.024172 | 30.588044 |
| | 0.014012 | 60.068400 | 0.017210 | 39.645144 | 0.014283 | 42.987161 | 0.017189 | 28.840155 |
| | 0.010433 | 57.064980 | 0.012675 | 36.246989 | 0.010557 | 41.527219 | 0.012600 | 27.674897 |
| | 0.007515 | 54.061560 | 0.009012 | 33.981552 | 0.006818 | 39.742847 | 0.009073 | 21.848603 |
| | 0.005298 | 49.127370 | 0.006413 | 31.338542 | 0.005409 | 38.445121 | 0.006415 | 21.848603 |
| | 0.003831 | 46.553010 | 0.004576 | 22.276795 | 0.003891 | 36.174101 | 0.004615 | 11.943903 |
| | 0.002809 | 44.407710 | 0.003354 | 11.704757 | 0.002785 | 34.551944 | 0.003380 | 3.787091 |
| | 0.002212 | 42.262410 | 0.002745 | 7.551456 | 0.002395 | 33.578650 | 0.003088 | 2.330518 |
| | 0.001173 | 37.542750 | 0.001393 | 0.000000 | 0.001181 | 30.009905 | 0.001423 | 0.000000 |
| | 0.001046 | 37.542750 | | | 0.001060 | 29.198826 | | |
| | 0.000661 | 33.252150 | | | 0.000659 | 26.765591 | | |
| | 0.000477 | 32.823090 | | | 0.000478 | 25.143434 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | NK1-5 | | | | NK1-6 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.078905 | 46.940986 | 0.097494 | 33.705000 | 0.070432 | 20.090533 | 0.086876 | 11.909512 |
| Test | 0.056416 | 45.741216 | 0.069065 | 33.165720 | 0.050648 | 19.189923 | 0.061645 | 11.428320 |
| | 0.040811 | 43.191706 | 0.049103 | 31.547880 | 0.036176 | 18.635701 | 0.043817 | 10.706531 |
| | 0.029345 | 41.242080 | 0.034972 | 29.390760 | 0.026086 | 17.527258 | 0.031090 | 10.225339 |
| | 0.028026 | 41.242080 | 0.033873 | 29.390760 | 0.025140 | 17.180870 | 0.030153 | 10.225339 |
| | 0.020118 | 39.592397 | 0.024042 | 28.312200 | 0.017982 | 16.557370 | 0.021515 | 9.022358 |
| | 0.014397 | 38.242656 | 0.017302 | 23.189040 | 0.012890 | 15.795316 | 0.015227 | 8.902059 |
| | 0.010719 | 35.993088 | 0.012647 | 22.919400 | 0.009471 | 15.448927 | 0.011179 | 8.180271 |
| | 0.007665 | 34.643347 | 0.009000 | 21.031920 | 0.006762 | 14.894706 | 0.007981 | 6.856992 |
| | 0.005374 | 32.693722 | 0.006426 | 18.065880 | 0.004637 | 14.340484 | | |
| | 0.003872 | 31.343981 | 0.004592 | 14.830200 | 0.003462 | 13.855540 | | |
| | 0.002819 | 29.694298 | 0.003357 | 4.044600 | 0.002462 | 13.509152 | | |
| | 0.002609 | 29.694298 | 0.001460 | 0.000000 | 0.001856 | 13.162763 | | |
| | 0.001221 | 26.244960 | | | 0.001005 | 12.608541 | | |
| | 0.001082 | 26.244960 | | | 0.000900 | 12.400708 | | |
| | 0.000664 | 23.995392 | | | 0.000571 | 11.707931 | | |
| | 0.000480 | 22.495680 | | | | | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | NK2-1 | | | | NK2-2 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.077325 | 79.108987 | 0.097095 | 51.841080 | 0.070015 | 49.586103 | 0.087545 | 32.598038 |
| Test | 0.054909 | 78.362676 | 0.068842 | 50.488704 | 0.050748 | 46.752611 | 0.062182 | 31.180732 |
| | 0.039262 | 76.372513 | 0.048809 | 49.136328 | 0.036693 | 44.076536 | 0.044165 | 29.763426 |
| | 0.028180 | 73.636038 | 0.034667 | 46.882368 | 0.026440 | 41.715293 | 0.031395 | 28.062659 |
| | 0.026880 | 73.387268 | 0.033587 | 46.882368 | 0.025282 | 41.715293 | 0.030426 | 28.062659 |
| | 0.019312 | 70.650794 | 0.023995 | 41.923656 | 0.018188 | 39.668882 | 0.021594 | 26.928814 |
| | 0.013944 | 66.919238 | 0.016982 | 41.472864 | 0.013044 | 37.937304 | 0.015354 | 25.228047 |
| | 0.010349 | 63.933993 | 0.012470 | 38.768112 | 0.009670 | 36.048310 | 0.011254 | 24.094202 |
| | 0.007433 | 60.948748 | 0.008850 | 36.964944 | 0.006888 | 35.103813 | 0.007965 | 23.810741 |
| | 0.005173 | 57.714733 | 0.006297 | 33.809400 | 0.004730 | 33.687067 | 0.005678 | 21.259590 |
| | 0.003859 | 54.480718 | 0.004541 | 26.596728 | 0.003548 | 31.955489 | 0.004082 | 15.873827 |
| | 0.002771 | 51.246702 | 0.003259 | 15.777720 | 0.002532 | 30.696159 | 0.003037 | 0.566922 |
| | 0.002312 | 49.007769 | 0.002880 | 6.761880 | 0.002353 | 29.436829 | | |
| | 0.001178 | 43.534820 | | | 0.001093 | 27.075586 | | |
| | 0.001050 | 43.534820 | | | 0.000972 | 26.603338 | | |
| | 0.000664 | 39.305723 | | | 0.000603 | 24.871760 | | |
| 0.000486 | 38.310642 | | | 0.000439 | 24.399511 | | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | NK2-3 | | | | NK2-4 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.070396 | 38.944382 | 0.089107 | 22.243962 | 0.075984 | 77.122445 | 0.094318 | 54.436992 |
| Test | 0.049984 | 38.565054 | 0.063447 | 20.409409 | 0.054026 | 76.124096 | 0.066995 | 52.168784 |
| | 0.036158 | 36.415526 | 0.045172 | 18.574855 | 0.038670 | 73.877811 | 0.047713 | 48.539651 |
| | 0.026326 | 33.507342 | 0.032103 | 17.198940 | 0.027743 | 71.132352 | 0.033858 | 46.725085 |
| | 0.025274 | 33.128014 | 0.031153 | 17.198940 | 0.026463 | 71.132352 | 0.032805 | 46.725085 |
| | 0.018391 | 30.346272 | 0.022166 | 15.593706 | 0.019030 | 68.137306 | 0.023349 | 43.549594 |
| | 0.013329 | 27.817416 | 0.015715 | 14.905748 | 0.013677 | 65.142259 | 0.015638 | 41.281386 |
| | 0.009909 | 25.920774 | 0.011577 | 12.612556 | 0.010147 | 62.147213 | 0.012124 | 40.827744 |
| | 0.007095 | 24.529903 | 0.008186 | 12.612556 | 0.007268 | 59.651341 | 0.008589 | 39.920461 |
| | 0.004984 | 22.506818 | 0.005526 | 6.191618 | 0.004970 | 56.406707 | 0.006117 | 36.291328 |
| | 0.003500 | 21.748162 | | | 0.003568 | 54.410010 | 0.004412 | 29.033062 |
| | 0.002629 | 21.115948 | | | 0.002708 | 51.165376 | 0.003193 | 16.784739 |
| | 0.002019 | 20.357291 | | | 0.002271 | 49.917440 | 0.002842 | 7.711907 |
| | 0.001081 | 18.460649 | | | 0.001151 | 44.426522 | | |
| | | | | | 0.001034 | 44.676109 | | |
| | | | | | 0.000649 | 42.429824 | | |
| | | | | | 0.000472 | 41.181888 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | NK2-5 | | | | NK3-1 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.078307 | 84.994591 | 0.096481 | 60.206524 | 0.075255 | 58.666650 | 0.094950 | 29.048941 |
| Test | 0.055601 | 84.169400 | 0.068657 | 56.752052 | 0.053714 | 57.297762 | 0.067424 | 27.255796 |
| | 0.039692 | 82.243957 | 0.049026 | 51.323594 | 0.038382 | 55.733318 | 0.047796 | 26.179910 |
| | 0.028591 | 78.393069 | 0.034850 | 48.362618 | 0.027802 | 52.017763 | 0.034079 | 22.593621 |
| | 0.027272 | 78.393069 | 0.033777 | 48.362618 | 0.026581 | 52.017763 | 0.033091 | 22.593621 |
| | 0.019693 | 74.267118 | 0.024105 | 43.427657 | 0.019273 | 48.302209 | 0.023480 | 21.159105 |
| | 0.014171 | 70.691294 | 0.017153 | 39.973184 | 0.013837 | 45.955543 | 0.016675 | 19.365961 |
| | 0.010512 | 67.390533 | 0.012583 | 37.505704 | 0.010305 | 42.826655 | 0.012251 | 16.855558 |
| | 0.007537 | 64.364836 | 0.008993 | 31.583750 | 0.006999 | 39.111100 | 0.008322 | 13.627898 |
| | 0.005441 | 59.688758 | 0.006387 | 29.116270 | 0.005329 | 37.155545 | 0.006264 | 7.172578 |
| | 0.003825 | 56.663060 | 0.004630 | 17.765860 | 0.003854 | 35.199990 | | |
| | 0.002988 | 53.912426 | 0.003961 | 6.908945 | 0.002780 | 32.657769 | | |
| | 0.001262 | 45.385461 | | | 0.002140 | 31.093325 | | |
| | 0.001121 | 45.385461 | | | 0.001159 | 28.355548 | | |
| | 0.000692 | 41.809637 | | | 0.001023 | 27.377770 | | |
| | 0.000496 | 40.434320 | | | 0.000684 | 24.444438 | | |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ตัวอย่าง | NK3-2 | | | | NK3-3 | | | |
|-------------------|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | | มาตรฐาน ASTM D422 | | มาตรฐาน ASTM D4221 | |
| | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ | ขนาดเม็ดดิน (มม.) | เปอร์เซ็นต์เม็ดดินที่มี ขนาดเล็กกว่าที่ระบุ |
| Double Hydrometer | 0.071582 | 73.909519 | 0.088636 | 47.237904 | 0.070073 | 70.942299 | 0.086782 | 48.177312 |
| Test | 0.051022 | 72.416398 | 0.063007 | 44.538595 | 0.050089 | 69.081517 | 0.061586 | 46.530225 |
| | 0.036362 | 70.923276 | 0.044709 | 42.739056 | 0.035655 | 67.918528 | 0.043859 | 43.236050 |
| | 0.026208 | 67.190472 | 0.031806 | 39.589862 | 0.025609 | 65.127356 | 0.031041 | 42.824278 |
| | 0.024908 | 68.185886 | 0.030843 | 39.589862 | 0.024340 | 65.825149 | 0.030074 | 42.824278 |
| | 0.017951 | 64.701936 | 0.021889 | 37.790323 | 0.017501 | 63.033977 | 0.021266 | 42.824278 |
| | 0.012944 | 60.969132 | 0.015604 | 33.741360 | 0.012611 | 59.777609 | 0.015122 | 40.353646 |
| | 0.009669 | 56.489767 | 0.011122 | 29.692397 | 0.009343 | 57.219034 | 0.011547 | 35.824155 |
| | 0.006716 | 53.503524 | 0.007912 | 26.543203 | 0.006411 | 53.962666 | 0.007120 | 4.117719 |
| | 0.004963 | 51.014988 | 0.005922 | 13.496544 | 0.004825 | 51.171494 | | |
| | 0.003608 | 48.526452 | | | 0.003488 | 49.078115 | | |
| | 0.002589 | 45.291355 | | | 0.002498 | 46.519540 | | |
| | 0.002090 | 43.549380 | | | 0.002139 | 45.356552 | | |
| | 0.001100 | 38.821162 | | | 0.001067 | 42.565379 | | |
| | 0.000961 | 38.074601 | | | 0.000933 | 41.169793 | | |
| | 0.000638 | 34.839504 | | | 0.000615 | 39.309011 | | |

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

| | |
|------------------------------|---|
| ชื่อ-นามสกุล | นายชอุเดช ทองมิตร |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด | วันที่ 19 กรกฎาคม 2524 |
| สถานที่เกิด | จังหวัดยะลา |
| ประวัติการศึกษา | ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาเอกวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน | กำลังศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาเอกวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน | |

แหล่งทุนสนับสนุน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสำหรับอุดหนุนงานวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร สำหรับเป็นค่าวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่จำเป็น ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการนำเสนอผลงานวิจัยต่าง ๆ จำนวน 2 ทุน ได้แก่

1. ทุนวิจัยคณะประจำปี 2549 ถึง 2550 เรื่อง “การศึกษาแนวทางในการแก้ปัญหาการกัดเซาะที่เกิดจากดินกระจายตัวบริเวณอ่างเก็บน้ำและถนน ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร”

2. ทุนวิจัยคณะประจำปี 2550 เรื่อง “การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนและความชื้นน้ำของดินกระจายตัว ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร”

ทุนวิจัยแรก มีระยะเวลาดำเนินการวิจัยตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2549 ถึงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2549 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 10 เดือน ด้วยทุนสนับสนุน 25,000 บาท และทุนวิจัยสุดท้าย มีระยะเวลาดำเนินการวิจัยตั้งแต่วันที่ราวเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2550 ถึงเดือนตุลาคมปีเดียวกัน รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 6 เดือน ด้วยทุนสนับสนุน 15,000 บาท

งานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1. *Joint JSPS-DOST International Symposium on Environmental Engineering and 5th Regional Symposium on Infrastructure Development (RSID) in Civil Engineering, 7-8 December, 2006, SEAMEO-INNOTECH, University of the Philippines, Diliman, Quezon City, PHILIPPINES, paper namely: “Alternative Countermeasures for Dispersive Soil Erosions of Reservoirs and Road Embankments in Kasetsart University Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus”*

2. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13 (Proceeding of the 13th National Convention on Civil Engineering, NCCE13) ณ โรงแรมจอมเทียน ปาล์มบีช พัทยา ระหว่างวันที่ 14-16 พฤษภาคม พ.ศ. 2551 เรื่อง “การศึกษาเพื่อหาแนวทางในการแก้ปัญหาการกัดเซาะที่เกิดจากดินกระจายตัวบริเวณอ่างเก็บน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร”