

# การประยุกต์ใช้ความรู้ทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำสำหรับงานเสถียรภาพของลาดดิน

## APPLICATION OF UNSATURATED SOIL MECHANICS FOR SLOPE STABILITY

ดร. อภินิติ โชติสังกาศ (Apiniti Jotisankasa)<sup>1</sup>

ดร. อัครพัฒน์ สว่างสุริย์ (Auckpath Sawangsuriya)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ fengatj@ku.ac.th

<sup>2</sup>ส่วนออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทาง สำนักวิศวกรรมและตรวจสอบ กรมทางหลวง sawangsuriya@gmail.com

**บทคัดย่อ :** ดินในพื้นที่ลาดชันและดินบดอัดแน่นของลาดดินถมในงานทางในประเทศไทยมักอยู่ในสภาวะไม่อิ่มน้ำหรืออิ่มน้ำสลับกันตามฤดูกาล แปรผันตามคุณลักษณะทางชลศาสตร์ และการระบายน้ำของลาดดิน การพิจารณาดินในสภาวะไม่อิ่มน้ำจะช่วยให้วิศวกรสามารถคาดคะเนพฤติกรรมของดินใกล้เคียงกับสภาพจริงในสนาม ความเข้าใจในพฤติกรรมการอิ่มน้ำ การไหลซึมของน้ำผ่านดิน รวมไปถึงกำลังของดินและปริมาตรที่แปรเปลี่ยนตามสภาพแรงดันน้ำจึงเป็นสิ่งสำคัญซึ่งจะนำไปสู่การดูแลรักษาโครงสร้างเหล่านั้นไม่ให้อยู่ในสภาพที่มีแรงดันน้ำมากเกินไปจนก่อให้เกิดความเสียหายในที่สุด บทความนี้นำเสนอทฤษฎีทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำและงานวิจัยพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งแนวทางการศึกษา การตรวจวัดในสนาม การวิเคราะห์เชิงตัวเลข และการประยุกต์องค์ความรู้เหล่านั้นเพื่อประเมินการเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีต่างๆ ในเชิงปริมาณ

**ABSTRACT :** Natural soils and compacted fills used for highway work in steep terrain are normally in unsaturated state during dry season, and can become saturated during rainy season, depending on the drainage and hydrological condition of the slope. Understanding of soil behaviour in unsaturated state and any changes in its characteristics due to saturation or evapotranspiration will enable engineers to predict the actual slope behaviour in the field. The important characters include shear strength variation with suction, swelling, shrinkage or collapse due to suction change as well as seepage and water retention capacity. This paper presents the theory of unsaturated soil mechanics and some related studies carried out in Thailand including laboratory tests, field monitoring, numerical analysis and their applications for quantitative assessment of slope performance.

**KEYWORDS :** Unsaturated soil mechanics, Slope stability

### 1. บทนำ

ปัญหาเสถียรภาพของลาดดินในประเทศไทยนับว่ามีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งลาดดินในงานทางซึ่งมีผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ถนนและเกี่ยวข้องกับงบประมาณจำนวนมากในการบำรุงรักษา (ภาพที่ 1) ความเสียหายที่พบมากในประเทศไทยคือ บริเวณเชิงลาดเหนือคันทาง (Back Slope) ซึ่งเกิดการวิบัติของลาดดินในระดับดินหลังเกิดฝนตกหนักและ

ติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน ทำให้มวลดินพังทลายลงมาปิดทับเส้นทางสัญจรบนทางหลวง ปัญหาดังกล่าวนับวันจะทวีความรุนแรงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อสภาพภูมิอากาศมีความแปรปรวนอย่างมากในปัจจุบัน

แนวการพังทลายของลาดดินในงานทางมักจะลึกไม่เกิน 2-3 เมตร โดยทั่วไปในหน้าแล้ง ลาดดินในช่วงความลึกนี้จะอยู่ในสภาวะไม่อิ่มน้ำ และแรงดันน้ำในช่องว่างดินจะมีค่าติดลบ ที่

เรียกว่า แรงดูดเมทริก หรือความเครียดเมทริก (Matric suction) นั่นเอง แรงดูดเมทริกนี้เป็นตัวช่วยเชื่อมประสานเม็ดดินไว้โดยแรงตึงผิว (Surface tension) ซึ่งเปรียบเสมือนกาวยึดเม็ดดินไว้ด้วยกันทำให้ลาดดินมีความแข็งแรง ในช่วงที่มีฝนตกติดต่อกัน ค่าแรงดันน้ำจะเพิ่มขึ้นได้มาก เนื่องจากมีน้ำไหลซึมผ่านลงไปสะสมในโพรงภายในมวลดิน แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้จะลดค่าแรงดันประสิทธิผล (Effective stress,  $\sigma' = \sigma - u$ ) และลดเสถียรภาพของเชิงลาด (Factor of safety) ทำให้เกิดดินถล่มนั่นเอง



ภาพที่ 1 ร่องรอยดินถล่มหลังจากฝนตกหนัก บริเวณทางหลวงหมายเลข 108 ช่วงกม. 86+200 – 86+300 จังหวัดแม่ฮ่องสอน

## 2. ทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ

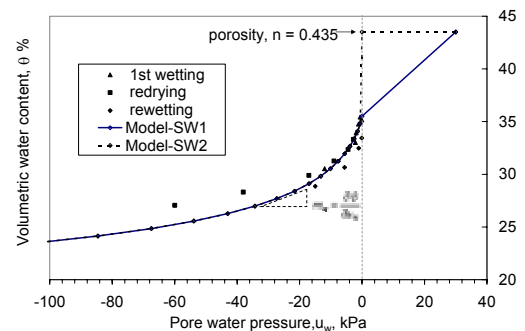
### 2.1 แรงดูดเมทริกและการตรวจวัด

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แรงดูดเมทริก (Matric suction) ความเครียดเมทริก หรือแรงดันน้ำด้านลบนี้ มีความสำคัญอย่างมากในการรักษาลาดดินไว้ให้อยู่ในสภาพที่มีเสถียรภาพเพียงพอ การตรวจวัดค่าแรงดูดสามารถทำได้โดยตรงโดยใช้เครื่องมือเทนซิโอมิเตอร์ (Tensiometer) อนึ่ง สำหรับการตรวจวัดดินถล่มนั้น เครื่องมือวัดควรจะสามารวัดแรงดันน้ำได้ทั้งด้านบวกและลบ เนื่องจากความดันน้ำในช่องว่างดินที่ก่อให้เกิดดินถล่มอาจจะมีค่าเป็นบวกหรือลบ ขึ้นอยู่กับความชันของลาดดิน (อภินิติ และ วิชญพงศ์, 2551ก) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้ทำการพัฒนา KU-tensiometer โดยประยุกต์เทคโนโลยี MEMs เพื่อใช้วัดแรงดันน้ำทั้งในสถานะที่เป็นลบและบวกในลาดดิน (Jotisankasa et al., 2007, อภินิติ และ วิชญพงศ์, 2551)

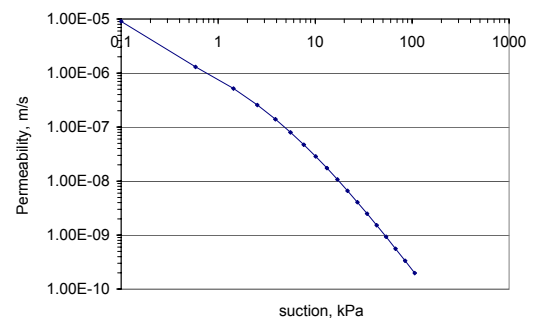
### 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเมทริกและคุณสมบัติต่างๆ ของดิน

Sawangsuriya (2006) รวบรวมผลงานวิจัยที่ผ่านมาและพบว่าพฤติกรรมของดินไม่อิ่มน้ำขึ้นอยู่กับค่าแรงดูดในดิน ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำและค่าความอิ่มน้ำของดิน (Degree of saturation,  $S_r$ ) ดินที่มีปริมาณน้ำหรือค่าความอิ่มน้ำมาก จะมีค่าแรงดูดในดินต่ำ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดูดและปริมาณน้ำแสดงด้วยเส้นอรรถลักษณะ (Soil Water Characteristic Curve, SWCC) ซึ่งเป็นเส้นบอกความจุในการเก็บน้ำของดินที่ค่าแรงดูดใดๆ ภาพที่ 2 แสดงเส้นอรรถลักษณะของดินภูเขาจากหินภูเขาไฟที่ความลึก 1 เมตร บริเวณเขาคิชกูฏ จังหวัดจันทบุรี โดย volumetric water content,  $\theta$  มีค่าเท่ากับ ปริมาตรน้ำในดินส่วนด้วยปริมาตรทั้งหมดของดิน

เส้นอรรถลักษณะในภาพที่ 2 ได้ทดสอบในช่วงที่ดินกำลังแห้งและกำลังเปียกเพื่อศึกษาลักษณะ Hysteresis และแสดงแบบจำลองที่ใช้ โดยแบบจำลอง SW1 กำหนดให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $\theta_{sat} = \text{porosity}$ ) หลังจากอยู่ภายใต้แรงดันน้ำประมาณ 30 kPa ในขณะที่แบบจำลอง SW2 กำหนดให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำหลังจากอยู่ภายใต้แรงดันน้ำ 0 kPa ทั้งนี้การทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า เมื่อแช่ดินในน้ำเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ ดินยังมีค่า  $S_r$  เพียง 82% เนื่องจากการอิ่มตัวของดินภายใต้สภาวะที่มีแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นยังไม่เป็นประเด็นที่มีการวิจัยมากนัก จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองใดจะมีความถูกต้องมากที่สุด



ภาพที่ 2 เส้นอรรถลักษณะ (SWCC) ของดินภูเขาจากหินภูเขาไฟที่ความลึก 1 เมตร บริเวณเขาคิชกูฏ จังหวัดจันทบุรี



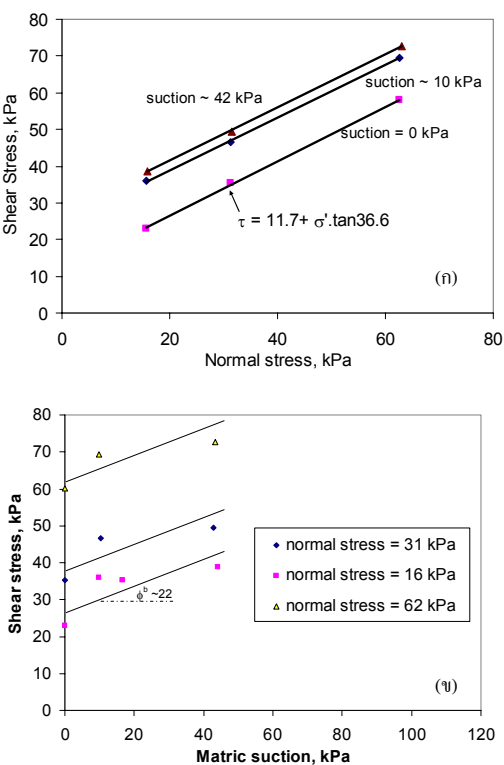
ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมน้ำได้และแรงดูดเมทริก ของดินเขาคิชกูฏ จังหวัดจันทบุรี

ลักษณะของเส้น SWCC ยังสามารถนำไปประมาณหาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การซึมน้ำกับแรงดูดได้ (Jackson, 1972) ดังแสดงในภาพที่ 3 ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำที่สถานะอิ่มน้ำนี้ได้จากการทดสอบ Double Ring Infiltration Test (กรมทรัพยากรน้ำ, 2550)

กำลังรับแรงเฉือน  $\tau$  ของดินทั้งในสถานะอิ่มน้ำและไม่อิ่มน้ำนั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (1) (Fredlund & Rahardjo, 1993)

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan \phi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \phi^b \quad (1)$$

โดยค่า  $c'$  = ความเชื่อมแน่นประสิทธิผล,  $\sigma_n$  = หน่วยแรงตั้งฉาก,  $u_a$  = ความดันอากาศในช่องว่างดิน (มีค่า = 0 ในสถานะทั่วไป),  $u_w$  = ความดันน้ำในช่องว่างดิน,  $\phi'$  = มุมแรงเฉือนประสิทธิผล,  $\phi^b$  = มุมแรงเฉือนสำหรับแรงดูด ( $\phi^b$  มีค่าเท่ากับ  $\phi'$  เมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำ) ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยการทดสอบ Suction-monitored direct shear กับตัวอย่างดินจากจันทบุรี ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและแรงดูดเมทริก ของดินเขลียง จังหวัดจันทบุรี ทดสอบโดยวิธี Suction-monitored direct shear

### 3. การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ

เป็นที่ทราบดีว่า การออกแบบใดๆ ในทางวิศวกรรมจะต้องคำนึงถึงกรณีที่โครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกมากที่สุด เช่นกัน

สำหรับการออกแบบลาดดิน จึงควรสมมุติให้ลาดดินอยู่ในสถานะอิ่มน้ำและผิวหน้าดินมีแรงดันน้ำในสถานะสถิตย์โดยระดับน้ำอยู่ที่ผิวดิน ( $u = \gamma_w \cdot z$ ) ซึ่งจะเป็นสถานะที่ค่า Effective stress ของดินมีค่าน้อยที่สุด และกำลังรับแรงเฉือนน้อยที่สุดนั่นเอง. อย่างไรก็ตาม สำหรับการบำรุงรักษา การวิเคราะห์ลาดดินตามสภาพดินที่เป็นอยู่จริงซึ่งอยู่ในสถานะสลับเปียก สลับแห้ง จะช่วยให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นว่าสถานะการไหลซึมน้ำอย่างไรจึงจะก่อให้เกิดความไม่มั่นคงต่อลาดดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการป้องกันไม่ให้แรงดันน้ำในลาดดินมีค่ามากเกินไป

#### 3.1 สมการการไหลของน้ำผ่านดินในสถานะไม่อิ่มน้ำ

สมการพื้นฐานสำหรับการไหลของดินได้แสดงไว้ดังสมการที่ 2

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = m_w \left( \frac{\partial u_w}{\partial t} \right) \quad (2)$$

เมื่อ ค่า  $k_x$  และ  $k_y$  คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำในแนวแกน x และ y ซึ่งจะแปรผันตามค่าแรงดันน้ำดังได้กล่าวไว้ข้างต้น, ค่า  $h$  คือ ศักย์น้ำรวม (Total hydraulic head), ค่า  $Q$  คือ ปริมาณน้ำไหลเข้าออกที่ขอบเขต (Applied boundary flux), และค่า  $m_w$  คือ ความชันของเส้นอัตราส่วนความชื้นของดิน,  $m_w = \frac{\partial \theta}{\partial u_w}$  ดังตัวอย่างในภาพที่ 2

วัตถุประสงค์สำคัญในการแก้สมการที่ (1) คือ การหาค่าแรงดันน้ำ  $u_w$  สำหรับการคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผล  $\sigma'$  ในการคำนวณเสถียรภาพของลาดดินนั่นเอง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) ก็จะเห็นได้ชัดเจนว่า ค่าแรงดันน้ำจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญสองตัว คือ

1) การไหลซึมต่อหน่วยพื้นที่ของน้ำฝนเข้าสู่ลาดดินหรือออกจากลาด ( $Q$ )

2) อัตราส่วนของความชื้นน้ำต่อความชันของเส้นอัตราส่วน  $\frac{k}{m_w}$  Ng & Shi (1998) ได้เสนอว่า ดินที่อัตราส่วน  $\frac{k}{m_w}$  มีค่าสูง (นั่นคือความชื้นน้ำสูง และความชันเส้นอัตราส่วนต่ำ) จะส่งผลให้ ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีฝนตกและน้ำไหลซึมเข้าในลาดดิน

#### 3.2 การประเมินค่าแรงดันเริ่มต้นในลาดดิน

ในเบื้องต้นได้แสดงผลการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านหน้าตัดดินหนา 3 เมตร เพื่อศึกษาอิทธิพลจากฝนตกและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อเสถียรภาพของลาดดิน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังภาพที่ 5 คุณสมบัติของดินที่ใช้ได้จากการตรวจสอบจริงในพื้นที่บริเวณเขาคิชฌกูฏ จ.จันทบุรี ซึ่งประกอบไปด้วย เส้นอัตราความชื้นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และ กำลังรับแรงเฉือน ดังได้กล่าวมาแล้ว โดยทำการวิเคราะห์แบบหนึ่งมิติเพื่อประเมินความสำคัญของตัวแปรแต่ละตัว และเป็นพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์สองมิติต่อไปได้

ขั้นตอนสำคัญที่สุดอันหนึ่งในการสร้างแบบจำลอง คือการกำหนดสภาวะเริ่มต้น (Initial condition) ซึ่งโดยทั่วไปจะได้จากการวิเคราะห์การไหลแบบคงที่ (Steady state) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ คือ

(1) กำหนดขอบเขตบนสุดให้มีการไหลซึมลงที่อัตราคงที่ (Unit flux,  $q$ ) ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับอัตราความชื้นของน้ำฝนเฉลี่ย ซึ่งตรวจวัดได้ในพื้นที่ อ.เขาคิชฌกูฏ ในช่วงต้นฤดูฝน (บรรพต, 2548) โดยมีค่าประมาณ 400 มม/เดือน ( $1.54 \times 10^{-7}$  ม/วินาที)

(2) เนื่องจากกำหนดให้การไหลเป็นแบบหนึ่งมิติ จึงให้ลักษณะ boundary ด้านข้างของหน้าตัดดินเป็นลักษณะทึบน้ำ (no flow)

(3) ค่า head ด้านล่างสุดของหน้าตัดดิน สามารถหาได้จากแรงดันที่สอดคล้องกับสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่มีค่าเท่ากับอัตราการไหลซึมเข้าด้านบน ( $q = 1.54 \times 10^{-7}$  ม/วินาที) หรือจากภาพที่ 3 จะได้ค่าแรงดันเท่ากับประมาณ 4 kPa (pressure = -4 kPa)

ผลการวิเคราะห์หาสภาวะเริ่มต้นแสดงในภาพที่ 6 โดยเปรียบเทียบกับค่าแรงดันน้ำที่ตรวจวัดได้จริงในพื้นที่ (กรมทรัพยากรน้ำ 2550) พบว่าสอดคล้องกัน อนึ่ง การกำหนดลักษณะขอบเขต (boundary condition) ที่ด้านล่างของหน้าตัดดินควรหาค่าที่ตรวจวัดได้ในสนาม โดยอาจเป็นระดับน้ำใต้ดินหรืออาจต้องมีการตรวจวัดค่าแรงดันและเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาความชื้นและคำนวณย้อนกลับหาค่าแรงดันโดยใช้เส้นอัตราความชื้นของดิน หรืออาจใช้วิธีการประมาณจากสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำดังได้กล่าวมาแล้ว

ขนาดของตารางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Mesh) ยังมีผลต่อผลการวิเคราะห์การไหลซึมแบบ Transient อย่างมาก Toll et al. (2007) แนะนำให้ใช้ตาข่าย Mesh สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ขนาด  $0.1 \times 0.1$

ม<sup>2</sup> เนื่องจากให้ผลที่ถูกต้องกว่าขนาด  $0.5 \times 0.5$  ม<sup>2</sup> ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้เอลิเมนต์ ขนาด  $0.1 \times 0.1$  ม<sup>2</sup> ดังแสดงในภาพที่ 5

3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่สภาวะฝนตกต่างๆ สำหรับการประเมินเสถียรภาพของลาดดินที่สภาวะฝนตกที่ความเข้มต่างกัน สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์แบบไม่คงที่ (Transient analysis) ซึ่งจะแตกต่างจากการวิเคราะห์แบบคงที่ (Steady state) ดังนี้

(1) การวิเคราะห์แบบ Transient จำเป็นต้องใช้ข้อมูลเส้นอัตราความชื้นของดิน ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ ได้กำหนดเส้นอัตราความชื้นไว้สองลักษณะดังภาพที่ 2 เพื่อประเมินสมมุติฐานของการอิ่มน้ำของดินทั้งสองกรณี ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น คือ กรณี SW-1 และ SW-2

(2) สภาพขอบเขตบน (Top boundary condition) ของการวิเคราะห์แบบ Transient กำหนดให้มีฝนตกที่ความเข้ม 50 มม/ชม. ( $1.39 \times 10^{-5}$  ม/วินาที) โดยค่าความชื้นนี้เป็นค่าที่ส่งผลให้มีโอกาสเกิดดินถล่มในเกาะฮ่องกงในระดับสูงมากกว่า 50% เมื่อฝนตกติดต่อกันเกิน 5 ชม. (Kay, 1998)

นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าอัตราการไหลซึมนี้มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินอิ่มน้ำ ( $K_{sat}$ ) ซึ่งจะส่งผลให้มีการเจิ่งนองของน้ำ (ponding) ที่ด้านบนของดิน การวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องกำหนดให้ผิวด้านบนของหน้าตัดดินมีค่าแรงดันน้ำได้ไม่เกินศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากในความเป็นจริงไม่สามารถมีแรงดันน้ำข้างมากบนพื้นเอียงได้

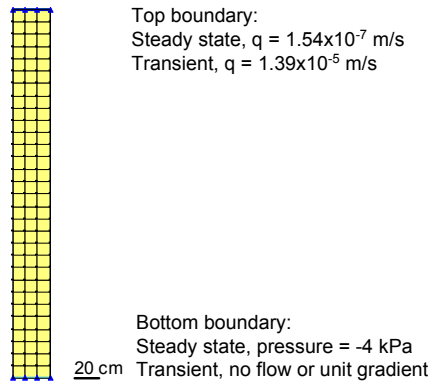
(3) สภาพขอบเขตล่าง (Bottom boundary condition) ทั้งนี้เพื่อเป็นการศึกษาความสำคัญของสภาวะการระบายน้ำของลาดดิน จึงกำหนดให้มีการวิเคราะห์สองรูปแบบ คือ สภาวะทึบน้ำ (No flow- NF) และ สภาวะระบายน้ำอิสระ (Unit gradient -UG)

ผลการวิเคราะห์การไหลซึม จะแสดงในรูปของแรงดัน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประเมินหาค่าสัดส่วนความปลอดภัยของลาดดินโดยใช้สมการของลาดดินอนันต์ (3) และใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผล (Fredlund & Rahardjo, 1993)

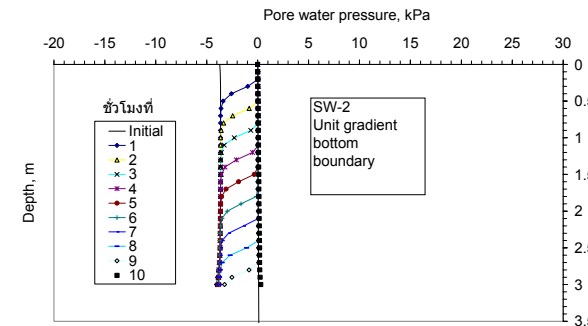
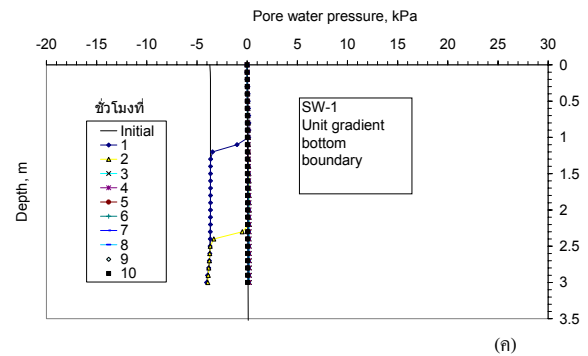
$$F = \frac{c' + (\gamma \cdot z \cos^2 \beta) \cdot \tan \phi' - u_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cdot z \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (3)$$

โดยกำหนดให้  $\phi^b$  มีค่าเท่ากับ  $\phi'$  เมื่อแรงดันน้ำ  $u_w$  มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ หรือเมื่อดินอยู่ในสภาวะอิ่มน้ำ, ค่า  $\beta$  คือ ความชัน

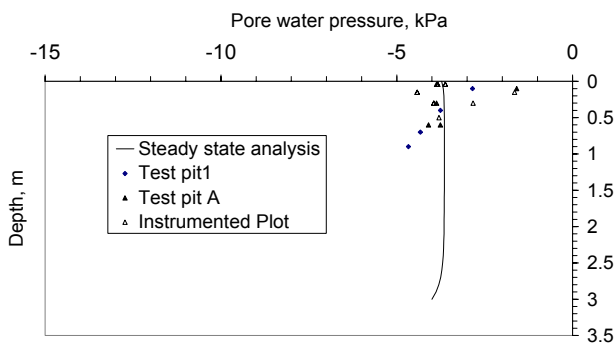
ของลาดดินซึ่งกำหนดให้มีความชัน  $30^\circ$  และ  $45^\circ$ , ค่า  $z$  คือ ความลึกของแนวการพังทลาย และ ค่า  $\gamma$  คือความหนาแน่นเปียกของดิน (สมมุติให้มีความ  $20 \text{ kN/m}^3$ )



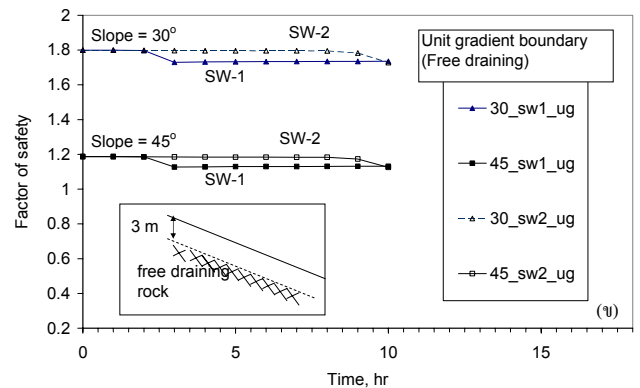
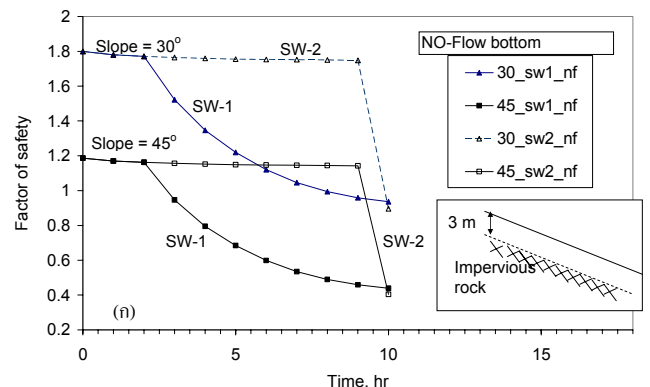
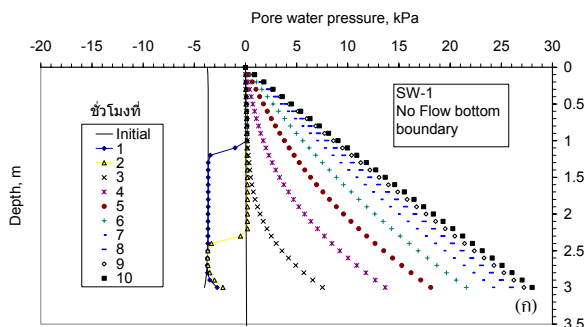
ภาพที่ 5 ลักษณะ Mesh ของหน้าตัดดินลึก 3 เมตร สำหรับการวิเคราะห์การไหลซึมแบบหนึ่งมิติ และ ลักษณะขอบเขต (boundary condition)



ภาพที่ 7 ลักษณะของแรงดันน้ำตามความลึกที่ระยะเวลาการตกของฝนต่อเนื่องด้วยความเข้ม 50 มม/ชม สำหรับสมมุติฐานแบบต่างๆ



ภาพที่ 6 ลักษณะของแรงดันน้ำตามความลึกจากการวิเคราะห์แบบสภาวะคงที่ Steady state และค่าที่ตรวจวัดได้จริงในสนาม



ภาพที่ 8 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามระยะเวลาการตกของฝน (50 มม/ชม) สำหรับลาดดินซึ่งมีและไม่มีกระบายน้ำด้านล่าง

ลักษณะของแรงดันน้ำตามความลึก ณ ช่วงเวลาที่ฝนตก ชั่วโมงต่างๆ และสัดส่วนความปลอดภัยสำหรับลาดดินอนันต์ที่มีความลึก 3 เมตร ได้แสดงไว้ในภาพที่ 7และ8 การคำนวณโดยใช้สมมุติฐานทั้ง 4 แบบ เห็นได้ว่า ลักษณะของเส้นอัตราเสี่ยงจะส่งผลอย่างมากต่อพฤติกรรมของการไหลซึม โดยสมมุติฐาน SW1

บ่งชี้ว่า น้ำที่ไหลซึมเข้าไปจะลดเสถียรภาพของลาดดินได้เร็วกว่า สมมุติฐาน SW2. ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้จากการที่ค่าความชื้น  $m_w$  ของสมมุติฐาน SW1 มีค่าน้อยกว่าสมมุติฐาน SW2 ดังได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนั้นยังเห็นได้ว่า กรณีที่ด้านล่างของลาดดินไม่สามารถระบายน้ำได้จะส่งผลให้แรงดันน้ำเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้สภาวะสถิตย์ (Hydrostatic) ซึ่งลดหน่วยแรงประสิทธิภาพและกำลังของดินอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้ในภาพที่ 7ก,ข และ 8ก. ค่าสัดส่วนความปลอดภัยในกรณีสมมุติฐาน NF มีค่าลดลงต่ำกว่า 1 ภายหลังจากฝนตกเป็นเวลา 7 ถึง 9 ชั่วโมง (ฝนตกรวม 350-450 มม). สำหรับความชัน 30° และภายหลังฝนตก 3-9 ชม. (ฝนตกรวม 150-450 มม) สำหรับความชัน 45° ลักษณะการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำจนมีค่ามากกว่าศูนย์ภายหลังฝนตกไประยะหนึ่งนี้ ยืนยันว่า การพังทลายของลาดดินจะมีลักษณะที่ชัดเจนภายหลังผ่านจุดวิกฤตใดๆ (Threshold & Triggering Effect). ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำฝนที่เสนอโดย Kay (1998)

สำหรับกรณีที่ลาดดินมีการระบายน้ำที่ดีได้ดินชั้นล่าง (ภาพที่ 8ข) ถึงแม้ว่าลาดดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $S = 100\%$ ) แล้วภายหลังฝนตกต่อเนื่องเป็นระยะ 3-10 ชั่วโมง (150-500 มม) แต่แรงดันน้ำจะไม่เพิ่มขึ้นจนเกินศูนย์หรือเข้าใกล้สภาวะสถิตย์ จึงทำให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยมีค่าสูงกว่า 1 ในกรณีที่ลาดชันน้อยกว่า 45° เสมอ สภาวะที่มีการระบายน้ำในด้านล่างของลาดจึงเป็นสภาวะที่น่าจะมีการรักษาไว้อย่างดี ผลการวิเคราะห์นี้ยังอาจเป็นตัวช่วยอธิบายได้ว่าเหตุใดลาดดินที่ความชันเท่าๆกันจึงเคลื่อนพังในบางกรณีและไม่เคลื่อนพังในบางกรณี ถึงแม้ว่าจะอยู่ในบริเวณที่รับน้ำฝนเท่าๆกัน ผลการศึกษานี้ น่าจะช่วยกระตุ้นให้เกิดความตระหนักในการบำรุงรักษาระบบการระบายน้ำในลาดดินในงานทางไม่มากนักด้วย

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้สาธิตการประยุกต์ใช้ทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำในการประเมินเสถียรภาพของลาดดินในงานทาง สำหรับการพังทลายของลาดเนื่องจากฝนตก บทความนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบพฤติกรรมของดินไม่อิ่มน้ำในด้านกำลัง การอุ้มน้ำ และการไหลซึม ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม จากผลการวิเคราะห์การไหลซึมเชิงตัวเลขและเสถียรภาพของลาดดินพบว่า การรักษาสภาพการระบายน้ำในลาดดินเป็นปัจจัยสำคัญในการบำรุงรักษาลาดดินในงานทาง และยังพบว่าการลักษณะของเส้น

อัตราลักษณะของดิน (SWCC) มีอิทธิพลต่อผลการวิเคราะห์การไหลซึมอย่างมีนัยสำคัญ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก สภาวิจัยแห่งชาติ ในโครงการวิจัยย่อย “การศึกษาสภาวะความชุ่มชื้นดินวิกฤตที่เกิดน้ำท่วม-ดินถล่มสูง ด้วยลักษณะการซึมผ่านผิวดินของน้ำ” ภายใต้โครงการวิจัยและพัฒนาาระบบบูรณาการเชิงพลวัตข้อมูลภูมิประเทศ-อุทกวิทยาเพื่อการจัดการทรัพยากรน้ำแบบพอเพียงและยั่งยืนในกลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา

#### 6. บรรณานุกรม

- [1] กรมทรัพยากรน้ำ, 2551. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการกำหนดค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (Antecedent Precipitation Index: API) เพื่อสนับสนุนการเตือนภัยล่วงหน้า น้ำท่วมฉับพลัน-แผ่นดินถล่ม.
- [2] อภินิติ โชติสังกัส และ วิชญพงศ์ พอลิละ, 2551ก. การพัฒนาระบบตรวจวัดพฤติกรรมดินถล่ม. การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 28-29 มกราคม 2551
- [3] อภินิติ โชติสังกัส และ วิชญพงศ์ พอลิละ, 2551ข. การพัฒนาเครื่องมือวัดศักยภาพแรงดันน้ำในดิน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 46 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บางเขน 29 มกราคม-1 กุมภาพันธ์ 2551
- [4] Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. New York: Wiley.
- [5] Jackson, R.D. (1972). On the calculation of hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36, 350-383.
- [6] Jotisankasa, A., Porlila, W., Sorallump, S., Mairiang W. (2007). Development of a low cost miniature tensiometer and its applications. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, Nanjing, China.
- [7] Kay, J.N. (1998). Rainfall-landslide relationship update. Proceedings of the annual seminar on slope engineering in Hong Kong, Rotterdam
- [8] Ng, C.W.W. and Shi, Q. (1998), A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes, Computers and Geotechnics, 22
- [9] Sawangsuriya, A. (2006). Stiffness-suction-moisture relationship for compacted soils. Ph.D. Thesis, The University of Wisconsin-Madison, Madison, WI.
- [10] Toll, D.G., Phoon, K.K., Cheng, Y.G. & Karthikeyan, M. (2007). The Effect of Climate on Landslides in Singapore. Proceedings of Workshop on Climate Change and Slope stability, Singapore.