

การประเมินเสถียรภาพของลาดโดยพิจารณาแรงดันน้ำและแรงดูดที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณฝน  
กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 1009 กม.42 ดอยอินทนนท์  
Evaluating Slope Stability with Respect to Pore Water Pressure and Suction Variation  
with Rainfall a Case Study of Highway No.1009, KM 42, Doi-intanon

ไกรโรจน์ มหรรณพกุล<sup>1</sup> อภินิติ โชติสังกาศ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

E-mail: <sup>1</sup> krm\_jo321@hotmail.com, <sup>2</sup> fengatj@ku.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาเสถียรภาพของลาดโดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำช่องว่างดินกับปริมาณน้ำฝน ในพื้นที่ทดสอบลาดใต้คันทางหลวงหมายเลข 1009 ช่วง กม.42 ดอยอินทนนท์ อ.จอมทอง จ.เชียงใหม่ ซึ่งได้ติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันน้ำช่องว่างดิน ชนิด KU-tensiometer ที่ระดับความลึก 0.5, 1, 2 และ 3 เมตร เพื่อประเมินแรงดันน้ำทั้งค่าบวกและค่าลบ เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำฝน งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างดินที่บดอัดขึ้นใหม่ ในด้านกำลังเฉือนโดยเครื่องมือเฉือนตรง ศึกษาเส้นโค้งอัตรลักษณะของดิน (Soil water characteristic curve) และในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ศึกษาลาดซึ่งพิบัติในช่วงเดือนกันยายน 2554 ลักษณะพื้นผิวพิบัติกำหนดขึ้นจากที่พบจริงในสนามและใช้วิธีวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back analysis) ในรูปแบบหน่วยแรงประสิทธิผล แล้วปรับค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ค่าแรงดันน้ำ (Pore water pressure coefficient,  $r_u = u/(\gamma H)$ ) ในการวิเคราะห์ พบว่าค่า  $r_u$  มีค่าประมาณ 0.45 เมื่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะแรงดันน้ำจากสมการ  $u=0.45\gamma H$  กับแรงดันน้ำในสนามในวันที่ 15 ก.ย.54 ซึ่งเป็นช่วงหลังการพิบัติเล็กน้อย พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันจึงยืนยันความน่าเชื่อถือของค่าแรงดันน้ำและกำลังเฉือนที่วัดได้ งานวิจัยในอนาคตจะได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำช่องว่างดิน และปริมาณน้ำฝนเพื่อใช้ในการเตือนภัยดินถล่ม และการออกแบบลาดดินโดยพิจารณาแรงดันน้ำที่เหมาะสมต่อไป

**คำสำคัญ:** แรงดันน้ำช่องว่างดิน, ปริมาณน้ำฝน, เสถียรภาพลาดดิน, ดอยอินทนนท์

### Abstract

This paper reports on the study of slope stability with respect to pore water pressure and suction variation with rainfall for highway no.1009, km 42, in Doi-intanon, Chiangmai. The KU-tensiometers were installed at depth of 0.5, 1, 2 and 3 metres to monitor both positive and negative pore water pressure along the slope and its variation with rainfall was discussed. Shear behavior and soil water characteristic curve of a recompacted soil collected from the sitewere also studied in the direct shear box and with tensiometers. Stability analysis was also performed for a failed slope based on observed failure surface and shear

strength using the effective stress analysis in order to determine the value of pore water pressure at failure. In this regards, the pore water coefficient,  $r_u = u/(\gamma H)$  was varied in the analysis until it was found that for Factor of Safety to be 1, the  $r_u$  value was about 0.45. This value of pore water pressure agrees reasonably well with the measurement of pore water pressure shortly after the failure indicating the plausibility of study results. Future studies will include investigating the way to predict pore water pressure variation based on rainfall, the aspect which could be used for landslide early warning and to improve slope stabilization design.

**Keywords:** Pore-water pressure, Rainfall, Slope stability, Doi-intanon

### 1. บทนำ

แรงดันน้ำช่องว่างในดินนับเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด เนื่องจากในประเทศไทยดินถล่มส่วนใหญ่เกิดจากปริมาณน้ำฝนที่มากผิดปกติ ซึ่งทำให้แรงดันน้ำช่องว่างในดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุและตัวแปรสำคัญของการพิบัติของลาด ในปัจจุบันการศึกษาความสัมพันธ์ของเรื่องนี้ยังมีน้อย โดยเฉพาะการศึกษาปริมาณน้ำฝน การไหลซึม Infiltration ซึ่งเกี่ยวข้องกับสมบัติของดินในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ในสภาวะฝนตก

บทความนี้เสนอผลการตรวจพฤติกรรมแรงดันน้ำช่องว่างดินและปริมาณน้ำฝนราย 15 นาที รวมถึงสมบัติด้านกำลังเฉือนและเส้นอัตราลักษณะของดินในสภาวะไม่อิ่มตัว และการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินซึ่งพิบัติจริงในพื้นที่ศึกษา บริเวณทางหลวง หมายเลข 1009 กม.42 ดอยอินทนนท์เป็นงานศึกษาต่อเนื่องจากงานวิจัยโดย อภินิติ และคณะ [1,2] ซึ่งได้เสนอผลการศึกษาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของลาดดินในพื้นที่ซึ่งใช้ระบบคลุมดินชนิดต่างๆ จำนวน 5 แปลงทดสอบ อาทิ ฝ้ายห่มดิน จีโอเซลล์ ดินเหนียว ฯลฯ

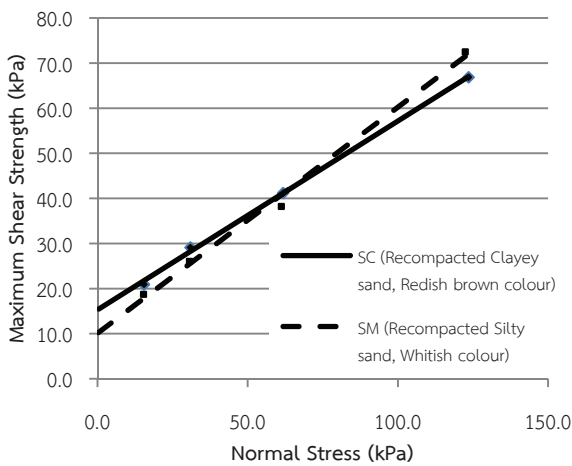




### 3. การทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์

#### 3.1 กำลังเฉือนของดินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบอิ่มตัวด้วยน้ำใช้วิธีการทดสอบแบบ multistage-shearing direct shear tests ที่ค่า normal stresses 4 ระดับได้แก่ 15.5, 31, 62 and 124 kPa และใช้อัตรา shearing rate of 0.05 mm/min ซึ่งจากผลทดลองช่วง Consolidation พิจารณาตามทฤษฎีของ Gibson & Henkel (1954) แล้วจัดเป็น Drain test และค่าพารามิเตอร์ที่ได้เป็นแบบ Effective stress แสดงผลการทดสอบพล็อตค่า Maximum Shear Strength และ Normal effective stress ของแต่ละ stage ดังในรูปที่ 8 และสรุปค่า Effective angle of friction,  $\phi'$  และ ค่า Effective cohesion,  $c'$  รวมถึงค่า Void ratio และสมบัติอื่นๆดังตารางที่ 2



รูปที่ 8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบอิ่มตัวด้วยน้ำ

ตารางที่ 2 สรุปคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ใช้ในการทดสอบ

| Sample | Description               | Liquid Limit, % | Plastic Limit, % | Void ratio | Effective cohesion, $c'$ kPa | Effective angle of friction, $\phi'$ , Degree |
|--------|---------------------------|-----------------|------------------|------------|------------------------------|---|
| SC     | Clayey sand, Redish brown | 30.2            | 20.1             | 0.616      | 15.3                         | 22.7  |
| SM     | Silty sand, Whitish       | -               | -                | 0.627      | 10.1                         | 26.7  |

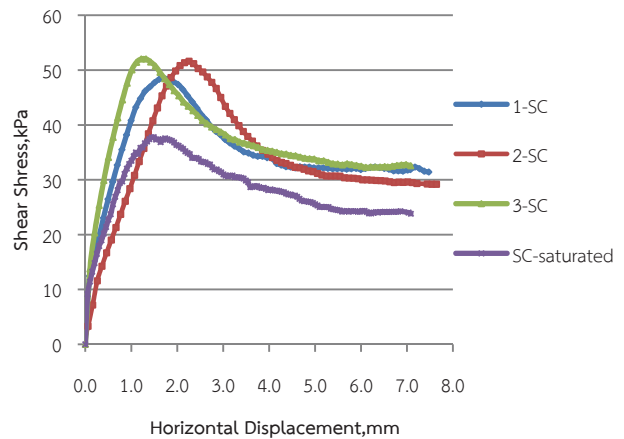
#### 3.2 กำลังเฉือนของดินในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

การทดสอบกำลังเฉือนของดินในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ใช้การทดสอบแบบ singlestage-shearing direct shear tests แบบวัดแรงดูดโดย KU-Tensiometer พัฒนาโดย Jotisankasa&Mairainq[7] โดยใช้อัตราการเฉือน shearing rate of 0.10 mm/min แบ่งการทดสอบที่ความชื้นและแรงดูดต่างๆดังตารางที่ 3

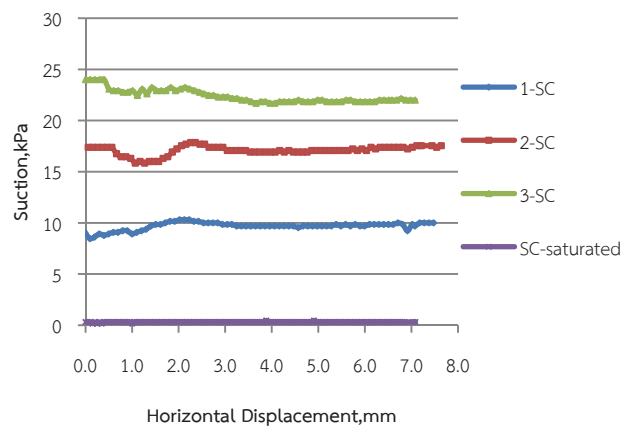
ตารางที่ 3 คุณสมบัติของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในสภาวะเริ่มต้นก่อนการทดสอบ

| Test number | Sr(%) | w(%)  | e     | Normal Stress (kPa) |
|-------------|-------|-------|-------|---------------------|
| 1-SC        | 56.58 | 13.79 | 0.659 | 31                  |
| 2-SC        | 53.32 | 12.44 | 0.634 | 31                  |
| 3-SC        | 50.98 | 11.86 | 0.632 | 31                  |

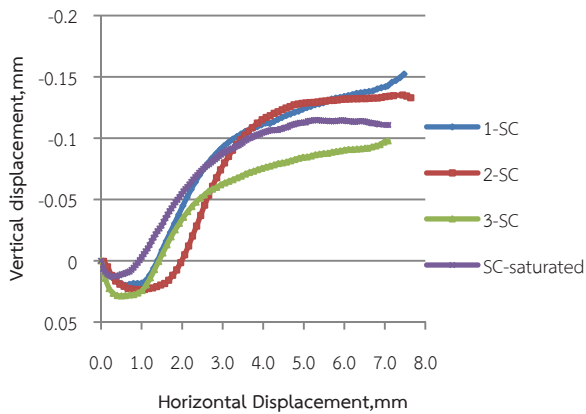
ผลการทดสอบกำลังเฉือนของดินในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำกระทำเฉพาะที่ Normal Stress 31 kPa เท่านั้น ซึ่งเป็นน้ำหนักกดทับในช่วงของแนวการพิบัติของดินดังตารางที่ 3 จากผลการทดสอบในรูปที่ 9 และ 10 พบว่า เมื่อดินมีความชื้นน้อยลง หรือค่า Suction สูงขึ้นจากศูนย์ (อิ่มตัว) เป็น 10 kPa ทำให้ค่า Maximum Shear Stress สูงขึ้นถึงประมาณ 40 % แต่เมื่อค่า Suction สูงขึ้นจาก 10-23 kPa พบว่าค่า Maximum Shear Stress สูงขึ้นกว่าเดิมไม่มากและมีค่าในช่วง 48-52 kPa และพบว่าลักษณะ Stress & horizontal displacement curve ของดินไม่อิ่มตัวมีลักษณะ Strain-softening นั่นคือกำลังเฉือนลดลงหลังจากถึงค่าสูงสุด (Maximum or peak shear stress) ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของดินไม่อิ่มตัว



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ของ Shear Stress กับ Horizontal Displacement



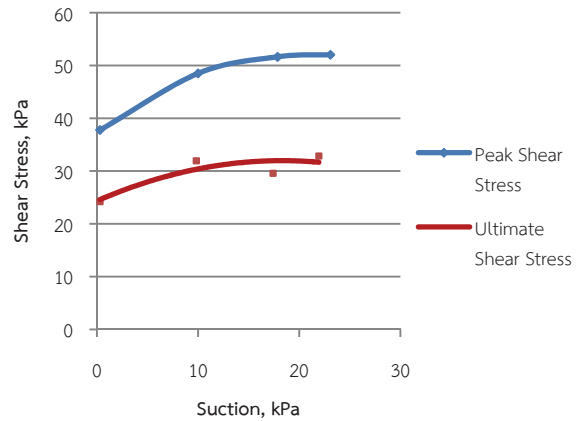
รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ของ Suction กับ Horizontal Displacement



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ ของ Vertical กับ Horizontal Displacement

เช่นเดียวกัน จากรูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ของ Vertical กับ Horizontal Displacement พบว่า ดินในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ มีลักษณะของการพองตัวเมื่อเฉือน (Dilation) เนื่องจากแรงดูด Suction ยึดเม็ดดินไว้ด้วยกัน อย่างไรก็ตามดินทั้งสถานะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว (ค่า Suction อยู่ในช่วง 0-25 kPa) มีลักษณะพฤติกรรมของการพองตัวระหว่างเฉือนคล้ายคลึงกันหมด

เมื่อนำค่า Peak Shear Stress และ Ultimate Shear Stress ของแต่ละตัวอย่างมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ ของ Shear Stress กับ Suction ที่ค่า Normal stress คงที่ เท่ากับ 31 kPa จะได้ดังรูปที่ 12 ซึ่งพบว่ามีลักษณะ Non-linear สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ในอดีต อาทิ [7] และหากพิจารณาค่ามุมแรงเฉือนเนื่องจากแรงดูด  $\phi^b$  ตามทฤษฎีของ Fredlund & Rahardjo [8] ซึ่งเฉลี่ยจากความชันของกราฟ Peak Shear Stress จะได้ค่า  $\phi^b_{peak} = 32.2$  องศา และจากความชันของกราฟ Ultimate Shear Stress ได้ค่า  $\phi^b_{ult} = 18.5$  องศา

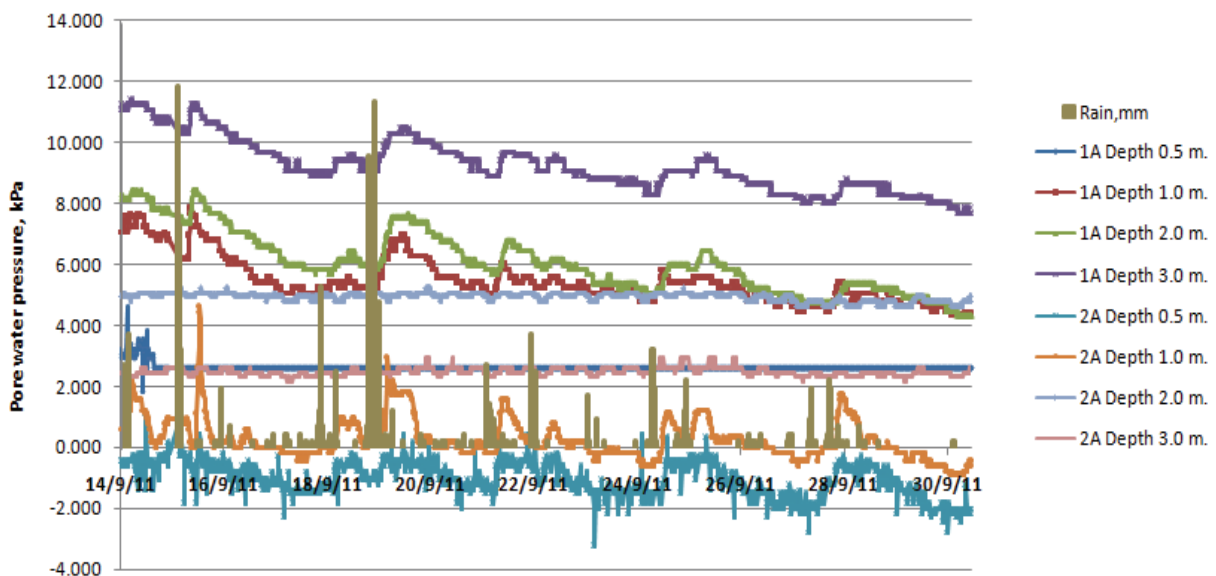


รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ ของ Shear Stress กับ Suction

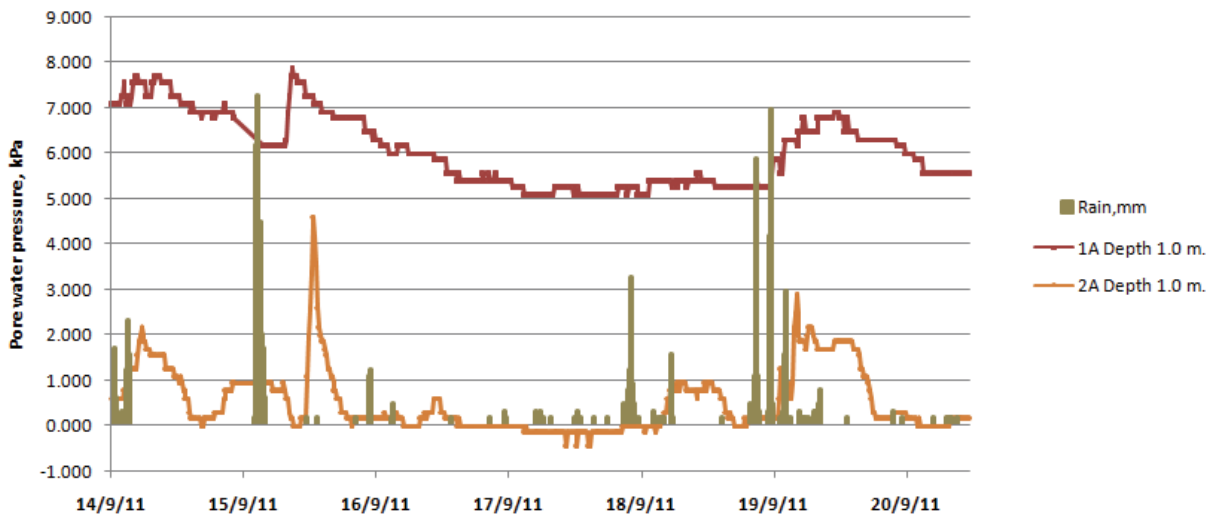
จึงเห็นได้ว่า  $\phi^b_{ult}$  มีค่าน้อยกว่า  $\phi^b_{peak}$  ค่อนข้างมาก และ ค่า Ultimate Shear Stress อยู่ในช่วงประมาณ 25-32 kPa ซึ่งแตกต่างกันไม่มากนักสำหรับดินที่ค่า Suction ในช่วง 0-23 kPa แสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมของดินไม่อิ่มตัว เมื่อถูกแรงเฉือนกระทำจนมีการเคลื่อนตัวเฉือนเลยจุด Peak ไปแล้ว แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลจะมีค่าใกล้เคียงกันโดยไม่ขึ้นกับ ค่า Suction มากนัก นั่นคือ แรงดันน้ำด้านลบของดิน ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงในสถานะ Residual เท่ากับในสถานะ Peak

#### 4. ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันน้ำในช่องว่างดิน

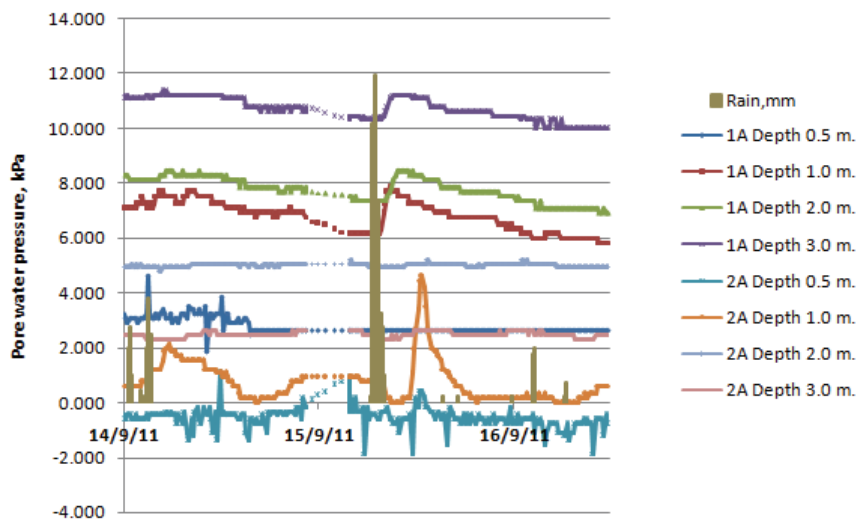
การศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันน้ำในช่องว่างดินจากการเก็บข้อมูลของ KU-Tensiometer ที่ระดับความลึก 0.5, 1, 2 และ 3 เมตรทำให้สามารถทราบแรงดันน้ำในช่องว่างทั้งค่าบวกและค่าลบ ซึ่งผลการตรวจนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝน ดังรูปที่ 13 สำหรับในบทความนี้จะแสดงค่าในตำแหน่ง 1A และ 2A เพราะเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดการพังทลาย (ดูรูปที่ 18)



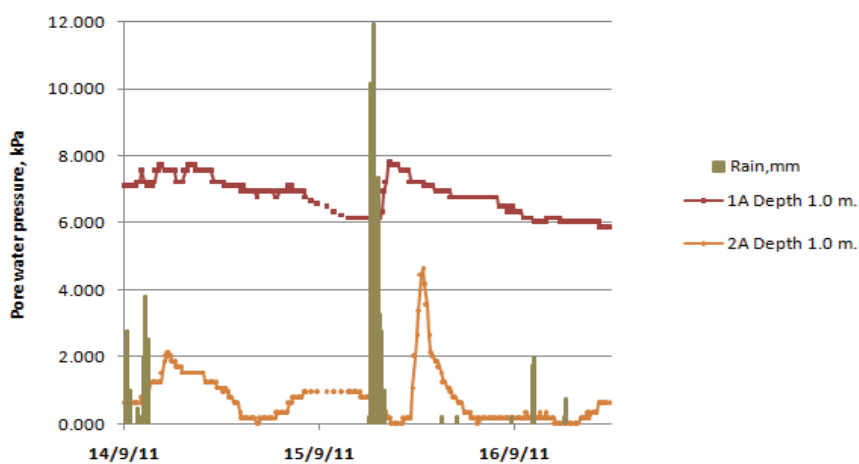
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนราย 15 นาที กับแรงดันน้ำที่ตรวจวัดในตำแหน่ง 1A และ 2A ช่วงเวลา 14/9/11 ถึง 30/9/11



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนราย 15 นาที กับแรงดันน้ำที่ตรวจวัดในตำแหน่ง 1A และ 2A เปรียบเทียบที่ระดับความลึก 1 เมตร



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนราย 15 นาที กับแรงดันน้ำที่ตรวจวัดบริเวณของแนว 1A และ 2A ในวันที่มีปริมาณน้ำฝนมากที่สุด



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนราย 15 นาที กับแรงดันน้ำที่ตรวจวัดบริเวณของแนว 1A และ 2A ในวันที่มีปริมาณน้ำฝนมากที่สุดที่ระดับความลึก 1 เมตร

จากรูปที่ 13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนราย 15 นาทีกับแรงดันน้ำที่เก็บข้อมูลทุกๆ 15 นาที เช่นกัน จากการตรวจวัดช่วงเวลา 14/9/11 ถึง 30/9/11 เมื่อพิจารณาเฉพาะที่ความลึก 1 เมตร ของตำแหน่ง 1A และ 2A ดังรูปที่ 14 จะเห็นถึงความสัมพันธ์ของทั้งสองตำแหน่งที่มีแนวโน้มเหมือนกันคือ เมื่อฝนตกลงมาในปริมาณที่มากจะส่งผลกระทบต่อแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นแต่ทั้งนี้จะไม่ได้เพิ่มแบบทันทีทันใด แต่ค่อยๆเพิ่มภายในระยะเวลาประมาณ 2-4 ชั่วโมง ฉะนั้นเมื่อขยายกราฟดูในช่วงที่ฝนตกหนักสุดคือวันที่ 15/9/11 ดังรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณน้ำฝนที่ตกต่อเนื่อง และสูงกว่า 10 mm/15 min จนทำให้มีแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นทุกระดับความลึก

จากรูปที่ 16 เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะระดับความลึกที่ 1 เมตร เห็นได้ชัดเจนว่าค่าแรงดันน้ำ ในวันที่ 15/9/11 ของตำแหน่ง 2A เกิดผลกระทบจากน้ำฝนช้ากว่า 1A ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากค่าความชื้นน้ำที่แตกต่างกันของดินที่วางตัวเป็นชั้นๆ (ดังรูปที่ 3) ซึ่งจากข้อมูลการพิบัติซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่ง 1A อาจเป็นไปได้ว่าที่ตำแหน่ง 1A มีปฏิกิริยาต่อปริมาณน้ำฝนที่เร็วกว่า 2A หรือมีชั้นที่บ่งชี้ว่าวางตัวอยู่ใต้ตำแหน่ง 1A ทำให้ไม่สามารถระบายลงไปได้ด้านล่างได้ทัน

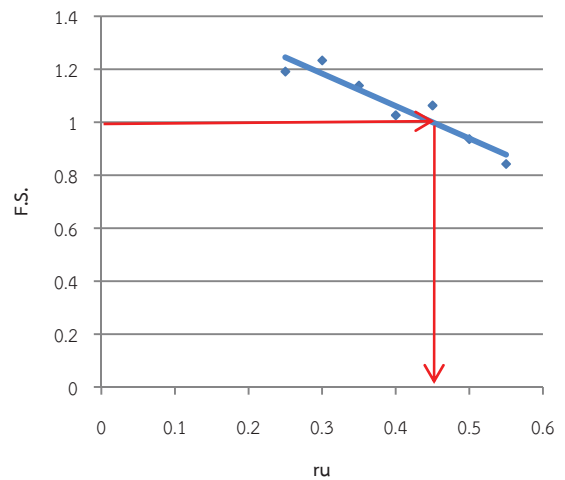
### 5. การวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากงานวิจัยของ อภินิติและคณะ [1] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันน้ำช่องว่างดิน ( $r_u = u/(\gamma H)$ ) มากที่สุดที่ตรวจวัดได้ในช่วงปี 2554 มีค่าประมาณ 0.4-0.5 ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) จึงได้พิจารณาใช้ค่า  $r_u = 0.55$  ในช่วงที่มีการพิบัติ และคำนวณได้เวลาที่ดินมีค่า  $c' = 10$  kPa และ  $\phi' = 40$  องศา

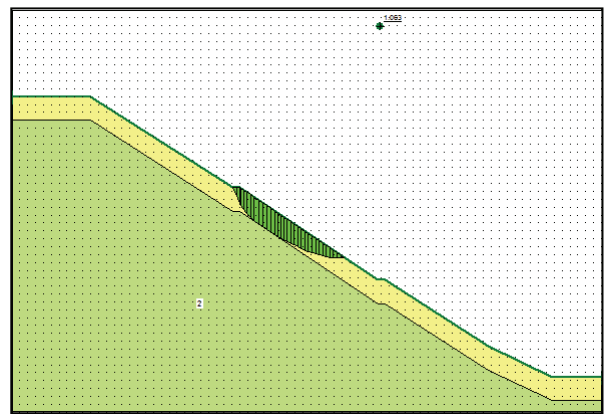
ในงานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบคุณสมบัติของดินที่เก็บจากบริเวณการพิบัติ และนำไปดัดใหม่ในห้องปฏิบัติการได้อธิบายมาแล้วเพื่อเปรียบเทียบผลการ Back analysis กับการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 2 ข้างต้นซึ่งมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมาก ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจึงเลือกใช้ค่าคุณสมบัติของดินดังตารางที่ 4 ซึ่งเป็นวิเคราะห์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) ชนิด General Limit Equilibrium (Fredlund and Krahn, [9]) และกำหนดให้วงของการพิบัติมีลักษณะใกล้เคียงกับการพิบัติจริงที่สังเกตพบในสนาม สำหรับการประมาณค่า  $r_u$  ที่ทำให้เกิดการพิบัติหรือสภาวะที่ Factor of Safety = 1 ใช้วิธีการแปรผันค่า  $r_u$  ต่างๆกันในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ได้ผล FS ดังสรุปในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติของดินในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

| $r_u$ | $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $c'$ (kPa) | $\phi'$ องศา | F.S.  |  |
|-------|---------------------------------|------------|--------------|-------|--|
| 0.55  | 18.00                           | 10.0       | 40.0         | 0.951 | จากวิธี Back Analysis ของ อภินิติและคณะ[1] |
| 0.55  | 16.28                           | 10.1       | 26.7         | 0.842 | วิเคราะห์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล             |
| 0.50  | 16.28                           | 10.1       | 26.7         | 0.936 |  |
| 0.45  | 16.28                           | 10.1       | 26.7         | 1.063 |  |
| 0.40  | 16.28                           | 10.1       | 26.7         | 1.026 |  |
| 0.35  | 16.28                           | 10.1       | 26.7         | 1.138 |  |
| 0.30  | 16.28                           | 10.1       | 26.7         | 1.233 |  |
| 0.25  | 16.28                           | 10.1       | 26.7         | 1.191 |  |



รูปที่ 17 การประเมินค่า  $r_u$  ที่ทำให้เกิดการพิบัติจากการวิเคราะห์เสถียรภาพ

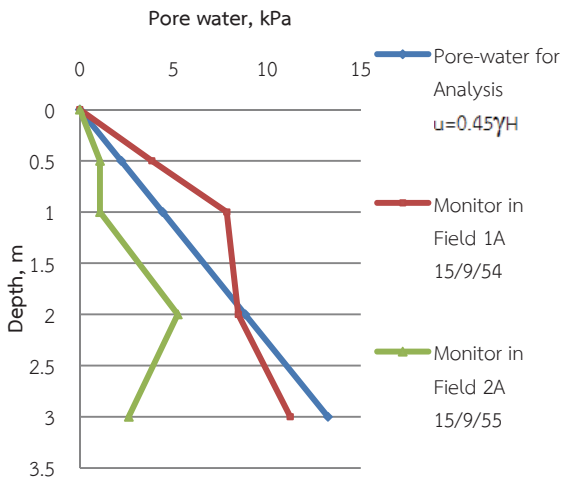


รูปที่ 18 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินสำหรับแปลง A

จากรูปที่ 17 จะได้ว่าค่า  $r_u$  ที่ทำให้เกิดการพิบัติ เท่ากับ 0.45 โดยประมาณ ซึ่งเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์กับแรงดันน้ำจะสามารถกำหนดขอบเขตของการพิบัติได้เมื่อทราบแรงดันน้ำจากเส้นขอบเขตของ  $u=0.45\gamma H$

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบจากการตรวจวัดกับการวิเคราะห์แรงดันน้ำที่ทำให้เกิดการพิบัติ

| depth | ค่าแรงดันน้ำในการพิบัติจากการวิเคราะห์ $u=0.45\gamma H$ u (kPa) | ผลจากการตรวจวัดแนว 1A ในวันที่ 15/9/54 u (kPa) | ผลจากการตรวจวัดแนว 2A ในวันที่ 15/9/55 u (kPa) |
|-------|---|--|--|
| 0     | 0   | 0  | 0  |
| 0.5   | 2.207   | 3.846  | 1.077  |
| 1     | 4.414   | 7.846  | 1.077  |
| 2     | 8.829   | 8.461  | 5.231  |
| 3     | 13.243  | 11.231   | 2.615  |



รูปที่ 19 แสดงค่าแรงดันน้ำในการพิบัติจากการวิเคราะห์ (Back analysis, FS = 1) และจากการตรวจวัดในสนาม(หลังการพิบัติประมาณ 2-3วัน)

จากรูปที่ 19 เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง แรงดันน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับกับแรงดันน้ำตรวจวัดได้จาก KU-Tensiometer ในช่วง 2-3 วันหลังจากการพิบัติ (แรงดันน้ำระหว่างการพิบัติไม่สามารถวัดได้เนื่องจากเครื่องมือขัดข้อง) พบว่ามีความใกล้เคียงกันไม่ต่างกันมาก โดยมีแนวโน้มตามระดับความลึกจากผิวดินจะค่ามากขึ้นเมื่อมีความลึกเพิ่มขึ้น โดยค่าที่วัดได้จากตำแหน่ง 1A จะมีค่ามากกว่าที่วิเคราะห์  $u=0.45\gamma H$  ฉะนั้นการพิบัติจึงเกิดใกล้กับตำแหน่ง 1A อนึ่ง สำหรับแรงดันน้ำที่ระดับ 3 เมตร ณ จุด 2A มีค่าน้อยกว่าจุดอื่นๆ คาดว่าอาจเกิดจากอิทธิพลจาก Horizontal drain และชั้นดินที่ระบายน้ำดีกว่าข้างใต้

อนึ่ง การวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ในระนาบ 2 มิติ แต่การพิบัติจริงในสนามเป็นลักษณะ 3 มิติ ซึ่งทั่วไปค่า FS แบบ 3 มิติจะมีค่ามากกว่า การวิเคราะห์ 2 มิติ จึงอาจทำให้ค่าแรงดันน้ำที่วิเคราะห์ย้อนกลับมีความคลาดเคลื่อนได้

การเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันน้ำช่องว่างดิน ( $r_u = u/(\gamma H)$ ) ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดมีความสะดวกกว่าการกำหนดค่าแรงดันน้ำเป็นจุดๆ เนื่องจากสามารถใช้เป็นค่าเฉลี่ยได้เลย และเนื่องจากสภาวะการไหลซึมในลาดที่มีระบบระบายน้ำอยู่อาจมีความไม่สม่ำเสมอ กำหนดแรงดันน้ำใต้ดินด้วย Phreatic water surface จึงอาจไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง ซึ่งมักพบกราฟแรงดันน้ำและความลึกแบบไม่เชิงเส้น (ดูตัวอย่างใน [4,5])

## 6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างดินที่บดอัดขึ้นใหม่ ในด้านกำลังเฉือนโดยเครื่องมือเฉือนตรง ศึกษาเส้นโค้งอัตรากิ่งของดิน (Soil water characteristic curve) จากทางหลวงหมายเลข 1009 กม.42 ดอยอินทนนท์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ได้ศึกษาลาดซึ่งพิบัติในช่วงเดือนกันยายน 2554 ลักษณะพื้นผิวพิบัติกำหนดขึ้นจากที่พบจริงในสนามและใช้วิธีวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back analysis) ในรูปแบบหน่วยแรงประสิทธิผล แล้วปรับค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ค่าแรงดันน้ำ (Pore water pressure coefficient,  $r_u = u/(\gamma H)$ ) ในการวิเคราะห์ พบว่าค่า  $r_u$  มีค่าประมาณ 0.45 เมื่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับหนึ่ง เมื่อ

เปรียบเทียบลักษณะแรงดันน้ำจากสมการ  $u=0.45\gamma H$  กับแรงดันน้ำในสนามในวันที่ 15 ก.ย.54 ซึ่งเป็นช่วงหลังการพิบัติเล็กน้อย พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันจึงยืนยันความน่าเชื่อถือของค่าแรงดันน้ำและกำลังเฉือนที่วัดได้ งานวิจัยในอนาคตจะได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำช่องว่างดิน และปริมาณน้ำฝน เพื่อใช้ในการเตือนภัยดินถล่ม และการออกแบบลาดดินโดยพิจารณาแรงดันน้ำที่เหมาะสม รวมถึงการวิเคราะห์แบบ 3 มิติต่อไป

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และการสนับสนุนจากกรมทางหลวง ผู้เขียนขอขอบคุณ ดร.พงษ์จันทร์ จิราสิต และนักศึกษา จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์อำนวยความสะดวกในงานภาคสนามรวมถึงคุณนรินทร์ ทรราชชัยนันท์ และคณะนักวิจัยและนิสิตที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ทุกท่าน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อภินิติ โชติสังกาศและคณะ. 2555,เสถียรภาพและการกัดเซาะลาดดินคันทาง ทางหลวงหมายเลข 1009 กม.42 ดอยอินทนนท์ การประชุมวิชาการINTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGHWAY ENGINEERING 2012, THAILAND, (จำนวน 13 หน้า)
- [2] อภินิติ โชติสังกาศและคณะ. 2555,พฤษภาคม 9-11. พฤติกรรมการกัดเซาะและแรงดันน้ำในลาดดินคันทาง กรณีศึกษา: ทางหลวงหมายเลข 1009 กม.42 ดอยอินทนนท์ การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17, จ.อุดรธานี, (จำนวน 11 หน้า)
- [3] อภินิติโชติสังกาศและวิษณุพงศ์พอลิละ, 2551. การพัฒนาเครื่องมือวัดศักยภาพแรงดันน้ำในดิน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 46 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, จัดโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,บางเขน, 29 มกราคม-1 กุมภาพันธ์ 2551, จำนวน 8 หน้า
- [4] จิตนิมา เทพพานิช และอภินิติ โชติสังกาศ. 2554, พฤษภาคม 18-20. พฤติกรรมการไหลซึมและแรงดันน้ำในช่องว่างดินกรณีศึกษาพื้นที่ดินถล่มตำบลแม่พูลอำเภอลับแลจังหวัดอุตรดิตถ์ การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, พัทยา จ.ชลบุรี, (จำนวน 13 หน้า)
- [5] อรรถพลและตระกูลและคณะ. 2555, พฤษภาคม 9-11. พฤติกรรมแรงดันน้ำช่องว่างดินและปริมาณน้ำฝนกรณีศึกษาลาดดินคันทางเสริมแรง ทางหลวงหมายเลข 1095 จังหวัดแม่ฮ่องสอน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17, จ.อุดรธานี, (จำนวน 9 หน้า)
- [6] Gibson, R.E. & Henkel, D.J. 1954. Influence of duration of tests on "drained" strength. Geotechnique, Vol. 4, No.1
- [7] Jotisankasa, A. and Mairaing, W. 2010. Suction-monitored direct shear testing of residual soils from landslide-prone areas, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 136, No. 3, March 1, 2010.
- [8] Fredlund, D. G. &Rahardjo, H. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: Wiley.
- [9] Fredlund, D.G. &Krahn, J. 1977. Comparison of slope stability methods of analysis, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, pp. 429-439.