

## การพัฒนาาระบบตรวจวัดพฤติกรรมดินถล่ม The Development of a Landslide Monitoring System

อภิณัติ โชติสังกาต<sup>1</sup> วิษณุพงศ์ ฟอร์ดลิละ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

E-mail: fengatj@ku.ac.th

### บทคัดย่อ

การตรวจวัดพฤติกรรมดินถล่มในสนามนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งในการศึกษาวิจัยด้านดินถล่มและการเตือนภัย บทความนี้นำเสนอการพัฒนาาระบบตรวจวัดดังกล่าวขึ้นที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยประยุกต์เทคโนโลยีเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ และความรู้ด้านพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินในการวิเคราะห์ผล ระบบดังกล่าวประกอบไปด้วยเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ/แรงดูดน้ำ Piezometer/Tensiometer เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของผิวดินและที่ระดับลึก (Extensometer และ Inclinator) ทั้งนี้ได้นำเสนอตัวอย่างการวัดและวิเคราะห์ผล จากระบบที่ได้ติดตั้งในบริเวณลาดเขาใกล้เขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายก

### Abstract

The paper reports on the development of a landslide monitoring system at Kasetsart University. The system makes use of MEMs sensor technology as well as understanding of soil mechanics. The pore water pressures and suctions of the soil slope are monitored using piezometer/tensiometers. The displacements occurring within the slope are measured using extensometer and inclinometers. The prototype system has been installed on a soil slope near Tha-Dan dam in Nakhon Nayok province. Some results over a period of five months are reported in this paper.

**คำสำคัญ** Landslides, Rainfall-induced landslide, Slope stability, Tensiometer, Extensometer, Inclinator

### 1. บทนำ

ปัญหาดินถล่มซึ่งมักเกิดในช่วงฝนตกหนักในประเทศไทย นับวันจะยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น ดังเห็นได้จากข่าวการเกิดแผ่นดินถล่มขึ้นเป็นประจำเมื่อเกิดพายุฝน (รูปที่ 1). หน่วยงาน

หลายแห่งในประเทศ อาทิ กรมทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรน้ำ และ กรมพัฒนาที่ดิน ได้ทำการศึกษาเพื่อลดผลกระทบต่อชุมชนจากภัยพิบัติแผ่นดินถล่ม โดยการจัดทำแผนที่เสี่ยงภัย และระบบเตือนภัยล่วงหน้าน้ำท่วม-ดินถล่ม ([www.dmr.go.th](http://www.dmr.go.th), [www.dwr.go.th](http://www.dwr.go.th) และ [www.idd.go.th/idd/](http://www.idd.go.th/idd/))



รูปที่ 1 ร่องรอยดินถล่มบริเวณ จ.นครนายกเมื่อเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2547

ทั้งนี้ทางศูนย์วิจัยวิศวกรรม ปฐพี และฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้เน้นการวิจัยเรื่องดินถล่มโดยบูรณาการความรู้ด้านพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดิน ธรณีวิทยา ธรณีสารสนเทศ และสถิติ (วารสาร และ บรรพต, 2548, สุทธิศักดิ์และคณะ, 2550) นำมาซึ่งแผนที่เสี่ยงภัยดินถล่มและ เกณฑ์การเตือนภัยโดยใช้รูปแบบของน้ำฝน

ขั้นตอนสำคัญในการศึกษาดินถล่มคือการหาอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety) ของลาดดินใดๆที่มีโอกาสเกิดดินถล่มซึ่งจำเป็นต้องใช้ความรู้ทางปฐพีกลศาสตร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง เช่น ค่าเปอร์เซ็นต์ความอิ่มน้ำ แรงดันน้ำในช่องว่างดิน รวมถึงการเคลื่อนตัวของลาดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำฝน นั้นสามารถคาดเดาได้ยาก จึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัดค่าต่างๆเหล่านี้ในสนาม และนำไปเปรียบเทียบกับการทำนายจาก

แบบจำลองต่างๆ เพื่อให้มีความถูกต้องมากขึ้น

ระบบตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดินในสนามได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในต่างประเทศ (Angeli et al., 2000, และ Spalton et al., 1997) เพื่อใช้ในการวิจัยและการเตือนภัย ทั้งนี้ระบบดังกล่าวโดยมากจะมีราคาแพงและจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทางศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพี จึงได้มีเป้าหมายในการพัฒนาระบบดังกล่าวขึ้นใช้เองในประเทศเพื่อการศึกษาวิจัยต่อไป

## 2. การเกิดดินถล่มเมื่อฝนตก

### 2.1 แรงดันน้ำในช่องว่างดินและอัตราส่วนความปลอดภัย

การเกิดดินถล่มเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับพฤติกรรมทางกลศาสตร์และการไหลซึมของน้ำผ่านดิน โดยพิจารณาได้ว่าดินถล่มจะเกิดขึ้นเมื่อกำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าน้อยกว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริง หรือค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง (Factor of safety,  $F = \tau/\tau_{mobilised} < 1$ ) โดยทั่วไป แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นในดินในช่วงฝนตก  $u_w$  จะไปลดหน่วยแรงประสิทธิผล  $\sigma'_n = \sigma_n - u_w$  และกำลังรับแรงเฉือนของดินในที่สุด สำหรับดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะสามารถเขียนสมการของ Mohr-Coloumb ในรูปแบบหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) ได้ดังนี้

$$\tau = c' + \sigma'_n \cdot \tan \phi' \quad (1)$$

สำหรับลาดดินอนันต์ (Infinite slope) จากสมมูลของแรง จะสามารถเขียนสมการสำหรับ อัตราส่วนความปลอดภัย,  $F$  ได้ดังสมการ (2) (Gray & Sotir, 1996)

$$F = A[\tan(\phi') / \tan(\beta)] + B[(c' + c_R) / \gamma H] \quad (2.1)$$

$$A = [1 - r_u / \cos^2(\beta)] \quad (2.2)$$

$$B = [1 / \cos^2(\beta) \tan(\beta)] \quad (2.3)$$

$$r_u = [(\gamma_w / \gamma) \{1 / 1 + \tan(\beta) \tan(\theta)\}] \quad (2.4)$$

โดย

$\beta$  = องศาความชันของลาดดิน

$\phi'$  = มุมกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผล

$\theta$  = องศาของการไหลซึม (วัดเทียบกับแนวระดับ)

$H$  = ความลึกของดินจนถึงระนาบการพัง

$c'$  = ค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผลของดิน (กรณีดินเปล่าไม่มีรากพืช)

$c_R$  = ค่าความเชื่อมแน่นเนื่องจากรากพืชเสริมแรง

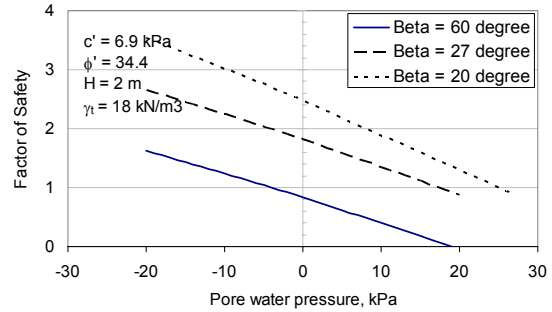
$\gamma$  = ความหนาแน่นรวมของดิน

$\gamma_w$  = ความหนาแน่นของน้ำ

$r_u = u / (\gamma \cdot H)$  = สัมประสิทธิ์ของแรงดันน้ำ ในกรณีที่มีการตรวจวัดแรงดันน้ำในสนามจะสามารถคำนวณค่า  $r_u$  นี้ได้โดยตรง

สมการสำหรับลาดดินอนันต์จะเหมาะสมในการประเมิน

เสถียรภาพของลาดดินซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวของแนวดินถล่มต่อความลึกมากกว่า 10. หน้าที่ดินมีความหนาไม่มากนัก (1-3 เมตร) และระนาบการพังขนานกับผิวดิน. โดยทั่วไปสมการลาดอนันต์จะให้ค่า  $F$  ที่ต่ำกว่าการวิเคราะห์แบบส่วนโค้งของวงกลม



รูปที่ 2. ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำในช่องว่างดิน ( $u_w$ ) และอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) สำหรับลาดดิน ที่ ความชัน (Beta) ต่างๆ

### 2.2 พฤติกรรมของลาดดินในสภาวะไม่อิ่มน้ำ

ในสภาวะที่ไม่มีฝนตก ดินบริเวณลาดเขามักจะอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated) ซึ่งแรงดันน้ำในดินจะอยู่ในสภาวะที่มีค่าเป็นลบ หรือภายใต้สภาวะของแรงดูดเมตริก (Matric suction,  $S = u_a - u_w$ ) ในสภาวะทั่วไปของลาดดิน แรงดันของอากาศในดิน  $u_a$  เท่ากับความดันบรรยากาศด้านนอก และค่าแรงดูดเมตริกจะเท่ากับค่าแรงดันน้ำด้วยลบหนึ่งนั่นเอง

น้ำที่อยู่ในสภาวะแรงดึงนี้จะส่งผลให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเลนส์ของน้ำผิวโค้ง (Menisci water) เกาะยึดเม็ดดินไว้ด้วยกัน โดยอาจพิจารณาได้ว่าค่ากำลังของดินจะเพิ่มขึ้นตามสมการ (3)

$$\tau = c' + \sigma'_n \cdot \tan \phi' + c_s \quad (3)$$

สังเกตได้ว่าในสมการที่ (3) ค่าหน่วยแรง  $\sigma'_n$  ที่ใช้วิเคราะห์จะเป็นหน่วยแรงรวม (Total stress) ในขณะที่ในสมการที่ (1) จะเป็นหน่วยแรงประสิทธิผล

ค่าความเชื่อมแน่นเนื่องจาก suction  $c_s$  จะได้จากการทดสอบเฉือนตรงชนิด MultiStage-Direct shear (KU-MDS) กับตัวอย่างดินหลายตัวอย่างที่เปอร์เซ็นต์ความอิ่มตัวต่างๆ กัน (วรากร และ บรรพต, 2548, สุทธิศักดิ์ และ คณะ, 2550) โดยค่าความเชื่อมแน่นที่ทดสอบได้นี้จะเป็นฟังก์ชันกับค่าเปอร์เซ็นต์ความอิ่มน้ำ  $c_s = f(S_r)$  โดยประมาณ หรือในกรณีที่ทราบแรงดันน้ำด้านลบ (suction) และ เปอร์เซ็นต์ความอิ่มน้ำของตัวอย่างดิน  $S_r$  จะประมาณหาค่า  $c_s$  ได้ดังสมการ (4)

$$c_s = -u_w \cdot S_r \cdot \tan \phi' \quad (4)$$

สมการที่ (4) นี้ นำไปใช้ประมาณกำลังรับแรงเฉือนที่สภาวะไม่อิ่มน้ำได้ในเบื้องต้นในกรณีที่ยังไม่มีการทดสอบ Direct shear ชนิด KU-MDS

สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินอนันต์กรณีดินไม่อิ่มน้ำ สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (2) และกำหนดให้พจน์  $r_u = 0$  และเพิ่มความเชื่อมแน่นจากแรงดูด suction เข้าไปในกำลังรับแรงเฉือน โดย สมการ (2.1) จะเป็น

$$F = \left[ \frac{\tan(\phi')}{\tan(\beta)} \right] + B \left[ \frac{c' + c_R + c_s}{\gamma H} \right] \quad (5)$$

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างของค่าสัดส่วนความปลอดภัยซึ่งมีค่าลดลงตามแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นโดยคำนวณจากสมการที่ (1)-(5) ข้อสังเกตที่น่าสนใจประการหนึ่งคือ ในกรณีที่ลาดดินมีความชันมากกว่ามุมเสียดทานประสิทธิผลของดิน  $\phi'$  ก่อนข้างมาก (Beta = 60 degree) แรงดันน้ำที่ลาดดินเริ่มพังทลาย (FS = 1) จะมีค่าน้อยกว่าศูนย์เล็กน้อย (-4 kPa) ซึ่งแสดงว่าลาดดินอาจจะยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเต็มที่ในขณะที่เกิดการพังทลาย. ในขณะที่ถ้าลาดดินมีความชันน้อยกว่ามุมเสียดทานประสิทธิผลของดินอย่างมาก (Beta = 20 degree) ลาดดินจะพังทลาย (FS = 1) ก็ต่อเมื่อแรงดันน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 25 kPa ซึ่งแสดงว่านอกจากการอิ่มตัวด้วยน้ำของดินแล้ว ยังจำเป็นต้องเกิดแรงดันน้ำในช่องว่างดินที่เพิ่มสูงขึ้นจนดินไม่สามารถต้านทานได้จึงจะเกิดการพังทลายลงมา

ค่าแรงดันน้ำบริเวณลาดดินจะขึ้นกับปัจจัยหลายประการด้วยกัน อาทิ ปริมาณน้ำฝน ลักษณะการระบายน้ำและสัมประสิทธิ์การซึมเข้าใต้ของดิน. Vaughan (1984) และ Johnson and Sitar (1990) ได้เสนอว่าลักษณะดินที่ยอมให้น้ำซึมได้น้อยลงตามความลึกหรือมีชั้นหินที่บดอัดที่ระดับตื้น หรือดินมีโพรงระบายน้ำซึ่งอุดตัน สภาวะเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดแรงดันน้ำที่มีค่าสูงได้ในลักษณะของ Perched water table. นอกจากนี้ Burland & Ridley (1996) ยังเสนอว่าการกระทบกระเทือนดินอย่างรุนแรง (Perturbation) สามารถส่งผลให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินขึ้นในดินได้ (Excess pore water pressure) การกระทบกระเทือนนี้อาจเกิดจากดินที่ถล่มจากด้านบนของลาดหรือเศษวัสดุอื่น ๆ เช่น ก้อนหินหรือขอนไม้ไหลลงมาทับบดดินด้านล่าง ลักษณะของแรงดันน้ำส่วนเกินดังกล่าวอาจก่อให้เกิดการพังทลายของดินลงมาแบบโดมิโนได้.

### 3. เครื่องมือวัดแรงดันน้ำ/แรงดูดน้ำ

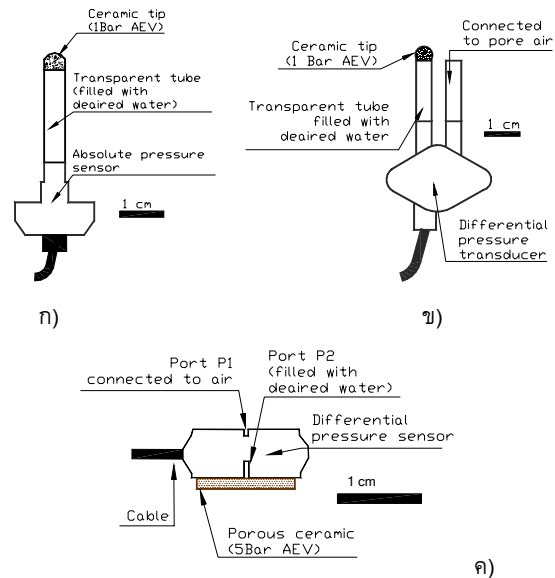
#### Piezometer/ Tensiometer

##### 3.1 หลักการทำงาน

การวัดแรงดันน้ำในช่องว่างดินสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือ Piezometer สำหรับวัดแรงดันน้ำที่มีค่าเกินศูนย์และ เครื่องมือ Tensiometer สำหรับวัดแรงดันน้ำที่มีค่าน้อยกว่าศูนย์ (หรือแรงดูด suction) หลักการทำงานของเครื่องมือทั้งสองชนิดจะมีความคล้ายคลึงกัน โดยอุปกรณ์ทั้งสองจะประกอบได้ด้วย 1) ส่วนวัดแรงดันซึ่งอาจเป็นเซ็นเซอร์วัดแรงดันหรือเกจ 2) กะเปาะน้ำซึ่งต้อง

มีน้ำเต็มช่องว่างและปราศจากอากาศ 3) หินพรุนหรือดินเผา. ในกรณีของ Tensiometer หินพรุนจะต้องเป็นชนิดที่มีความทึบน้ำ ค่อนข้างดี (High-Air Entry Pressure) เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเข้าไปก่อตัวในกะเปาะน้ำในขณะที่ทำการวัดแรงดูดทำให้การวัดคลาดเคลื่อน. อย่างไรก็ตามหินพรุนของ Piezometer ไม่จำเป็นต้องมีความทึบน้ำมากถ้าไม่จำเป็นต้องวัดแรงดันน้ำด้านลบ

วิษณุพงศ์และสุทธิศักดิ์ (2550) ได้พัฒนา Piezometer ขึ้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เพื่อใช้ในงานทางวิศวกรรมปฐพี อาทิ การวัดแรงดันของน้ำในดินใต้คันดินถมและงานขุด โดยใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ระดับจุลภาคเพื่อวัดแรงดัน. Jotisankasa et al. (2007) ได้พัฒนาต่อยอดเป็น Tensiometer โดยใช้เทคโนโลยีชนิดเดียวกันเพื่อวัดแรงดันน้ำด้านลบของดินไม่อิ่มน้ำ รูปที่ 3 แสดง KU-Tensiometer ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นซึ่งมีด้วยกันสามรูปแบบคือ 1) ชนิด Low-suction (Absolute pressure), 2) ชนิด Low-suction (Differential) และ 3) ชนิด High-suction (Differential)



รูปที่ 3. KU-Tensiometer . ก) ชนิด Low-suction (Absolute) ข) ชนิด Low-suction (Differential) ค) ชนิด High-suction (Differential)

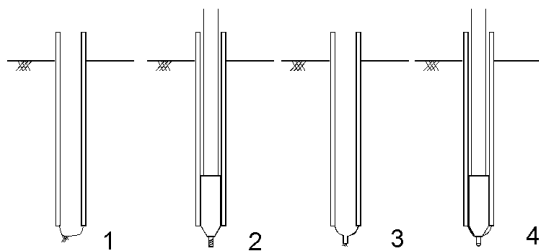
สำหรับการ Tensiometer ชนิด Low-suction นี้สามารถใช้วัดค่า suction ได้สูงสุดถึงประมาณ 80-90 kPa และไม่เหมาะสมในการนำไปวัดกับตัวอย่างดินที่มีความแห้งมากหรือมีค่า suction มากกว่า 90 kPa. ซึ่งในกรณีนี้จำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่น อาทิเช่น Tensiometer ชนิด High capacity, หรือ เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Psychrometer) เพื่อวัด suction ในดิน. รูปที่ 3ค แสดง KU-Tensiometer ชนิดที่ใช้วัดแรงดูดถึงช่วง 0-300 kPa โดยพัฒนาขึ้นจากแนวคิดของการออกแบบ Tensiometer ที่ Imperial College London (Ridley & Burland, 1993) อย่างไรก็ตาม KU-Tensiometer ชนิด High Suction นี้ยังอยู่ในขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการและยังไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในระบบวัดดินถล่มในสนามแต่อย่างใด

Tensiometer ชนิด Low-suction (Absolute) ซึ่งแสดงในรูป 3ก สามารถใช้วัดแรงดันทั้งด้านบวกและด้านลบ (-80 ถึง 12 kPa หรือ -80 ถึง 600 kPa ขึ้นกับรุ่นของเซ็นเซอร์วัดแรงดัน) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงของแรงดันน้ำในลาดดินที่มีโอกาสเกิดดินถล่ม จึงมีความเหมาะสมในการใช้วัดแรงดันน้ำในลาดดินเพื่อศึกษาพฤติกรรมในสนาม

อนึ่ง เซ็นเซอร์วัดแรงดันที่ใช้ประกอบ Tensiometer นี้เป็นอุปกรณ์มาตรฐานผลิตในต่างประเทศและได้รับการออกแบบเพื่อวัดแรงดันในช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างกว้าง (-40 ถึง 125°C) จึงทนต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสนามได้ดี และ ค่า Sensitivity ของ sensor มีค่าสูงประมาณ 0.044 Volt/kPa ทำให้ระบบที่อ่านค่ามีความละเอียดได้สูงถึงประมาณ 0.02 kPa

### 3.2 การติดตั้ง Tensiometer ในสนาม

การติดตั้ง Tensiometer เพื่อวัดแรงดันในดินนั้น จำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังเพื่อให้ผิวสัมผัสระหว่างหัวดินเผาและดินที่จะวัดมีความแนบแน่นดีพอ เพื่อให้น้ำในช่องว่างดินมีความต่อเนื่องกับน้ำในหัวดินเผาของ Tensiometer และยังคงจำเป็นต้องระวังไม่ให้น้ำฝนไหลตามปากหลุมลัดเข้าไปหาหัวเซรามิกโดยไม่ผ่านเนื้อดินจริงๆ ทำให้การวัดได้ค่าไม่ตรงตามจริง. วิธีการติดตั้ง Tensiometer ในสนามที่ระดับลึกมีขั้นตอนต่างๆ ดังรูปที่ 4



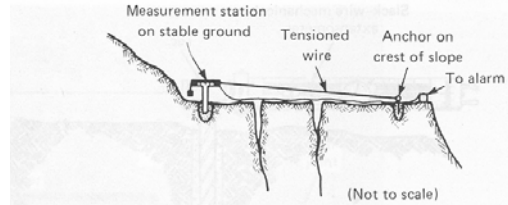
รูปที่ 4. การติดตั้ง KU-Tensiometer ในสนาม

ขั้นที่หนึ่งเป็นการเจาะหลุมด้วยสว่านมือจนถึงความลึกที่ต้องการและใส่ท่อ PVC ตามลงไปหลุม เพื่อทำหน้าที่เป็นปลอกของ Tensiometer ในขั้นที่สองจะใช้ท่อส่งดอกสว่านลงไปหลุมเพื่อสร้างรูขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4/3 เสร็จแล้วจึงส่งหัว Tensiometer ตามลงไปหลุมเพื่อให้ปลาย ceramic แนบสนิทกับหลุมอย่างพอดี เมื่อเสร็จแล้วควรใช้ Bentonite-grout (Bentonite: Cement: Water = 1:10:20) วัสดุที่ขอบหลุมดิน และใช้ซิลิโคนยาแนวเพื่อกันน้ำเข้าไปทางปลอกท่อ PVC. โดยทั่วไปแล้วหลังจากติดตั้งเสร็จจำเป็นต้องคอยให้ค่าที่อ่านได้จาก Tensiometer ถึงสภาวะสมดุลกับสภาวะความชื้นจริงในดินก่อน ซึ่งอาจใช้ระยะเวลา 2-3 ชั่วโมง

### 4. เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของผิว Extensometer

นอกจากแรงดันน้ำในดินแล้ว สัญญาณที่บ่งชี้ถึงการเริ่มพังทลายของลาดดินที่ชัดเจนที่สุดอันหนึ่งก็คือการเคลื่อนตัวของผิวดิน เครื่องมือ Extensometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดระยะห่าง

ระหว่างจุดอ้างอิงสองจุดบริเวณผิวดิน โดยทั่วไปจะวัดระยะห่างคร่อมรอยแตกซึ่งปรากฏบนลาดดินที่คาดว่ากำลังมีการเคลื่อนตัว (รูปที่ 5) Extensometer มีหลากหลายรูปแบบด้วยกันทั้งชนิดที่อ่านค่าโดยสายตาโดยใช้เทปวัดระยะ บรรทัดเหล็ก หรือไมโครมิเตอร์ และชนิดอ่านค่าแบบอัตโนมัติโดยระบบอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 5 Extensometer ชนิด crack gage, Dunicliff, J. (1993)

งานวิจัยในโครงการนี้ได้ประยุกต์ใช้ Potentiometer และระบบบอกในการวัดระยะห่างระหว่างจุดสองจุดบนลาดชัน ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 หลักการทำงานของ Extensometer คือเมื่อระยะห่างระหว่างจุดสองจุดมีการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้รอกและก้าน Potentiometer หมุนตามระยะทางนั้นๆ และทำให้ค่าความต้านทานของ Potentiometer เปลี่ยนแปลงไปตาม ซึ่งสามารถแปลงระยะการเคลื่อนที่ออกเป็นแรงดันไฟฟ้าได้. Extensometer ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึงประมาณ 2 มม. และมีช่วงอ่านค่าได้ตั้งแต่ 0-50 ซม. โดยความละเอียดและช่วงอ่านค่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอกที่ใช้



รูปที่ 6. เครื่องวัดระยะห่างระหว่างจุดที่ผิวของลาด

อย่างไรก็ตามการใช้ Extensometer เพื่อวัดพฤติกรรมของลาดดิน จะมีความเหมาะสมก็ต่อเมื่อเราทราบตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวของลาดดินอย่างชัดเจน อาทิเช่น ระหว่างรอยแตกของลาดดินหรือหินและบริเวณ scarp หรือแนวผาที่ยอดดินถล่มเดิม

### 5. เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว Inclinomometer

ในทางวิศวกรรมปฐพี Inclinomometer เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของมวลดินที่ระดับความลึกต่างๆ ในคันดินถม งานขุด และงานเขื่อนดิน โดยทั่วไปแล้วจะเป็นระบบอ่านค่าโดยใช้ตัวอ่านชนิดทอร์ปิโด ซึ่งจะต้องสไลด์ลงไปในห้อง casing ทุกครั้งที่ต้องการอ่านค่า. Inclinomometer ชนิดนี้โดยทั่วไปจะนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีความละเอียดสูง (8-25 มม. ภายในช่วง 30 ม) และมีราคาค่อนข้างสูง

การวิจัยครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้ MEMs sensor ชนิดวัดความเร่ง (Accelerometer) เพื่อใช้ในการวัดมุมเอียงในสถานะสถิตย์ (Sensitivity ~ 0.81 Sin of degree/volt) โดยได้ประกอบ sensor ชนิดนี้เข้ากับท่อ PVC ดังรูปที่ 7 และติดตั้งในหลุมซึ่งขุดไว้ด้วยสว่านมีขอบลาดดินในจุดที่คาดว่ามีการเคลื่อนตัว โดยในการติดตั้งทุกครั้งจะต้องขุดหลุมจนลึกถึงชั้นหินเพื่อให้แน่ใจว่าปลายล่างของท่อ PVC ยึดติดกับจุดที่ไม่มีการเคลื่อนตัว และยังคงเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 24 มม ผึงต่อลงไปบนชั้นหินลงไปลึกประมาณ 50 ซม. โดยจะยึดเหล็กเส้นนี้ไว้กับท่อ Inclinator ด้วยวัสดุ Grout. ค่ามุมเอียงที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถนำไปคำนวณหาระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบได้โดย ระยะราบ = sin ของมุมที่เปลี่ยนแปลง คูณ ระยะระหว่าง sensor



รูปที่ 7 KU-Inclinometer

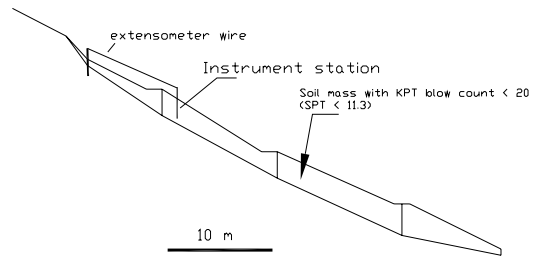
## 7. พื้นที่ติดตั้งระบบตรวจวัด จ.นครนายก

เพื่อทดสอบระบบตรวจวัดที่ได้พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการแล้ว จึงได้ทำการคัดเลือกสถานที่ติดตั้งที่เหมาะสมในสนามเพื่อทดสอบในขั้นต่อไป. งานวิจัยนี้ได้คัดเลือกลาดดินบริเวณทางขึ้นเขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายกเป็นพื้นที่ทดสอบ โดยคำนึงถึงความสะดวกในการเข้าพื้นที่และความสำคัญของลาดดินต่อการสัญจรของผู้เยี่ยมชมเขื่อน. ลาดดินในบริเวณที่ติดตั้งระบบนี้เป็นลาดดินถมที่ที่ปรับปรุงขึ้นใหม่หลังจากเกิดเหตุการณ์ดินถล่มขึ้นเมื่อเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2547 เนื่องจากเกิดพายุฝนตกหนัก ซึ่งวัดปริมาณน้ำฝนสะสมภายในช่วงสามวัน (7-9 สค. 47) ก่อนเกิดเหตุได้มากกว่า 500 มม. (ท่าด่านนิวส์, 2550)

ก่อนทำการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมของลาด ได้มีการสำรวจพื้นที่ ความลาดชัน ภาพตัด และลักษณะของชั้นดิน ในบริเวณทดสอบ โดยใช้เข็มทิศธรณี (Brunton) เทปวัดระยะ และเครื่องหยั่งชั้นดิน Kunzelstab Penetrometer ผลการสำรวจจัดแสดงในรูปที่ 8

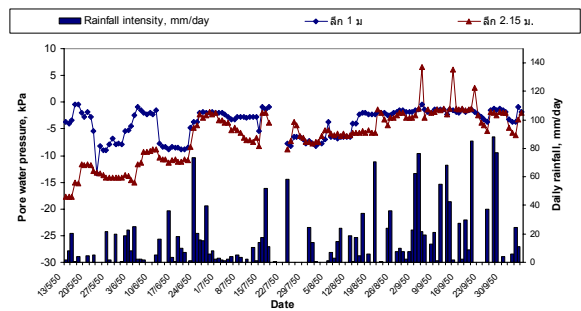
เครื่องมือที่ได้ทำการติดตั้งบริเวณลาดดินประกอบไปด้วย Tensiometer จำนวน 3 ชุด ติดตั้งที่ความลึก 1, 1.5 และ 2.15 เมตร, Inclinator จำนวน 3 จุดที่ความลึก 0.7, 1.35 และ 1.7 เมตร และ Extensometer ซึ่งติดตั้งที่บริเวณหินโผล่ใกล้ scarp (รูปที่ 8). การตรวจวัดพฤติกรรมเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2550 จนถึงปัจจุบัน โดยในช่วงแรกจะอาศัยการอ่านค่าโดยบุคลากรด้วยเครื่องอ่าน readout ทุกวันในช่วงเวลาเดียวกัน ประมาณ 8.00-9.00 น. ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือและค่าน้ำฝนรายวัน (จากโครงการ

ชลประทาน เขื่อนขุนด่านฯ) ได้แสดงในรูปที่ 9 อื่นๆ ค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ในช่วงซึ่งเกิดปัญหาทางอิเล็กทรอนิกส์จะไม่นำเสนอไว้ในรูป.

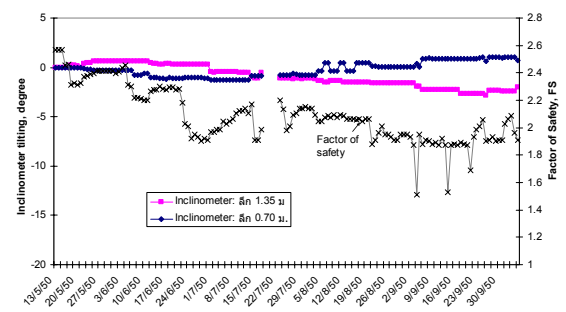


รูปที่ 8 ลักษณะของลาดดินและตำแหน่งที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่า โดยทั่วไปแล้วแรงดันน้ำในลาดดินที่มีความลึก 1-2 เมตรจะมีค่าเป็นลบอยู่ในช่วง 0 ถึง -10 kPa และลาดดินอยู่ในสภาวะไม่อิ่มน้ำเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นในช่วงที่มีฝนตกหนักติดต่อกัน ตั้งแต่วันที่ 1-4 ก.ย., 10-13 ก.ย. และ 18-20 ก.ย. โดยมีฝนตกติดต่อกันภายในสองวันมากกว่า 100 มม. ในช่วงดังกล่าวแรงดันน้ำมีค่าสูงขึ้นถึงประมาณ 7 kPa



รูปที่ 9 น้ำฝนรายวันและแรงดันน้ำในดิน



รูปที่ 10 อัตราส่วนความปลอดภัยและมุมเอียงของ Inclinator ที่ความลึก 0.70 และ 1.35 ม.

จากค่าแรงดันน้ำที่ได้ตรวจวัด สามารถนำมาคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของลาด ดังสมการ (1) ถึง (5) โดยค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนที่ใช้คำนวณได้จากการทดสอบเฉือนตรงแบบ Multistage direct shear (slow shearing) กับตัวอย่างดินคงสภาพซึ่งเก็บมาจากลาดดินที่ศึกษา ดังได้ระบุค่า  $c'$ ,  $\phi'$  ไว้ในรูปที่ 2. ค่า FS ที่คำนวณได้สำหรับลาดดินอนันต์ลึก 2

เมตร ได้ค่าดังแสดงในรูปที่ 10 โดยพล็อตเทียบกับมุมเอียงที่วัดได้จาก inclinometer ซึ่งวัดที่ระดับลึก 0.70 และ 1.35 ม. เห็นได้ว่าค่า Factor of safety มีค่าลดลงมากที่สุดถึงประมาณ 1.5 ในช่วงเดือนกันยายน ซึ่งมีฝนตกชุกดังแสดงในรูปที่ 9

สำหรับมุมเอียงซึ่งอ่านได้จาก inclinometer นั้นพบว่า เซนเซอร์ที่ความลึก 1.35 ม. บ่งชี้ว่ามีการเอียงตัวเข้าหาลาด (ค่ามุมเอียงติดลบ) ซึ่งไม่น่าเป็นไปได้ในความเป็นจริง จึงได้สรุปว่า อาจเกิดจากปัญหาด้านความชื้นซึ่งก่อให้เกิดการ drift ของค่าศูนย์ของ sensor สำหรับเซนเซอร์ที่ความลึก 0.7 ม.พบว่ามีการ drift โดยความชื้นบ้างเล็กน้อย แต่ก็มีสัญญาณของการเคลื่อนตัวด้านข้างของ slope อยู่บ้าง ( $\sim 1^\circ$ ) ในช่วงเดือนกันยายนซึ่งมีฝนตกหนัก และเกิดแรงดันน้ำด้านบนมากขึ้น

สำหรับค่าการเคลื่อนตัวจาก Extensometer พบว่าไม่มีการเคลื่อนตัวที่ชัดเจน แต่พบว่าการโก่งตัวของดินที่ฐาน Extensometer ทำให้ค่าการตรวจวัดมีความแปรปรวนในช่วงแรกของการศึกษา จึงไม่แสดงผลการตรวจวัดไว้ ณ. ที่นี้

## 8. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการพัฒนากระบวนการตรวจวัดพฤติกรรมดินถล่มโดยบูรณาการความรู้ทางธรณีวิทยาและระบบตรวจวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ ระบบต้นแบบประกอบไปด้วยเครื่องมือวัดแรงดัน/แรงดูดน้ำ Tensiometer/Piezometer เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว Extensometer และ Inclinometer รวมไปถึงกระบอกวัดน้ำฝน. ระบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินแบบต่างๆ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบส่งสัญญาณแบบไร้สาย เพื่อพัฒนาเป็นระบบเตือนภัยล่วงหน้าดินถล่มได้อีกด้วย

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ประจำปี พ.ศ. 2549. การสนับสนุนด้านสถานที่จาก โครงการเชื่อมขนด่านปราการชล กรมชลประทาน และการสนับสนุนจากนิสิตปริญญาตรี-โท วิชาปัญหาพิเศษ ธรณีวิทยาเพื่อสิ่งแวดล้อม ปี 2549-2550 ในการติดตั้ง สํารวจและทดสอบตัวอย่างดิน. ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วรากร ไม้เรียง และ ผศ.ดร. สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในโครงการวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วรากร ไม้เรียง และ บรรพต กุลสุวรรณ. 2548. สถานการณ์และปัญหาแผ่นดินถล่มในประเทศไทย Proceedings of EIT-JAPAN-AIT Joint Seminar 2005 Geo-Risk Engineering & Management, Engineering Institute of Thailand
- [2] วิษณุพงศ์ ฟอร์ดิล และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์. 2550. การศึกษา

- และพัฒนา KU Piezometer โดยการประยุกต์ใช้ MEMs Pressure sensor. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พิษณุโลก, ประเทศไทย, 2-4 พฤษภาคม 2550
- [2] สำนักงานก่อสร้าง 5 (โครงการท่าด่าน) สำนักโครงการขนาดใหญ่ กรมชลประทาน. 2550. ท่าด่านนิวส์ ฉบับรวมเล่ม., หน้า 83.
- [2] สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, วรากร ไม้เรียง และ วรากร ไม้เรียง. 2550. การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, พิษณุโลก, ประเทศไทย, 2-4 พฤษภาคม 2550.
- [3] Angeli, M.G., Pasuto A, and Silvano, S. 2000. A critical review of landslide monitoring experiences. Engineering Geology, 55: 133-147
- [4] Johnson, K.A., and Sitar, N. 1990. Hydrological conditions leading to debris-flow initiation. Canadian Geotechnical Journal, 27: 789-801
- [5] Jotisankasa, A., Porlila, W., Soralump, S., Mairiang W. (2007). Development of a low cost miniature tensiometer and its applications. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils (Unsat-Asia 2007), Nanjing, China.
- [6] Ridley, A. M. & Burland, J. B. (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction. Geotechnique 43, No. 2, 321-324.
- [7] Spalton, C.D., Frame, J.A. & Fern, M.W. 1997. Instrumentation for slopes in Hong Kong, Proceedings of the Annual Seminar on Slope Engineering in Hong Kong, Hong Kong, China, May. 2, 1997: 103-108.
- [8] Gray, D.H. and Sotir, R.B. 1996. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization, A Practical Guide for Erosion Control, John Wiley & Sons, USA
- [9] Vaughan, P.R. (1985) Pore pressures due to infiltration into partly saturated slopes. Proc. 1st International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic soils. Vol 2 Brazil.