

เสถียรภาพของลาดดินที่ปลูกหญ้าแฝกในสภาวะฝนตกจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ Stability of Soil Slope with Vetiver Grass Subjected to Rainfall from Numerical Modeling

อภินิติ โชติสังกาศ^{1*} และ สงเกียรติ ทานสัมฤทธิ์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

² มูลนิธิพลังที่ยั่งยืน บริษัท ปตท.จำกัด มหาชน กรุงเทพฯ

E-mail: ¹ fengatj@ku.ac.th, ² songkiert.p@pttplc.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาอิทธิพลจากการปลูกหญ้าแฝกบนลาดดินต่อพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำฝนสู่ลาดและเสถียรภาพของลาด โดยอาศัยทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ แบบจำลองคณิตศาสตร์ และสมบัติของดินที่มีรากหญ้าแฝกจากงานวิจัยในอดีต โดยดินที่มีรากหญ้าแฝกจะมีค่ากำลังเฉือนเพิ่มขึ้น แต่ก็อาจจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำสูงขึ้นด้วย ซึ่งช่วยเพิ่มการไหลซึมของน้ำลงสู่ดินลดการไหลบ่า และเพิ่มความชุ่มชื้นในดิน ในทางทฤษฎีแล้วนับเป็นการอนุรักษ์ดินและน้ำ แต่น้ำฝนที่ไหลซึมสู่ด้านล่างนี้อาจเพิ่มแรงดันน้ำในระดับลึก และมีส่วนลดเสถียรภาพของลาดในบางกรณี งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์การไหลซึมและแบบจำลองลิมิตอีควิลิเบรียมสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อศึกษาอิทธิพลจากรากหญ้าแฝกต่อการไหลซึมและเสถียรภาพของลาดสองชนิดในทางทฤษฎี พบว่ากรณีลาดดินธรรมชาติที่มีความชันประมาณ 26.6 องศา รากหญ้าแฝกทำให้แรงดันน้ำในโพรงดินเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่การเสริมกำลังของหญ้าแฝกช่วยให้เสถียรภาพโดยรวมของลาดมีค่าสูงขึ้น แต่ในกรณีของลาดดินที่มีความชันประมาณ 60 องศา ในทางทฤษฎีพบว่าหากรากหญ้าแฝกลงไปลึกถึง 0.8 เมตรจะสามารถนำน้ำลงไปใต้ดินที่ระดับลึกได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้แรงดันน้ำใต้ดินสูงขึ้นและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลงประมาณ 10%

คำสำคัญ: หญ้าแฝก, แรงดันน้ำช่องว่างดิน, เสถียรภาพของลาด, การไหลซึม

Abstract

This paper presents the results of study on influence of vetiver grass on infiltration behaviour and stability of slope based on unsaturated soil mechanics theory, numerical model using parameters from past studies. Since the root-reinforced soil is expected to be of higher strength as well as higher permeability, which would help to reduce runoff by providing more infiltration, thus improving the soil and water conservation. Nevertheless, this would also lead to increase in pore water pressure and possibly decrease in slope stability in some cases. In this research, finite element method was used to analyze infiltration of rain into slope and limit-equilibrium method for slope stability calculation of 2 hypothetical slopes. It was found that for natural soil slope with gradient 26°, the 2-metre vetiver grass roots appeared to increase the pore water pressure only marginally and thus the stability of the soil was improved

by reinforcement of the roots. However, for a weathered rock slope of about 60°, the 0.8m deep vetiver roots could potentially provide a pathway for water infiltration, increased the pore water pressure and thus reduced the factor of safety of the slope by about 10%.

Keywords: Vetiver, Pore-water pressure, Slope stability, Seepage

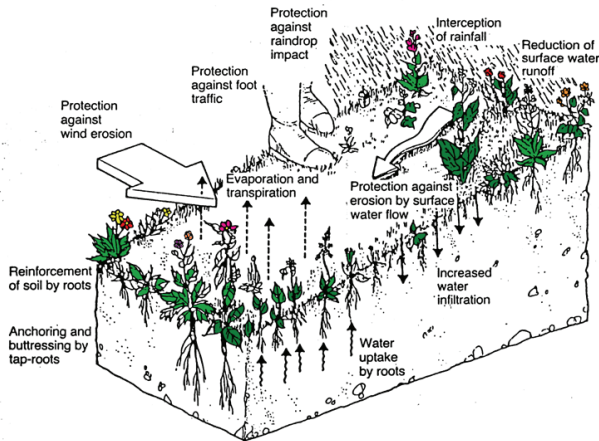
1. บทนำ

ปัญหาการชะล้างพังทลายของลาดดินและดินถล่มนับวันจะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของโลก ก่อให้เกิดความแปรปรวนของรูปแบบการตกของฝน เช่น ฝนตกหนักในช่วงเวลาสั้นๆ หรือฝนตกยาวนานผิดปกติ ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม พื้นที่เกษตรกรรม และโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ การใช้ประโยชน์ที่ดินมากขึ้นในที่สูงชันก็มีส่วนทำให้ปัญหารุนแรงมากยิ่งขึ้นเช่นกัน

การแก้ไขป้องกันปัญหาดินถล่มทางหนึ่งทำได้โดยการปลูกพืชพรรณชนิดต่างๆบนลาดร่วมกับการใช้โครงสร้างทางวิศวกรรม หรือที่เรียกว่าวิธีชีววิศวกรรม (Soil-Bioengineering/Ecological Engineering) ซึ่งสามารถแก้ไขดินถล่มระดับต้นและการชะล้างพังทลายได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนสอดคล้องกับธรรมชาติ ทั้งมีราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับการใช้โครงสร้างอื่นๆ [1-5] โดยหญ้าแฝกจัดเป็นพืชที่นิยมปลูกมากที่สุดในประเทศไทยและประเทศในเขตร้อนชื้น เนื่องจากมีระบบรากที่ลึกและแผ่กระจายลงไปในดินเสมือนกำแพงที่มีชีวิต ทั้งมีลำต้นและกอที่แน่นหนาสามารถลดแรงจากน้ำไหลบ่าได้อย่างดี ดังแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ซึ่งได้ทรงริเริ่มและสนับสนุนการวิจัยและการประยุกต์ใช้หญ้าแฝกมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 เพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำ และป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดดิน

อิทธิพลจากดินไม่ต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์หรือการไหลของน้ำฝนสู่ดินสามารถพิจารณาได้หลายด้าน (รูปที่ 1) โดยมีทั้งด้านที่อาจส่งผลลบและบวกต่อเสถียรภาพ อาทิเช่น การดักน้ำฝน (Interception) และการดูดน้ำไปใช้ของพืช (Transpiration) จะช่วยลดแรงดันน้ำในโพรงซึ่งเป็นผลดีต่อเสถียรภาพ แต่ รากพืชและความขรุขระของผิวดิน (Surface roughness) ที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้ดินมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำมากขึ้นและน้ำฝนไหลซึมสู่ด้านล่างได้มากขึ้นซึ่งอาจส่งผลในแง่ลบ [1] อย่างไรก็ตาม ทั้งอินทรีย์วัตถุ รากพืชที่ย่อยสลายไป รวมถึงกิจกรรมทางชีวภาพต่างๆ (เช่นการชอนไชของไส้เดือน มด ปลวกต่างๆ) ที่เกิดขึ้นบริเวณรากพืชก็ช่วยให้หน้าดินมีช่องว่างที่โปร่งขึ้น เปรียบเสมือนกับมีชั้นฟองน้ำที่มีความพรุนสูง (High porosity) และนำน้ำได้ดี (High permeability) ปกคลุมลาดดินอยู่ [6,7] ในแง่นี้ชั้นหน้าดินที่คล้าย

พองน้ำนี้จะช่วยลดความเร็วของน้ำไหลบ่า (Run-off) และซึบน้ำฝนไว้กับหน้าดินจึงยืดระยะเวลาก่อนที่จะเกิดน้ำไหลบ่าขึ้นภายหลังจากฝนตก นอกจากนี้ยังอาจป้องกันไม่ให้น้ำไหลซึมลึกลงไปได้ล่างได้โดยน้ำจะไหลออกด้านข้างไปก่อนที่จะไหลซึมสู่ดินชั้นล่าง จากลักษณะฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การไหลซึมในสภาวะไม่อิ่มตัว (Unsaturated permeability function) ของหน้าดิน



รูปที่ 1 อิทธิพลจากพืชพรรณต่อการไหลของน้ำที่ผิวดิน [8]

อย่างไรก็ตาม ในกรณีของหญ้าแฝกซึ่งมีระบบรากลึก และมีความสามารถเจาะทะลุชั้นดินดานได้ การนำน้ำฝนผ่านรากไปสู่ดินด้านล่างอาจส่งผลต่อเสถียรภาพได้ในบางกรณี โดยเฉพาะหากผลบวกจากหญ้าแฝกในด้านการเพิ่มกำลังเฉือนของดิน ถูกหักล้างไปโดยผลลบจากแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นบริเวณช่องว่างรอบๆหญ้าแฝก ทั้งนี้เมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม 2554 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ได้พระราชทานพระราชดำริเกี่ยวกับปัญหาดินถล่มและการใช้หญ้าแฝกกับ ดร.สุเมธ ตันติเวชกุล เลขาธิการมูลนิธิชัยพัฒนา และคณะผู้เกี่ยวข้อง โดยมีรับสั่งว่า “ในกรณีต่างๆ ไปให้ใช้ความระมัดระวังในการดำเนินงาน เพราะแม้กระทั่งหญ้าแฝกซึ่งตามหลักจะป้องกันดินพังทลายก็อาจจะเป็นตัวการให้ดินถล่มได้ เพราะรากเจาะลึกทำให้ดินแตกแยกและนำน้ำลงไปอาจจะจะเป็นเหตุให้ดินพังทลายเสียเอง” [9]

บทความนี้จึงนำเสนอผลการศึกษาอิทธิพลจากหญ้าแฝกบนลาดดินต่อพฤติกรรมของการไหลซึมของน้ำฝนสู่ลาดและเสถียรภาพของลาด โดยอาศัยทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัว แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์การไหลซึม และแบบจำลองลิมิตต์อีควิลิเบรียมสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยอาศัยสมบัติของดินที่มีรากหญ้าแฝกและดินในพื้นที่ลาดชันจากงานวิจัยในอดีต โดยเลือกวิเคราะห์ลาดดินสองลักษณะด้วยกัน 1) ลาดดินธรรมชาติมีหน้าดินปกคลุม ความชันประมาณ 26 องศา ซึ่งพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ และความชันของลาดที่มักเกิดการพิบัติระดับต้นและโคลนถล่ม, 2) ลาดดินมีความชันประมาณ 60 องศาปราศจากพืชปกคลุม ซึ่งมีกเป็นลาดหินตัดในงานวิศวกรรมต่างๆ โดยลาดทั้งสองรูปแบบจะวิเคราะห์ ทั้งกรณีที่มีการปลูกหญ้าแฝกเป็นแถวตามแนวระดับ และกรณีไม่มีการปลูกหญ้าแฝก เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการไหลซึม แรงดันน้ำ และ อัตราส่วนความปลอดภัยของลาด ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ฝนตกและปริมาณน้ำฝน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การไหลของน้ำผ่านดินในสภาวะไม่อิ่มตัว

การประเมินพฤติกรรมของการไหลซึมของน้ำฝนสู่ลาดดินอาศัยสมการพื้นฐานสำหรับการไหลของดิน หรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + Q = m_w \left[\frac{\partial u_w}{\partial t} \right] \quad (1)$$

เมื่อค่า k_x และ k_y คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแนวแกน x และ y ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันแปรผันตามค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดิน (Pore water pressure, u_w) ซึ่งมีทั้งค่าบวกและลบ, ค่า h คือ ศักย์น้ำรวม (Total hydraulic head), ค่า Q คือ ปริมาณน้ำไหลเข้าออกที่ขอบเขต (Applied boundary flux) นั่นคือ ปริมาณน้ำฝนที่ไหลซึมสู่ผิวดิน หรือปริมาณน้ำที่ระเหยหรือถูกพืชดูดไปใช้, และค่า m_w คือ ความชันของเส้นอรรถลักษณะของดิน (Soil-Water Characteristic Curve) ซึ่งคือความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นและแรงดันน้ำค่าลบในดิน

วัตถุประสงค์สำคัญในการแก้สมการที่ (1) คือ การหาค่าแรงดันน้ำสำหรับการคำนวณกำลังเฉือนของดิน และคำนวณเสถียรภาพของลาดดินนั่นเอง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) ก็จะสามารถเห็นว่า ค่าแรงดันน้ำในดินจะมีค่ามากขึ้นกับ ปริมาณน้ำฝน ฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำได้ของดิน และลักษณะเส้นอรรถลักษณะของดิน

2.2 กำลังเฉือนของดิน

สมการกำลังเฉือน (Shear strength, τ) ของดินในสภาวะที่แรงดันน้ำ (Pore water pressure) มีค่าบวกหรือลบ และมีการเสริมแรงจากรากในดิน สามารถเขียนเป็นรูปอย่างง่ายได้ดังนี้ [10]

$$\tau = c^r + c' + \sigma_n \tan \phi' - u_w \tan \phi^b \quad (2)$$

c' = ค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล (Effective cohesion) เนื่องจากความแน่นของดิน (Over-consolidation) และการเชื่อมประสานของเม็ดดิน (Cementation)

c^r = ค่าความเชื่อมแน่นเนื่องจากรากพืช (Root cohesion) แปรผันตามปริมาณของรากพืชที่ยึดเม็ดดินไว้ด้วยกันดังสมการที่ (3)

$$\sigma_n = \text{ค่าหน่วยแรงกระทำตั้งฉากกับพื้นผิว (Normal stress)}$$

ϕ' = มุมกำลังเฉือนของดิน (Angle of shearing resistance) สำหรับกรณีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดจะนิยมใช้ค่าที่สภาวะวิกฤติ (Critical state) หรือ ที่สภาวะคงค้าง (Residual strength) ขึ้นกับระดับการเคลื่อนตัว

u_w = แรงดันน้ำในช่องว่างดิน (Pore water pressure) แสดงถึงสภาวะของแรงดันน้ำในโพรงดิน หากมีค่าติดลบน้ำจะอยู่ได้สภาวะแรงดึงหรือ Tension แต่หากมีค่าบวกน้ำจะอยู่ในสภาวะแรงดัน นั่นคือมีระดับน้ำใต้ดินขึ้นสูง

ϕ^b = มุมกำลังเฉือนของดิน (Angle of shearing resistance) จากค่าแรงดันน้ำที่ติดลบ จะมีค่าไม่คงที่โดยขึ้นกับแรงดันน้ำและระดับความอิ่มตัว ในกรณีที่ดินอิ่มตัว เมื่อ $u_w > 0$, จะกำหนดให้ ϕ^b มีค่า

เท่ากับ ϕ' แต่หาก $u_w < 0$ (หรือดินไม่อิ่มตัว) จะกำหนดเป็นค่าคงที่ในช่วงค่า u_w ใดๆ

ค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดิน (Pore water pressure) จึงเป็นตัวแปรสำคัญ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามสถานะน้ำฝนและส่งผลถึงเสถียรภาพของลาด ซึ่งในการศึกษานี้ได้จากการวิเคราะห์การไหลซึมด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

สำหรับการประเมินค่าความเชื่อมั่นจากรากพืช สามารถใช้สมการที่ (3) ดังนี้ [11]

$$c^r = T_R \left[\frac{A_R}{A} \right] (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi') \quad (3)$$

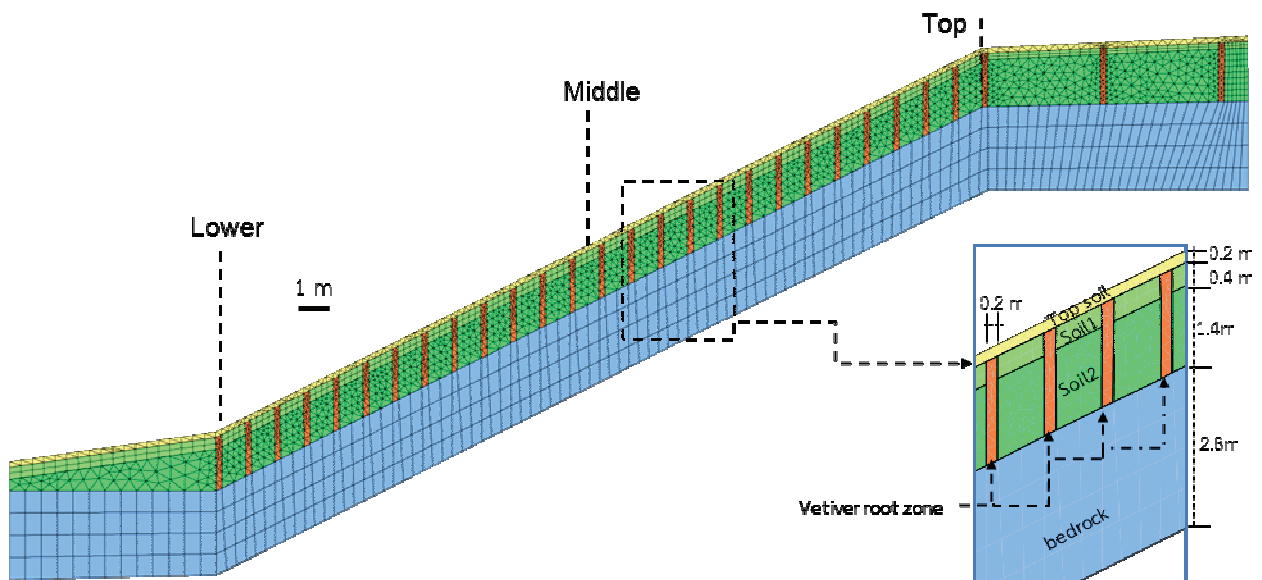
เมื่อ T_R คือค่ากำลังดึงของราก (kPa), ค่า $\frac{A_R}{A}$ คืออัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่ดินทั้งหมดบนระนาบเฉือน (root-area ratio); θ = มุมการเอียงตัวของรากในบริเวณที่เกิดการเฉือน (Shear distortion angle in the shear zone)

3. กรณีศึกษาที่ 1 ลาดดินธรรมชาติชัน 26.6 องศา

3.1 ลักษณะของลาดและชั้นดิน

กรณีศึกษาที่ 1 เป็นลาดดินธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 2 ลาดมีหน้าดิน (Top soil) ปกคลุมหนาประมาณ 0.2 ม. ความลึกจากผิวดินถึงชั้นหิน (Bedrock) ประมาณ 2 เมตร ความชันประมาณ 26.6 องศา (1:2, ดิ่ง:ราบ) ซึ่งเป็นความชันของลาดในธรรมชาติที่มักเกิดการพิบัติระดับต้นและโคลนถล่ม สำหรับกรณีนี้จำลองหญ้าแฝกบนลาด กำหนดให้มีแถวต้นแฝกห่างกันแถวละ 1 เมตร ในแนวราบ ความลึกของรากแฝกให้เท่ากับ 2 เมตร ซึ่งลึกถึงชั้นหิน ความกว้างของรากแฝกกำหนดให้เท่ากับ 0.2 ม. ความยาวของลาดตามแนวเอียงประมาณ 29 เมตร

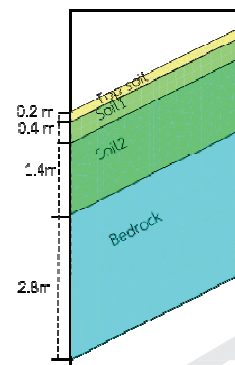
สำหรับกรณีลาดที่ไม่มีหญ้าแฝก ได้กำหนดให้มีชั้นหน้าดินหนา 0.2 เมตร ปกคลุมชั้นดิน แต่ไม่มีรากแฝกลึกต่ำลงจากหน้าดินนั้น ดังแสดงในรูปที่ 3 นอกนั้นกำหนดให้ลักษณะอื่นๆของลาดเหมือนกับกรณีลาดที่มีหญ้าแฝกทุกประการ



รูปที่ 2 ลักษณะหน้าตัดลาดดินธรรมชาติสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และ finite element mesh สำหรับวิเคราะห์การไหลซึม กรณีปลูกหญ้าแฝก

3.2 สมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ได้เลือกใช้สมบัติของดินจากงานวิจัยในอดีต [12-14] ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 และ รูปที่ 4 และ 5 สำหรับพารามิเตอร์ของหน้าดิน (Top soil) และดินจากหินผุซึ่งไม่มีรากหญ้าแฝก (Soil 1 & Soil 2) เป็นผลการทดสอบตัวอย่างดินคงสภาพเก็บจากลาดชันประมาณ 26 องศา ในบริเวณสวนผลไม้ ต.แม่พูล อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์ ซึ่งเป็นพื้นที่ซึ่งประสบภัยดินโคลนถล่มและน้ำป่าไหลหลากในช่วงเดือนพฤษภาคม 2549 ลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินดินดานและหินโคลน โดยในส่วนของค่ากำลังเฉือนของดิน Soil1 และ Soil2 ได้ทำการปรับลดค่า c' และ ϕ' ลงจากค่าที่ได้จากการทดสอบ เพื่อจำลองลักษณะดินที่ผุพังมากขึ้นจนมีกำลังลดลง เพื่อให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแสดงลักษณะการพิบัติที่ชัดเจนขึ้น



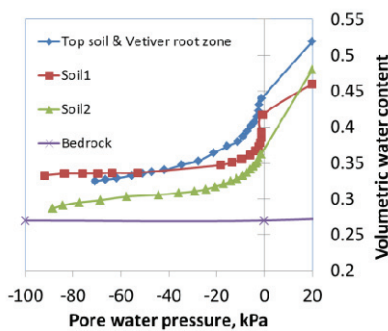
รูปที่ 3 ลักษณะชั้นดิน กรณีศึกษาที่ 1 กรณีไม่ปลูกหญ้าแฝก

สำหรับชั้นหิน (Bedrock) ในการวิเคราะห์เสถียรภาพกำหนดให้วงการพิบัติ (Failure surface) ไม่สามารถตัดผ่านชั้น Bedrock ได้ (Impenetrable) และในการวิเคราะห์การไหลซึม เลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำจาก [15] ซึ่งเป็นค่าทั่วไปสำหรับหินตะกอนที่มีรอยแตกเล็กน้อย (Slightly jointed sedimentary rock, joint opening = 0.01 cm, 1 joint/metre) และ กำหนดเส้นอัตรลักษณ์ (SWCC) จากผลทดสอบหินซอลส์ซึ่งรายงานไว้ใน [16]

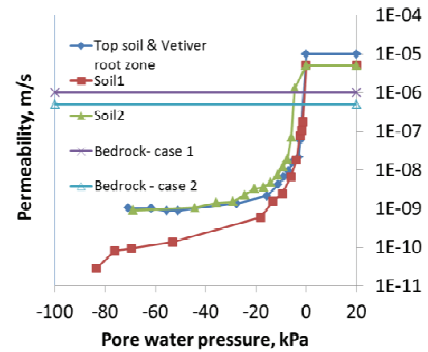
สำหรับดินบริเวณที่มีรากหญ้าแฝก (Vetiver root zone) เลือกใช้ค่าความชื้นแน่นที่เพิ่มขึ้นจากรากพืช c^r เท่ากับ 9 kPa (นั่นคือ $c' + c^r = 11$ kPa) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากงานวิจัยในอดีตโดย [4-5] สำหรับฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำและเส้นอัตรลักษณ์ (SWCC) ของดินที่มีรากหญ้าแฝก (รูปที่ 4 และ 5) ในเบื้องต้นกำหนดให้ใช้ค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์ของหน้าดิน (Top soil) ที่ทดสอบได้จากพื้นที่อุตรดิตถ์ซึ่งเป็นดินที่มีปริมาณรากอยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นในการวิเคราะห์นี้ ดินที่มีรากหญ้าอยู่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำในสถานะอิ่มน้ำ k_{sat} เท่ากับ 10^{-5} m/s ในขณะที่ดินซึ่งไม่มีรากหญ้ามามีค่า k_{sat} เท่ากับ $5 \cdot 10^{-6}$ m/s นั่นคือรากพืชช่วยให้ดินจมน้ำได้เร็วขึ้นเท่าตัว

ตารางที่ 1 สมบัติของดินในการวิเคราะห์กรณีศึกษาที่ 1 ลาดชัน 26.6 องศา

Material	γ_{sat} , kN/m ³	$c' + c^r$, kPa	ϕ'	ϕ^b	γ_{moist} , kN/m ³	ที่มา
Top soil	17	22.8	17.6	13.9	16.5	[12-14]
Soil1	18.5	2	32	27.7	18	[12-14]
Soil2	18.7	2	32	27.7	18	[12-14]
Vetiver root zone	18.5	11	32	27.7	18	[4-5, 12-14]



รูปที่ 4 เส้นอัตรลักษณ์ของดินในการวิเคราะห์

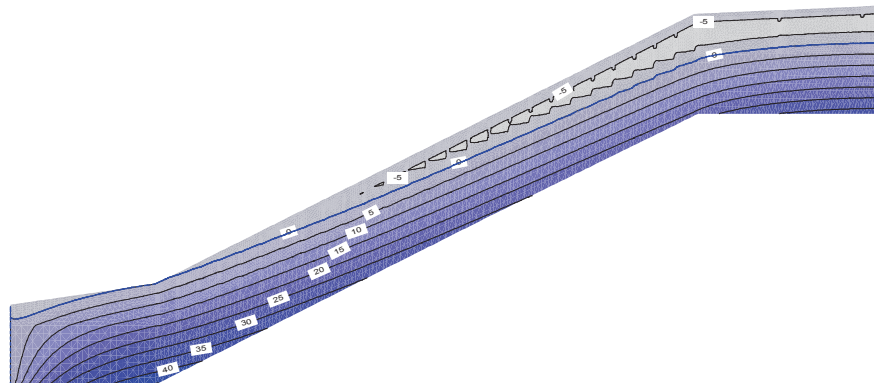


รูปที่ 5 ฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดินในการวิเคราะห์

3.3 การวิเคราะห์การไหลซึมและแรงดันน้ำ

การวิเคราะห์การไหลซึมเพื่อศึกษาอิทธิพลจากน้ำฝนต่อเสถียรภาพของลาดในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม SEEP/W โดยการวิเคราะห์ที่มีสองขั้นตอนดังได้อธิบายไว้โดยละเอียดใน [13,17] คือ 1) การวิเคราะห์สถานะเริ่มต้น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบสถานะคงที่ (Steady state analysis) กำหนดให้ค่า boundary condition ที่ผิวดินด้านบนลาดมีค่าอัตราการไหลซึมเข้าเท่ากับ $1.077E-07$ m/s (300 มม./เดือน) ซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับน้ำฝนที่ตกในหนึ่งเดือนในช่วงต้นฤดูฝน และให้ใช้เงื่อนไข Potential seepage review on นั่นคือจะไม่ยอมให้น้ำใต้ดินของลาดไหลออกและยอมให้มีการน้ำไหลออกจากลาดได้ในบางส่วนของลาดหากเงื่อนไขถูกต้อง (คล้ายตาน้ำไหลออกจากลาดซึ่งเรียกว่า Seepage face) เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงความเป็นจริง

สำหรับขอบเขตฝั่งซ้ายของลาด กำหนดให้ค่า boundary condition มีค่าแรงดันน้ำเท่ากับศูนย์ สำหรับขอบเขตฝั่งด้านขวาและด้านล่างของลาดไม่กำหนด boundary condition ใดๆ (No flow) ผลการวิเคราะห์สถานะเริ่มต้นแสดงในรูปที่ 6 ในลักษณะของ contour ของแรงดันน้ำในช่องว่างดิน ระดับน้ำใต้ดินไหลออกที่ผิวหน้าดินบริเวณตีนลาด และแรงดันน้ำที่ผิวดินมีค่าติดลบมากยิ่งขึ้นตามระดับความสูงของลาด โดยมีค่าประมาณ -2 ถึง -5 kPa และพบว่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึกประมาณ 2 เมตรที่ด้านบนของลาด ลักษณะแรงดันน้ำนี้สมมติให้เป็นค่าเฉลี่ยของลาดดินช่วงต้นฤดูฝน (ซึ่งมีน้ำฝนเฉลี่ย 300 มม./เดือน) ก่อนที่จะเริ่มมีปริมาณฝนตกรุนแรงซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของลาด



รูปที่ 6 Contour ของแรงดันน้ำในช่องว่าง (kPa) ในสถานะเริ่มต้น (time= 0 hr) น้ำฝนเฉลี่ย 300 มม./เดือน ในกรณีศึกษาที่ 1

ขั้นตอนที่สองเป็นการวิเคราะห์การไหลในสภาวะแปรเปลี่ยน (Transient analysis) มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสภาวะที่มีฝนตกรุนแรง โดยอาศัยผลค่าแรงดันน้ำในรูปที่ 6 เป็นสภาวะเริ่มต้น สำหรับ boundary condition ได้กำหนดให้ผิวด้านบนของลาดมีค่าอัตราการไหลซึมเข้าเท่ากับ $1E-06$ m/s (3.6 มม./ชม. หรือ 86.4 มม./วัน) มีการไหลคงที่และต่อเนื่องเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 48 ชม. บริเวณขอบด้านซ้ายและด้านบนของ Finite element mesh กำหนดให้เป็น Seepage face ผลการคำนวณค่าแรงดันน้ำในแต่ละช่วงเวลาจะนำไปคำนวณเสถียรภาพต่อไป ทั้งนี้การคำนวณแรงดันน้ำในขั้นตอนที่สองจะวิเคราะห์ทั้งกรณีที่มีหญ้าแฝกและกรณีที่ไม่มีหญ้าแฝกเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการไหลซึมและแรงดันน้ำทั้งสองรูปแบบ

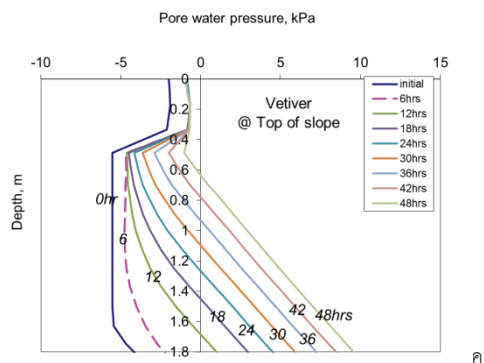
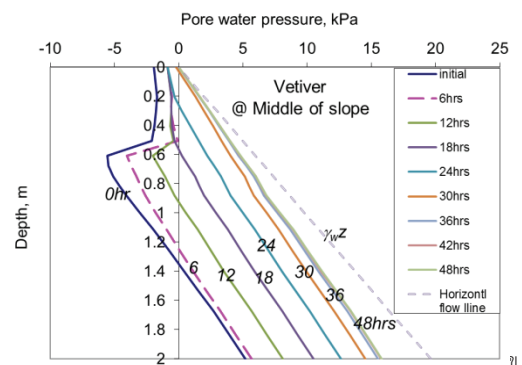
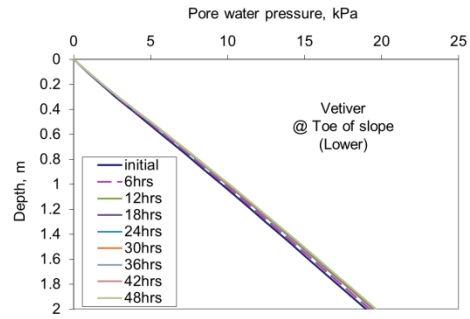
รูปที่ 7 แสดงพฤติกรรมของแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สำหรับกรณีลาดดินปลูกหญ้าแฝก โดยแสดงแรงดันน้ำบริเวณสามแนว ได้แก่ แนวล่าง (Lower) แนวกลาง (Middle) และ แนวบน (Top) (ดูรูปที่ 2) จากผลการวิเคราะห์พบว่า แรงดันน้ำบริเวณฐานของลาด (Slope toe) (รูป 7ก) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากในช่วงต้นฤดูฝน จะมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ในใกล้ผิวดินบริเวณฐานดินลาดอยู่ตลอดอยู่แล้ว ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาจึงเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำได้ไม่มากเท่าใด และปริมาณน้ำฝนจะไม่ซึมลงดินมากนักแต่จะกลายเป็นน้ำไหลบ่าออกไปแทน

สำหรับแรงดันน้ำบริเวณกึ่งกลาง (Middle) และด้านบน (Top) ของลาด (รูป 7ข-ค) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำที่ชัดเจนกว่า โดยในช่วงฝนตก 6 ชม. แรก (น้ำฝนสะสมรวมประมาณ 22 มม.) จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำมากในช่วงหน้าดินลึก 0.5 เมตรจากผิวดิน และภายหลังจากนั้นแรงดันน้ำที่ระดับลึกลงไปจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยแรงดันน้ำในช่วง 0.5 เมตรบนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และในบริเวณกึ่งกลางของลาด พบว่าระดับน้ำใต้ดินขึ้นมาถึงผิวดิน ในช่วงชั่วโมงที่ 30 (น้ำฝนสะสม ประมาณ 100 มม.) ซึ่งพบว่ากราฟแรงดันน้ำจะมีลักษณะเส้นตรง มีค่าประมาณ 74% ของกราฟแรงดันน้ำ $u = \gamma_w Z$ เมื่อ Z คือความลึกจากผิวดิน ซึ่งเป็นลักษณะการไหลซึมของน้ำในแนวราบออกจากลาดดิน [1]

บริเวณด้านบนของลาด (รูป 7ค) พบว่าที่เวลา 48 ชม. (ปริมาณน้ำฝนสะสมเท่ากับ 172 มม.) ส่งผลให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นไปอยู่ที่ประมาณ 0.6 เมตรจากผิวดิน จึงกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำใต้ดินจะเกิดขึ้นมากที่สุดบริเวณกึ่งกลาง (middle) และด้านบนของลาด (top) ในขณะที่บริเวณฐานดินลาด (Toe) แรงดันน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเนื่องจาก ในสภาวะเริ่มต้นระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงใกล้ผิวดินอยู่แล้ว

รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์การไหลซึมทั้งกรณีที่มีหญ้าแฝก (Vetiver) และกรณีไม่มีหญ้าแฝก (No vetiver) พบว่าความแตกต่างของแรงดันน้ำ ในทั้งสองกรณีมีเพียงเล็กน้อย โดยในบริเวณดินลาดและกึ่งกลางของลาด (รูปที่ 8ก และ ข) แทบจะไม่มีมีความแตกต่างของแรงดันน้ำระหว่างแปลงที่ปลูกหญ้าแฝกและไม่ปลูกหญ้าแฝกเลย แต่ในบริเวณด้านบนของลาด (รูปที่ 8ค) แปลงที่ปลูกหญ้าแฝกจะมีแรงดันน้ำน้อยกว่าแปลงที่ไม่ได้ปลูกหญ้าแฝก โดยเฉพาะบริเวณที่ลึกน้อยกว่า 0.5 เมตร แต่ในดินบริเวณที่ลึกกว่า 0.5 เมตร แปลงที่มีหญ้าแฝกมีแรงดันน้ำสูงกว่าแปลงที่ไม่มีหญ้าแฝก เนื่องจากรากหญ้าแฝกสามารถนำน้ำลงไปใต้ดินได้ลึกมากกว่า อย่างไรก็ตามสำหรับลาดดินธรรมชาติ ทั้งกรณีมีหญ้าแฝกและไม่มีหญ้าแฝก พบว่ามีค่าแรงดันน้ำ

ใกล้เคียงกันมาก แทบไม่มีนัยสำคัญในด้านเสถียรภาพของลาดดังจะได้อธิบายต่อไป

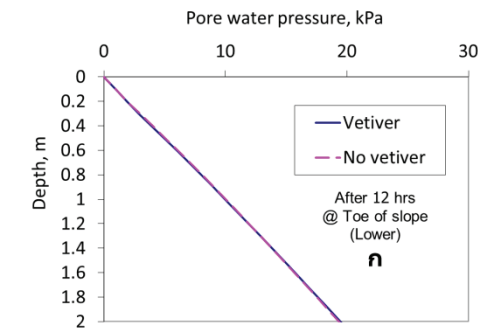


รูปที่ 7 แรงดันน้ำที่เวลาและตำแหน่งต่างๆ สำหรับกรณีลาดดินปลูกหญ้าแฝก

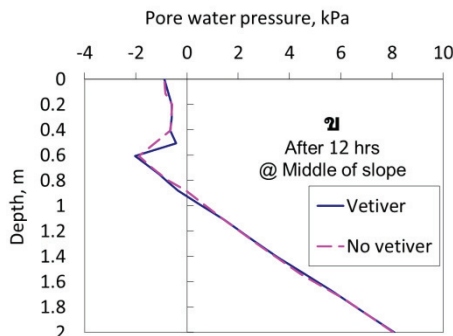
3.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

ในการศึกษานี้ได้วิเคราะห์เสถียรภาพของลาด (Slope stability analysis) ทั้งกรณีที่มีหญ้าแฝกและไม่มีหญ้าแฝก โดยอาศัยค่าแรงดันน้ำภายในลาดจากผลวิเคราะห์การไหลซึมที่แสดงไว้ในหัวข้อ 3.3 โดยใช้วิธี General Limit Equilibrium (GLE) และเป็นการวิเคราะห์แบบ Effective stress ในโปรแกรม SLOPE/W ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 9 แสดงในลักษณะของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FS) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำฝนสะสมตั้งแต่สภาวะเริ่มต้น ซึ่งเห็นได้ว่า เมื่อมีน้ำฝนตกสะสมมากขึ้น แรงดันน้ำในลาดจะมีค่าสูงขึ้นดังอธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งส่งผลให้น้ำหนักของมวลดินสูงขึ้นและค่ากำลังเฉือนของดินมีค่าลดลง และทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดมีค่าลดลงในที่สุด ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า ลาดดินที่ปลูกหญ้าแฝกจะมี ค่า FS สูงกว่าลาดที่ไม่ได้ปลูกหญ้าแฝกในทุกค่าของน้ำฝนสะสม ซึ่งสรุปได้ว่า การ

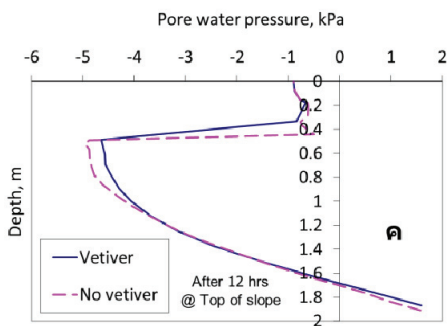
เสริมแรงของหญ้าแฝกในดิน (c^r) ส่งผลให้ลาดดินมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น ถึงแม้ว่าดินบริเวณรากหญ้าแฝกจะนำน้ำลงไปด้านล่างได้ดีขึ้น และทำให้ค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดิน (u_w) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ก็ยังไม่มากพอจะทำให้ดินขาดเสถียรภาพจนพิบัติได้ นอกจากนี้ ผลในรูปที่ 9 ยังแสดงว่าลาดดินที่ไม่ได้ปลูกหญ้าแฝกและขาดพืชยึดดิน อาจเกิดการพิบัติ ($FS = 1$) เมื่อมีน้ำฝนสะสมประมาณ 120-170 มม. โดยมีลักษณะการพิบัตินี้แสดงในรูปที่ 10 แต่ลาดดินที่มีหญ้าแฝกยังลึกถึง 2 เมตร จะยังมีความมั่นคงอยู่ ($FS > 1$) แม้จะมีน้ำฝนสะสมมากถึง 180 มม. อย่างไรก็ตาม ข้อสรุปนี้ใช้ได้เฉพาะลาดธรรมชาติที่มีความชันประมาณ 27 องศา และสมมุติฐานอื่นๆที่กำหนดไว้เท่านั้น



ก

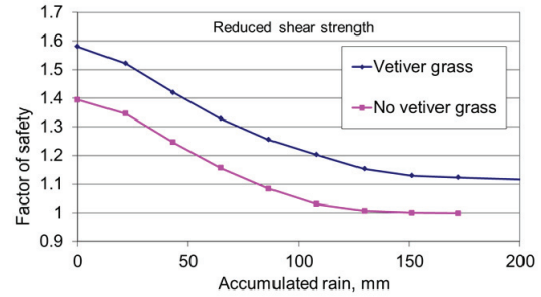


ข

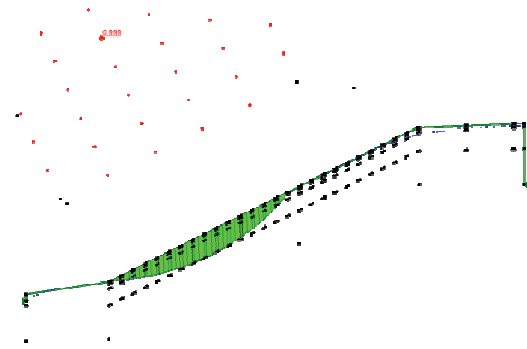


ค

รูปที่ 8 แรงดันน้ำที่เวลา 12 ชม (น้ำฝนสะสม 43 มม) สำหรับกรณีลาดดินปลูกหญ้าแฝก และไม่ปลูกหญ้าแฝก



รูปที่ 9 อัตราส่วนปลอดภัย (Factor of safety) ที่ค่าน้ำฝนสะสมต่างๆ สำหรับกรณีลาดดินมีหญ้าแฝกและไม่หญ้าแฝก ชัน 27 องศา



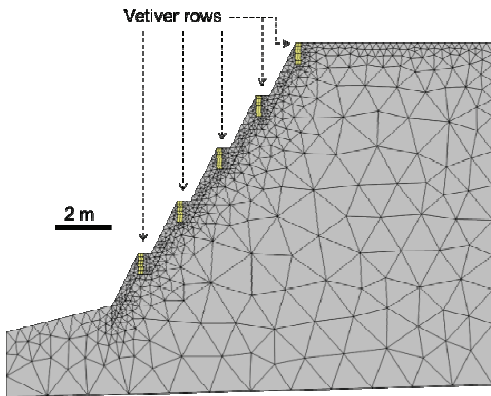
รูปที่ 10 วงการพิบัติ ($FS = 0.999$) กรณีไม่มีหญ้าแฝก เมื่อน้ำฝนสะสม 172 มม.

4. กรณีศึกษาที่ 2 ลาดหินผุชันประมาณ 60 องศา

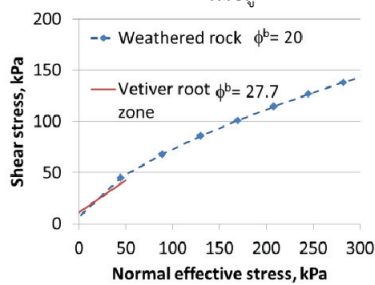
4.1 ลักษณะของลาดและสมบัติของดิน

กรณีศึกษาที่ 2 เป็นลาดหินผุความชันประมาณ 60 องศา ดังรูปที่ 11 ซึ่งพบได้ทั่วไปในงานตัดเขา มีลักษณะเป็นชั้นบันไดสูงชันละ 2 เมตร จำนวน 5 ชั้น มีแนวปลูกหญ้าแฝกบนแต่ละชั้น กำหนดให้รากหญ้าแฝกสามารถเจาะหินผุไปได้ลึกถึง 0.80 ม. โชนของรากหญ้าแฝกกว้าง 0.2 เมตรในแต่ละแถว เส้นอัตราลักษณ์ (SWCC) และสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดินบริเวณรากหญ้าแฝกและหินผุ ในการวิเคราะห์แสดงไว้ในรูปที่ 4 และ 5 (ค่า k-function ของ หินผุ คือกราฟ Bedrock - case 2) กำลังเฉือนของหญ้าแฝกและหินผุในการวิเคราะห์นี้แสดงไว้ดังรูปที่ 12 ค่ากำลังเฉือนของหญ้าแฝกที่ใช้เป็นค่าเดียวกับการวิเคราะห์กรณีที่ 1 ลาดดินธรรมชาติแต่กรณีหินผุใช้การประมาณค่ากำลังเฉือนของหินด้วยวิธีเอนพีริคัลของ Hoek & Brown failure criterion-2002 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของ หินดินเหนียวที่ไม่แข็งแรง (Weak claystone) มีลักษณะโครงสร้างแบบ Blocky/Disturbed เนื่องจากรอยแตกกร้าวและมีความไม่ต่อเนื่อง และสภาพพื้นผิวแบบ Poor หรือมี slickensided

สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ได้วิเคราะห์ทั้งกรณีที่มีหญ้าแฝก และกรณีไม่มีหญ้าแฝก ซึ่งมีลักษณะหน้าตัดลาดดินเหมือนกันทุกประการ แตกต่างเพียงกรณีไม่มีหญ้าแฝก จะมีเฉพาะหินผุในลาดเท่านั้น



รูปที่ 11 Finite element mesh สำหรับการวิเคราะห์ลาดหินตัดกรณีปลูกแฝก



รูปที่ 12 กำลังเฉือนของวัสดุในการวิเคราะห์ลาดหินตัด

4.2 การวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพ

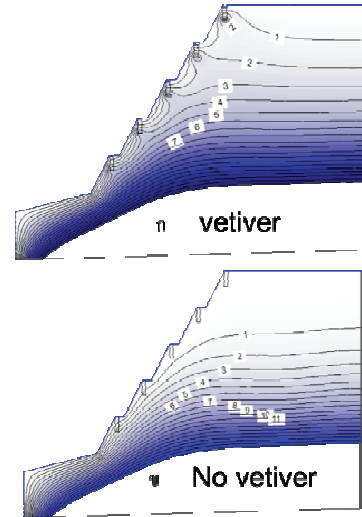
การวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดใช้ขั้นตอนเดียวกันกับการวิเคราะห์ลาดธรรมชาติในหัวข้อ 3.3 โดยในการวิเคราะห์สภาพเริ่มต้นให้มีค่าการไหลซึมเข้าที่ผิวดินด้านบนเท่ากับ $1.077E-07$ m/s (300 มม./เดือน) และให้มีค่าแรงดันน้ำที่ขอบล่างและขอบซ้ายขวาเท่ากับ -3 kPa เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ได้คำตอบที่ลู่เข้า (Convergence) และมีสภาพเริ่มต้นในขั้นแรกที่สมเหตุสมผล ดังอธิบายไว้ใน [17] รูปที่ 13 แสดงแรงดันน้ำในสภาวะเริ่มต้นที่คำนวณได้



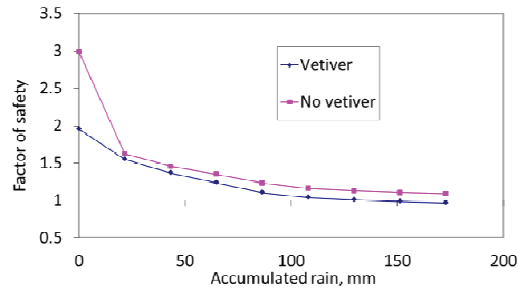
รูปที่ 13 แรงดันน้ำในสภาวะเริ่มต้น (kPa) การไหลคงที่ที่อัตรา 300 มม./เดือน

ในการวิเคราะห์ขั้นที่สอง (Transient analysis) กำหนดให้มีอัตราการไหลซึมที่ผิวดินด้านบนเท่ากับ $1E-06$ m/s (3.6 มม./ชม. หรือ 86.4 มม./วัน) และมีขอบเขตการไหลเหมือนที่กำหนดในหัวข้อ 3.3 รูปที่ 14 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์แรงดันน้ำ ในช่วงที่ฝนตกไปแล้ว 24 ชม. หรือน้ำฝนสะสม 86.4 มม. ทั้งกรณีที่มีแฝก และไม่มีแฝก ซึ่งเห็นได้ว่า

เมื่อมีการปลูกแฝกบนลาดหินผุ รากหญ้าแฝกจะนำน้ำลงไปสู่ชั้นหินเบื้องล่าง ส่งผลให้เกิดแรงดันน้ำสะสมในมวลหินมากกว่ากรณีที่มีเฉพาะมวลหินอย่างเดียวซึ่งน้ำฝนที่ตกลงมาจะไม่ถูกซึมซับมากและจะกลายเป็นน้ำไหลบ่าออกไปเป็นส่วนใหญ่



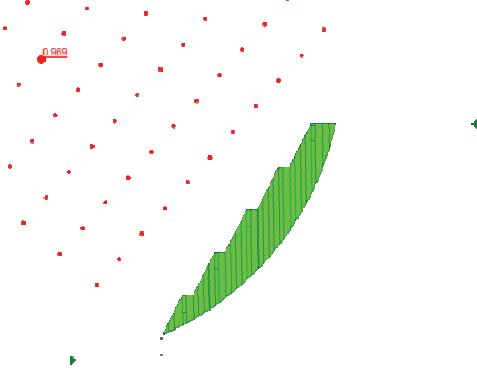
รูปที่ 14 แรงดันน้ำ (kPa) ภายหลังจากฝนตกไปแล้ว 24 ชม. น้ำฝนสะสม 86.4 มม. ทั้งกรณี ก) มีหญ้าแฝก และ ข) ไม่มีหญ้าแฝก



รูปที่ 15 อัตราส่วนปลอดภัย (Factor of safety) ที่คำนวณสะสมต่างๆ สำหรับกรณีลาดหินผุความชัน 60 องศา มีหญ้าแฝกและไม่มีหญ้าแฝก

สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดหินผุทั้งกรณีมีหญ้าแฝก และไม่มีหญ้าแฝก ที่ช่วงเวลาและปริมาณน้ำฝนต่างๆ อาศัยการวิเคราะห์แบบ Effective stress โดยใช้ค่าแรงดันน้ำจากการวิเคราะห์ที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ รูปที่ 15 แสดงผลการวิเคราะห์เป็นกราฟระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) และปริมาณน้ำฝนสะสม ซึ่งเห็นได้ว่า ลาดหินผุที่มีหญ้าแฝกมีอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่าลาดหินที่ไม่มีหญ้าแฝกในทุกช่วงเวลา โดยเมื่อน้ำฝนสะสมมากกว่า 50 มม. ค่า FS ของลาดที่มีหญ้าแฝกจะน้อยกว่า ลาดหินที่ไม่มีหญ้าแฝกอยู่ประมาณ 10% ซึ่งเป็นผลจากแรงดันน้ำที่สูงขึ้นเนื่องด้วยรากหญ้าแฝกนำน้ำลงสู่ด้านล่างได้มากกว่านั่นเอง รูปที่ 16 แสดงวงกรงการพิบัติ (FS = 0.969) สำหรับกรณีมีหญ้าแฝกเมื่อเวลาผ่านไป 48 ชม. (ฝนสะสม 172 มม.) ซึ่งพบว่าวงกรงการพิบัติอยู่ลึกต่ำกว่าปลายล่างของรากหญ้าแฝก (ซึ่งอยู่ที่ระยะ 0.8m) จึงกล่าวได้ว่าอิทธิพลจากการก้ำกักรากหญ้าแฝก (c^r) ต่อเสถียรภาพของลาดในกรณีนี้แทบไม่มีเลย เพราะวงกรงการพิบัติตัดผ่านเฉพาะชั้นหินผุเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม ข้อสมมุติฐานหลายประการในการศึกษานี้ยังต้องมีการตรวจสอบต่อไป อาทิ ความยาวที่รากหญ้าแผ่หยั่งลึกได้จริงในพื้นที่ลาดดินธรรมชาติและลาดหินผุ รวมไปถึงค่าความชื้นน้ำและกำลังเฉือนของดินที่มีรากหญ้าแผ่เสริมแรงอยู่ รวมไปถึงความเป็นไปได้ในการพิบัติของลาดแบบไม่ระบายน้ำ Undrained ซึ่งจะหาค่ากำลังเฉือนลดต่ำลงอีก และการศึกษานี้เป็นการจำลองเฉพาะเสถียรภาพของมวล แต่ไม่ได้พิจารณาการกัดเซาะจากความเร็วน้ำไหลป่า



รูปที่ 16 วงการพิบัติ (FS = 0.969) กรณีลาดหินผุมีหญ้าแผ่
เมื่อน้ำฝนสะสม 172 มม.

5. สรุป

แม้ว่ารากหญ้าแผ่จะช่วยเสริมกำลังในดินทำให้ดินมีค่ากำลังเฉือนเพิ่มขึ้น แต่ก็อาจทำให้ดินมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำสูงขึ้นด้วย ซึ่งในบางกรณีอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดเนื่องจากการไหลซึมของน้ำลงสู่ดิน ผลการจำลองการไหลซึมของน้ำฝนสะสมสู่ลาดดินและเสถียรภาพของลาด โดยโปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W พบว่ากรณีลาดดินธรรมชาติความชัน 27 องศา หญ้าแผ่ทำให้แรงดันน้ำในโพรงดินเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่การเสริมกำลังของหญ้าแผ่ช่วยให้เสถียรภาพโดยรวมของลาดมีค่าสูงขึ้น แต่ในกรณีของลาดหินผุความชันประมาณ 60 องศา พบว่าหากรากหญ้าแผ่ลงไปลึกถึง 0.8 เมตรจะสามารถนำน้ำลงไปได้ดินที่ระดับลึกได้มากขึ้น ทำให้แรงดันน้ำใต้ดินสูงขึ้นและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดลดลงประมาณ 10% เมื่อเปรียบเทียบกับลาดที่ไม่ได้ปลูกหญ้าแผ่

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม SLOPE/W และ SEEP/W สำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้ ผู้เขียนหลักขอขอบคุณการสนับสนุนทุนวิจัยจาก สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และมูลนิธิพลังที่ยั่งยืน มา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gray, D.H. and Sotir, R.B. *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization A Practical Guide for Erosion Control*. John Wiley & Sons, 1996.
- [2] ส่งเกียรติ โชนสัมฤทธิ์ “ปลูกป่าในบริเวณที่ยาก: ว่าด้วยวิธีวิศวกรรมชีวภาพในการปลูกป่า” *ฟ้าสร้างฝน คนสร้างป่า รวมเรื่องการปลูกป่าส่งท้ายปีสากลป่าไม้โลก*. สถาบันลูกโลกสีเขียว. มูลนิธิพลังที่ยั่งยืน, 2555
- [3] อภินิติ โชติสังกาศ. “การประยุกต์ใช้พืชพรรณในงานเสถียรภาพของลาด”, *การสัมมนาวิชาการเรื่อง วิศวกรรมปฐพีและฐานราก'55* จัดโดย คณะอนุกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี ในคณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.), 2555, หน้า 159-170
- [4] ดิถี แห่งเขาวนิช *การใช้หญ้าแผ่เพื่อเสริมเสถียรภาพเชิงลาดและควบคุมการชะล้างพังทลาย (เพื่อการประยุกต์ในงานวิศวกรรม) เครือข่ายหญ้าแผ่ประเทศไทย เอกสารทางวิชาการหมายเลข 2543/1, 2543*
- [5] มนตรี เดชาสกุลสม, กฤษฎา ยูวานนท์, *รายงานฉบับที่ วพ. 210 การประยุกต์ใช้หญ้าแผ่ในการแก้ไขปัญหการชะล้างพังทลายของผิวหน้าเชิงลาด*. สำนักวิจัยและพัฒนาทาง.กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, 2546
- [6] Curtis, M. and Claassen, V. “Using Compost to Increase Infiltration and Improve the Revegetation of a Decomposed Granite Roadcut.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133(2), 215-218, 2007
- [7] Styczen, M.E. and Morgan, R.P.C. “Engineering properties of vegetation” *Slope stabilization and erosion control, A bioengineering approach*, edited by Morgan, R.P.C and Rickson, R.J. Chapman and Hall, 1995
- [8] Coppin, N.J., Richards, I.G. “Physical effects of vegetation”. *Use of Vegetation in Civil Engineering*, Coppin NJ, Richards IG (eds). 1990.
- [9] สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (สำนักงาน กปร.) แผนแม่บท การพัฒนาและธรรมาภิบาลใช้หญ้าแผ่ อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2555-2559), 2555 หน้า 31
- [10] Rahardjo, H., Satyanaga, A. and Leong, E. C. “Unsaturated soil mechanics for slope stabilization” *Proc. 5th Asia-Pacific Conf. on Unsaturated Soils, Pattaya, Thailand*. 2011
- [11] Wu, T.H., McKinnell, W.P., III, and Swanston, D.N. “Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska” *Canadian Geotechnical Journal*, 114(12), 1979, pp 19-33.
- [12] จิตติมา เทพพานิช และ อภินิติ โชติสังกาศ “พฤติกรรมของลาดดินและกำลังเฉือนของดินในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์” *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15 จังหวัดอุบลราชธานี 12-14 พค 2553*
- [13] จิตติมา เทพพานิช และ อภินิติ โชติสังกาศ “พฤติกรรมของการไหลซึมและแรงดันน้ำในช่องว่างดิน กรณีศึกษาพื้นที่ดินถล่ม ตำบลแม่พูล อําเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์” *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, 18 – 20 พฤษภาคม 2554*

- [14] จิตมา เทพพานิช “พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินในพื้นที่ อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ที่มีผลต่อการพิบัติของลาดดิน” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน, 2553
- [15] Blyth, F.G.H, & de Freitas, M.H. *A geology for engineers*, The Bath Press. 1984, Pp 221
- [16] Nguyen, H.D, De Gennaro, V, Delage, P. & Sorgi, C. “Retention and compressibility properties of a partially saturated mine chalk” *1st European Conference on Unsaturated Soils (E-UNSAT)*, Durham, UK, 2-4 July, 2008.
- [17] อภินิติ โชติสังกาศ และอัศคพัฒน์ สว่างสุริย์. “การประยุกต์ใช้ความรู้ทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำสำหรับงานเสถียรภาพของลาดดิน” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, 2551.