

การทดสอบฟังก์ชันความชื้นน้ำของวัสดุงานทางในสภาวะดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และการประยุกต์ใช้

Investigation of Permeability Function of Pavement Materials in Unsaturated Condition and Its Application

ปลื้ม ประทุมขำ^{1*} อธิภัทร์ ศิริรัตนฉัตร² อภินิติ โชติสังกา³ และ อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์⁴

^{1,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

² สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง จ.กรุงเทพมหานคร

⁴ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: plume.geotechnical@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัญหาความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง มักสัมพันธ์กับความชื้นของวัสดุสร้างทาง บทความนี้จึงนำเสนอการศึกษาฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำในสภาวะไม่อิ่มตัวของวัสดุชั้นทาง ด้วยการทดสอบ Instantaneous Profile Method, IPM ของวัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ หินคลุก และดินลูกรัง โดยทดสอบในช่วงแรงดูดระหว่าง 0 ถึง 100 กิโลปาสกาล ผลการศึกษาพบว่า ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำอยู่ในช่วง 1×10^{-5} ถึง 1×10^{-10} เมตรต่อวินาที และได้เส้นอัตรลักษณ์ของวัสดุมีค่า Air Entry Suction อยู่ในช่วง 1 ถึง 3 กิโลปาสกาล ผลการศึกษานี้ได้นำไปประยุกต์ใช้หาความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในชั้นทาง เนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำใต้ดินที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการหาแนวทางป้องกันปัญหาความเสื่อมสภาพของวัสดุชั้นทางเนื่องจากความชื้นต่อไป

คำสำคัญ: ฟังก์ชันความชื้นน้ำ, ดินไม่อิ่มตัว, วัสดุงานทาง, ความชื้นดิน

Abstract

The moisture content of the pavement material is an important factor that affects the strength of the pavement structure. This paper presents a study on the permeability function in unsaturated conditions of pavement materials with the Instantaneous Profile Method (IPM). The gravel and laterite were selected for testing with suction between 0 and 100 kPa. The results showed that the coefficient of permeability was in the range of 1×10^{-5} to 1×10^{-10} m/s and the air entry suction value of soil water characteristic curve varied between 1 to 3 kPa. The result of this study was applied to estimate moisture variation in the pavement due fluctuating groundwater level and to find the preventive solution for moisture-related deterioration of pavement materials in the future

Keywords: Permeability Function, Unsaturated Soil, Pavement Materials, Soil Moisture

1. คำนำ

ปัจจุบันวัสดุในงานก่อสร้างทางที่เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มีแนวโน้มขาดแคลน หรือจำเป็นต้องมีการขนส่งจากแหล่งวัสดุ เช่น โรงโม่หิน หรือบ่อดิน/ทราย เป็นระยะทางไกล มีค่าขนส่งเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ราคางานก่อสร้างในโครงการก่อสร้างต่างๆ สูงขึ้นตามมา ทั้งนี้จากข้อมูลแหล่งวัสดุสร้างทางของกรมทางหลวง พบว่าวัสดุที่พบในท้องถิ่นซึ่งเดิมผ่านเกณฑ์และข้อกำหนดการก่อสร้างมีแนวโน้มนำกลับมาใช้งานได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทียบเคียงกับวัสดุตามมาตรฐานกรมทางหลวง เมื่อพิจารณาว่าวัสดุในท้องถิ่นมาปรับปรุงและออกแบบด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ หรือการเสริมแรงด้วยวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น ให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้เทียบเท่ากับวัสดุจากแหล่งวัสดุย่อมจะเป็นผลดีทั้งในแง่งบประมาณการก่อสร้างที่ลดลง [1] รวมถึงการพัฒนาองค์ความรู้ด้านการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความเหมาะสมกับงานก่อสร้างต่อไป

การนำวัสดุท้องถิ่นที่ปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้เป็นไปตามข้อกำหนดมาใช้ในงานทาง เพื่อให้ได้ความแข็งแรงของโครงสร้างทางที่ได้มาตรฐานแล้วนั้น อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงและเสถียรภาพของโครงสร้างชั้นทางคือปริมาณความชื้นของวัสดุ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามระดับน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะในฤดูฝนที่ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้น ส่งผลให้แรงดันน้ำสูงขึ้น ปริมาณความชื้นในโครงสร้างทางเพิ่มขึ้น กำลังของวัสดุลดลง เป็นเหตุให้ถนนมีความเสียหายได้เนื่องจากความสามารถในการรับน้ำหนักลดลง ดังนั้นการนำวัสดุท้องถิ่นมาใช้ในงานทางนอกจากจะพิจารณาให้ความแข็งแรงของโครงสร้างทางเป็นไปตามมาตรฐานแล้ว หากวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติที่ช่วยป้องกันความชื้นจากแรงดันน้ำใต้ดินได้ หรือมีลักษณะเป็น Capillary Barrier ย่อมจะทำให้

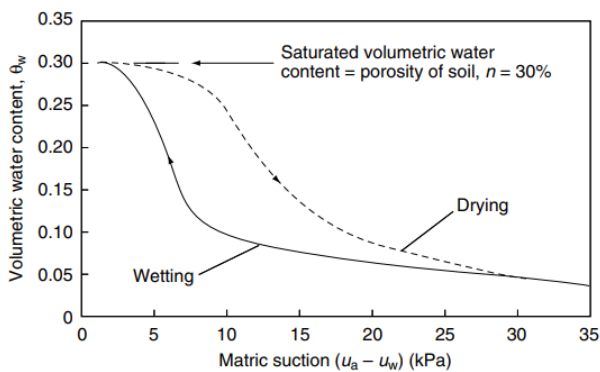
ความชื้นในโครงสร้างทางไม่เปลี่ยนแปลงไปมาก เป็นการยืดอายุการใช้งานของถนนให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น [2] ก่อนจะทำการศึกษาซ่อมบำรุงได้อีกทางหนึ่ง

บทความนี้จึงนำเสนอผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของวัสดุงานทางในสถานะดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของชั้นพื้นทางหินคลุกและชั้นรองพื้นทางลูกรัง ว่าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในโครงสร้างชั้นทางอย่างไรเมื่อแรงดันน้ำใต้ดินเปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัยทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัว และแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์การไหลซึม ซึ่งวัสดุที่ใช้ศึกษากำหนดให้มีขนาดคล้อยใกล้เคียงกับวัสดุสร้างทางจากแปลงศึกษาวิจัยในโครงการการประยุกต์ใช้วัสดุท้องถิ่นในงานออกแบบและก่อสร้างทางหลวง จ.เพชรบูรณ์ ของกรมทางหลวง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เส้นอรรถลักษณะของดิน (Soil Water Characteristic Curve, SWCC)

เส้นอรรถลักษณะ คือความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของดินกับแรงดูด (รูปที่ 1) ซึ่งความชื้นสามารถแสดงได้ในหลายรูปแบบ เช่น ระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content) หรือความชื้นโดยน้ำหนัก (Gravimetric Water Content) แต่ทั่วไปแล้วนิยมนำเสนอเส้นอรรถลักษณะในรูปแบบความชื้นที่เป็นความชื้นโดยปริมาตร เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ได้จำเป็นในการวิเคราะห์การไหลซึมแบบ Transient Flow และความชื้นที่นิยมนำเสนออีกรูปแบบหนึ่งคือ ระดับความอิ่มตัว เนื่องจากเส้นอรรถลักษณะที่เป็นความสัมพันธ์ของระดับความอิ่มตัว กับแรงดูด ใช้ในการคำนวณหาค่า Air Entry Value ได้ชัดเจนที่สุด [3,4]



รูปที่ 1 เส้นอรรถลักษณะของดิน (Soil Water Characteristic Curve, SWCC)

เส้นอรรถลักษณะโดยทั่วไปไม่มีความเป็น Hysteresis คือมีกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ในสถานะที่ดินกำลังเปียก (Wetting/Sorption) และในสถานะที่ดินกำลังแห้ง (Drying/Desorption) ไม่เป็นเส้นเดียวกัน โดยอิทธิพลที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นอรรถลักษณะมากที่สุดคือ ลักษณะการกระจายตัวของช่องว่างในดิน (Pore Size Distribution) และความพรุนของดิน (Porosity) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนโพรง (Void Ratio) กล่าวคือ ดินชนิดใดที่มีความพรุนมากกว่าจะมีความชื้นโดยปริมาตร และค่า Air-entry ที่ค่าแรงดูดใดๆ สูงกว่าดินที่มีความพรุนน้อยกว่า เนื่องจากค่า

ความชื้นโดยปริมาตรแปรผันตรงกับความพรุน และเมื่อพิจารณาดินชนิดเดียวกัน ดินที่มีขนาดคละที่ดี (Well Grade) จะมีการกระจายตัวของช่องว่างในดินที่ดีกว่าดินที่มีขนาดคละไม่ดี (Poorly Grade) จึงมีความชื้นของเส้นอรรถลักษณะที่น้อยกว่า ซึ่งเส้นอรรถลักษณะของดิน เป็นสมบัติพื้นฐานของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่สามารถใช้ทำนายพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น กำลังเฉือนของดิน สัมประสิทธิ์การนำความร้อน รวมถึงนำไปใช้ในการวิเคราะห์แรงดันน้ำในสถานะเปลี่ยนแปลงอีกด้วย

2.2 การไหลซึมของน้ำผ่านดินไม่อิ่มตัว

สัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำผ่านดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าแรงดูด (Suction) ในลักษณะที่แปรผกผันกัน กล่าวคือเมื่อค่าแรงดูดเพิ่มขึ้นจากปริมาณความชื้นที่ลดลง สัมประสิทธิ์การไหลซึมจะลดลงเนื่องจากปริมาณอากาศในดินเพิ่มมากขึ้น ทำให้ช่องว่างที่น้ำสามารถไหลผ่านไปได้ลดลง และการไหลของน้ำยังต้องผ่านช่องว่างที่มีความคดเคี้ยวมากขึ้น และเมื่อดินแห้งมากจะมีน้ำเฉพาะที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคดินในลักษณะฟิล์ม (Film Flow) หรือการแพร่ของไอน้ำเป็นหลัก จึงมีอัตราการไหลซึมที่ช้ามาก

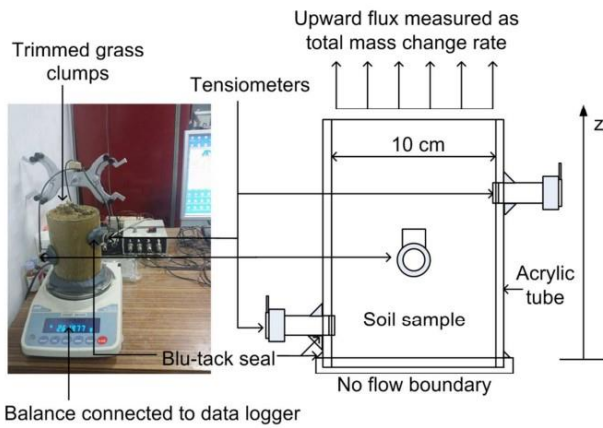
โดยพฤติกรรมการไหลซึมสามารถอธิบายได้โดยกฎของริชาร์ด (Richard's Law) และกฎความต่อเนื่อง (Equation of Continuity) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 1

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

เมื่อ k_x, k_y คือสัมประสิทธิ์การไหลซึมในทิศทาง x และ y , h คือ Total Head, u_w คือแรงดันน้ำในช่องว่างดิน (Pore Water Pressure), Q คือปริมาณน้ำไหลเข้าออกที่ขอบเขต (Applied Boundary Flux) และ m_w คือความชื้นของเส้นอรรถลักษณะของดิน

2.2.1 การทดสอบหาฟังก์ชันความชื้นน้ำของดิน

ฟังก์ชันความชื้นน้ำของดิน (Hydraulic Conductivity Function) มีวิธีการทดสอบด้วยกันหลายแบบ แต่หนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมในทางปฏิบัติคือ Instantaneous Profile Method (IPM) [5,6] ซึ่งเป็นการทดสอบแบบอัตรการไหลไม่คงที่ (Unsteady State Method) สามารถทำการทดสอบได้ทั้งในสนาม และในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการมักจะทดสอบกับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ลักษณะการทดสอบมีสองแบบ คือ แบบดินเปียกชื้น (Wetting) และแบบดินแห้งชื้น (Drying) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทดสอบฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินด้วยวิธี IPM

การทดสอบในกระบวนการเปียก จะปล่อยให้ น้ำไหลเข้าสู่ตัวอย่างดิน และควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านช่องน้ำเข้า การไหลของน้ำสู่ดินจะเป็น การไหลเข้าพร้อมกันทั้งหน้าตัดตัวอย่างผ่านกระดาษกรองที่ซ้อนกันหลาย ชั้น อีกด้านของตัวอย่างจะมีช่องอากาศเพื่อให้การทดลองอยู่ในสภาวะ บรรยากาศ การไหลของน้ำในแนวนอนเกิดขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ของน้ำ และไม่สนใจผลของการไหลซึมเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ตลอดทั้งตัว ตัวอย่างดิน ในกรณี Tensiometer สามารถวัดค่าแรงดูดได้ไม่เกิน 100 กิโล ปาสกาล โดยประมาณ สำหรับ Psychrometer มีประสิทธิภาพในการวัด ค่าแรงดูดที่เกิดขึ้นได้สูงกว่า มีความน่าเชื่อถือของค่าแรงดูดที่วัดได้อยู่ในช่วง 100-8,000 กิโลปาสกาล เมื่อได้ค่าแรงดูดสารหาค่าปริมาณความชื้นโดย ปริมาตร (Volumetric Water Content, θ) และการเปลี่ยนแปลงของ ความชื้นทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient, i) และอัตราการไหล (Flow Rate) สามารถนำมาคำนวณสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ (Coefficient of Permeability) ของดินได้ดังสมการที่ 2

$$k = \frac{v}{i} = \frac{\frac{dV_w}{Adt}}{\frac{d(Z-s)}{\gamma_w dz}} \quad (2)$$

เมื่อ dV_w คือปริมาตรของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป, A คือพื้นที่หน้าตัด ตัวอย่าง, t คือเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป, Z คือความสูงจากระดับอ้างอิง (Elevation Head), s คือค่าแรงดูดในดิน (matrix suction) และ γ_w คือ หน่วยน้ำหนักน้ำ

2.2.2 Curve Fitting

สมการที่ใช้ในการ Curve Fitting ฟังก์ชันความชื้นน้ำของดิน เป็นการ ผสานระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ดินอิ่มตัว กับพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ปรับรูปแบบของกราฟให้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ โดย Brooks and Corey, 1964 [5] ได้เสนอสมการที่มีลักษณะกราฟเป็น แบ่งเป็นสองช่วง คือกราฟจะเป็นเส้นตรงในแนวราบที่ค่าความชื้นที่ดินอิ่มตัว

ด้วยน้ำจนกระทั่งถึงค่าแรงดูดที่จุด Air Entry Point และเป็นกราฟเส้นตรง จากจุด Air Entry Point มีความชันที่เปลี่ยนแปลงไปตามการกระจายตัว ของช่องว่างในดิน

$$k(\psi) = k_s, \quad \psi \leq \psi_b \quad (3)$$

$$k(\psi) = k_s \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\eta, \quad \psi > \psi_b$$

เมื่อ k_s คือสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ, ψ_b คือ ค่าแรงดูดที่ Air Entry Point, λ คือดัชนีการกระจายตัวของช่องว่าง (Pore Size Distribution Index) และ η มีค่าเท่ากับ $2+3\lambda$

3. วิธีการศึกษา

3.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินในห้องปฏิบัติการ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้จะอ้างอิงขนาดผลของวัสดุสร้างทางจาก โครงการการประยุกต์ใช้วัสดุท้องถิ่นในงานออกแบบและก่อสร้างทางหลวง จังหวัดเพชรบูรณ์ ด้วยการนำวัสดุจากแหล่งต่างๆ จำนวน 4 แหล่ง (ตาราง ที่ 1) มาออกแบบอัตราส่วนผสมให้ได้ขนาดผลใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้ใน โครงการฯ

ตารางที่ 1 แหล่งวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุ	แหล่งวัสดุ
หินเบอร์ 1 (หินขนาด ¾")	โรงโม่หินน้ำเอนกศิลา เลขที่ 7/2 ม.6 ต.พุด่าง อ.พระพุทธบาท จ.สระบุรี
หินคลุก 1	โรงโม่หินเขาใหญ่ เลขที่ 487 หมู่ 3 ต.หน้าพระลาน อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.สระบุรี
หินคลุก 2	โรงโม่หินน้ำเอนกศิลา เลขที่ 7/2 ม.6 ต.พุด่าง อ.พระพุทธบาท จ.สระบุรี
ดินลูกรัง	โครงการปรับปรุงแยกต่างระดับลำลูกกา อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี

โดยวัสดุที่นำมาศึกษา ประกอบด้วยหินผสมคอนกรีต หรือหินเบอร์ 1, หินคลุกจำนวน 2 แหล่ง และดินลูกรัง มีรายการทดสอบคุณสมบัติทาง วิศวกรรม คือ ชีตจำกัดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's Limit Test) ตาม ทล.-ท.102 และ ทล.-ท.103, ความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity Test) ตาม ทล.-ท.101, การกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Distribution Test) ตาม ทล.-ท.205, การบดอัดดิน (Compaction Test) ตาม ทล.-ท.108 และการทดสอบหาค่า CBR ตาม ทล.-ท.109

3.2 การทดสอบสมบัติความชื้นได้ของน้ำในดิน

3.2.1 กรณีดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำในดินกรณีดินอิ่มตัว ด้วยน้ำ ทำการทดสอบด้วยใช้ความดันคงที่ (Constant Head) เนื่องจาก ตัวอย่างเป็นวัสดุหินคลุกและลูกรังที่มีการไหลซึมผ่านของน้ำได้ดี โดยการ เตรียมตัวอย่างจะทำการบดอัดที่ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดใน

ท่อ PVC ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 15 เซนติเมตร การบดอัดจะให้เครื่องกดคอนกรีต (รูปที่ 3) เพื่อควบคุมอัตราการบดอัดให้สม่ำเสมอเท่ากันทุกตัวอย่างทดสอบ และแบ่งการบดอัดออกเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นกำหนดให้ดินที่บดอัดมีน้ำหนักเท่ากัน จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 4 วัน ที่ระดับน้ำเท่ากับความสูงของภาชนะตัวอย่าง ± 1 เซนติเมตร จากความสูงของภาชนะบรรจุตัวอย่าง โดยฐานตัวอย่างรองด้วยกระดาษกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร และวางอยู่บนหินปูนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าขนาดของตัวอย่าง ในที่นี้ใช้ 15 เซนติเมตร เพื่อให้ดินมีความอิ่มตัว ก่อนนำตัวอย่างไปทดสอบต่อไป



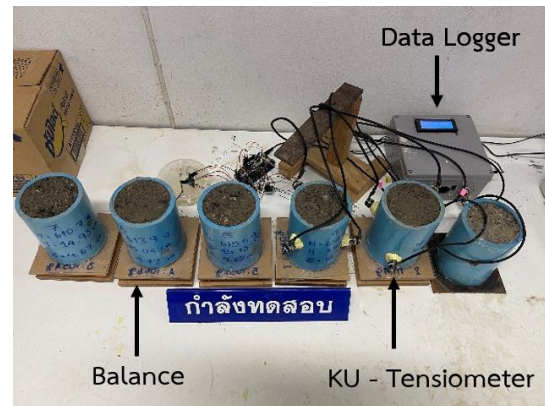
รูปที่ 3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบสมบัติความชื้นได้ของน้ำในดิน

3.2.2 กรณีดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ในการศึกษานี้จะทำการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ของดินด้วยวิธี Instantaneous Profile Method แบบกระบวนการแห้ง (Drying Test) ซึ่งจัดเป็นการทดสอบแบบอัตราการไหลไม่คงที่ (Transient Test) เป็นการวัดและบันทึกค่าแรงดูดของดินที่มีความชื้น และมีค่าแรงดูดเปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาหนึ่งๆ ผลการทดสอบที่ได้จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดูดเมทริกซ์ (Matrix Suction) และความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content) หรือความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation) นอกจากนี้การบันทึกค่าแรงดูดจากเซนเซอร์ (KU-Tensiometer) ที่ระดับต่างๆ ของตัวอย่าง ยังทำได้ ความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient, i) ความเร็วในการไหลของน้ำในดิน (Velocity) และฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ (Hydraulic Conductivity Function) [6,7] ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้วิเคราะห์แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในลาดดิน ในแบบจำลองต่อไป

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดำเนินการเช่นเดียวกับกรณีดินอิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นเริ่มการทดสอบโดยนำตัวอย่างที่ติดตั้ง Tensiometer ที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างตัวอย่าง ที่ระดับจากฐานตัวอย่าง 12, 8 และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำไปวางบนเครื่องชั่ง ดังรูปที่ 4 โดยการเก็บข้อมูลน้ำหนักและค่าแรงดูดเมทริกซ์ด้วยบอร์ด Arduino Uno โดยกำหนดให้เก็บข้อมูลน้ำหนักของตัวอย่าง และค่าแรงดูดที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการระเหยของน้ำระหว่างการทดสอบทุกๆ 5 นาที การทดสอบจะ

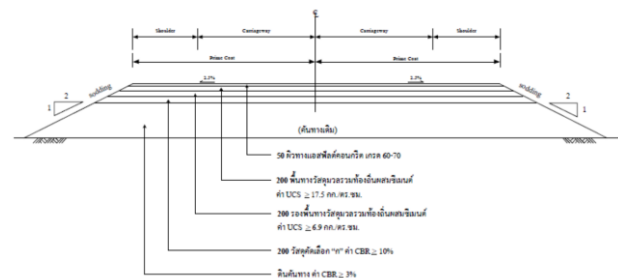
สิ้นสุดเมื่อเซนเซอร์ตำแหน่งล่าง อ่านค่าแรงดูดได้ประมาณ 60-70 กิโลปาสคาล ซึ่งใช้เวลาทดสอบประมาณ 1 สัปดาห์



รูปที่ 4 การทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Instantaneous Profile Method

3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึม

การวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึมในการศึกษานี้ วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) แบบ 2 มิติ [6-8] เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบอิทธิพลของแรงดันน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความชันในโครงสร้างทาง เนื่องจากการใช้วัสดุท้องถิ่นในการก่อสร้างทาง โดยอาศัยสมบัติความชุ่มน้ำของดินที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธี Instantaneous Profile Method ซึ่งประกอบไปด้วย เส้นอัตราลักษณ์ และฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดิน โดยหน้าตัดในการวิเคราะห์อ้างอิงจากโครงการประยุกต์ใช้วัสดุท้องถิ่นในงานออกแบบและก่อสร้างทางหลวงของกรมทางหลวง ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 หน้าตัดรูปแบบก่อสร้างในพื้นที่โครงการฯ

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติดินทางวิศวกรรม

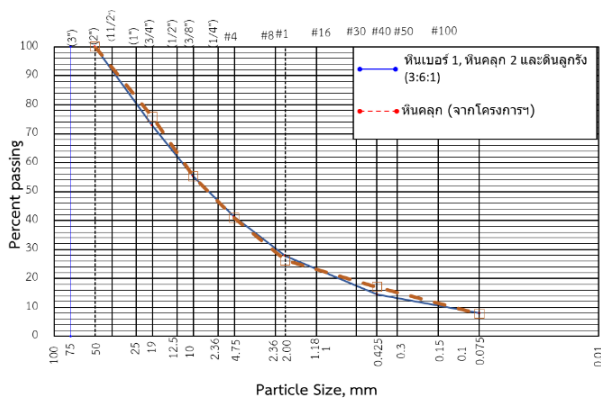
เมื่อนำวัสดุตามตารางที่ 1 รวมถึงหินคลุกและลูกรังจากโครงการการประยุกต์ใช้วัสดุท้องถิ่นในงานออกแบบและก่อสร้างทาง ของกรมทางหลวง มาทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรม พบว่ามีค่าดัชนีความเหนียว การกระจายตัว ความหนาแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน และ CBR แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติดินทางวิศวกรรม

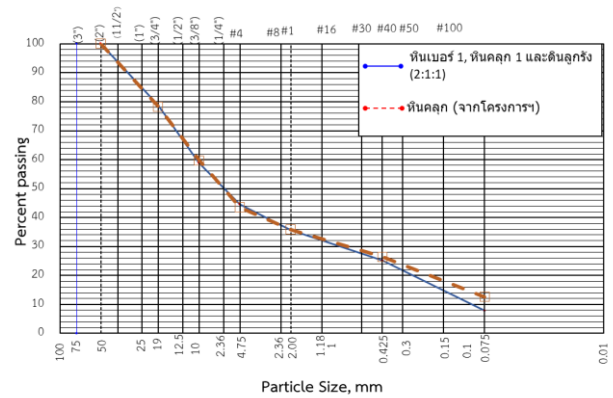
รายการทดสอบ	วัสดุ					
	หินเบอร์ 1	หินคลุก 1	หินคลุก 2	ดินลูกรัง	หินคลุก*	ดินลูกรัง*
Atterberg's Limit						
Liquid Limit, %	-	-	-	27.5	-	-
Plastic Limit, %	-	-	-	21.2	-	-
Plastic Index, %	N.P.	N.P.	-	6.3	N.P.	-
Specific Gravity	2.70	2.73	2.75	2.65	2.71	2.63
Grain Size Distribution (Percent Finer)						
50 mm	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
19 mm	23.0	93.9	84.1	98.4	75.8	78.3
9.5 mm	2.5	69.1	58.6	88.2	55.2	59.8
#4	0.0	48.7	37.1	74.7	40.9	43.5
#10	0.0	33.0	23.1	70.8	26.3	35.9
#40	0.0	17.8	11.7	47.5	17.1	26.5
#200	0.0	9.1	7.2	11.9	7.8	15.6
AASHTO Classification	-	A-1-a	A-1-a	A-2-4	A-1-a	A-2-4
Modified Proctor Compaction						
Max. Dry Density, t/m ²	-	2.306	2.226	2.086	2.308	2.145
OMC, %	-	5.3	6.5	8.3	5.6	12.1

* วัสดุที่ได้จากพื้นที่ก่อสร้างทางในโครงการการประยุกต์ใช้วัสดุท้องถิ่นในงานออกแบบและก่อสร้างทาง กรมทางหลวง

เพื่อให้ได้ขนาดผลของวัสดุที่นำมาใช้ศึกษาใกล้เคียงกับวัสดุในโครงการฯ จึงได้ทำการออกแบบส่วนผสมของวัสดุโดยนำวัสดุจากตารางที่ 1 มาผสมในสัดส่วนที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อนำหินเบอร์ 1, หินคลุก 2 และดินลูกรัง มาผสมกันที่อัตราส่วน 3:6:1 จะได้ขนาดผลใกล้เคียงกับหินคลุกจากโครงการฯ ดังรูปที่ 6 และเมื่อนำหินเบอร์ 1, หินคลุก 1 และดินลูกรัง มาผสมที่อัตราส่วน 2:1:1 จะได้ขนาดผลใกล้เคียงกับดินลูกรังในโครงการฯ ดังรูปที่ 7



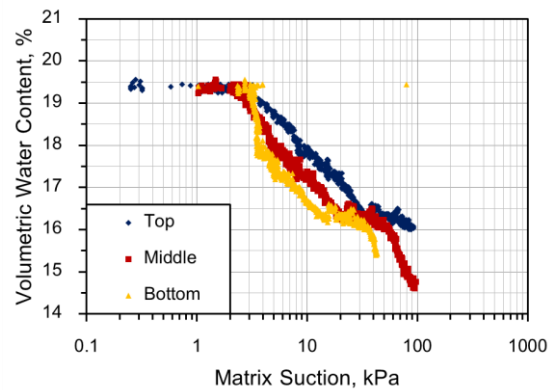
รูปที่ 6 ขนาดผลหินคลุกที่ใช้ในการศึกษาและหินคลุกจากโครงการฯ



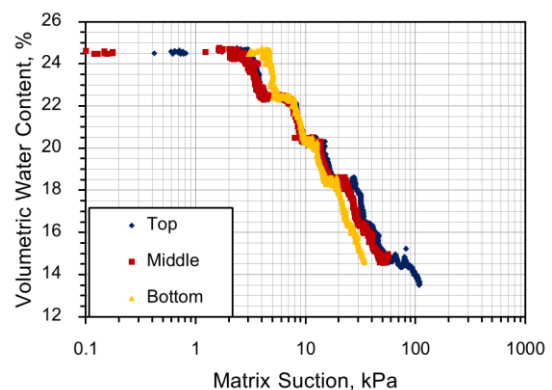
รูปที่ 7 ขนาดผลลูกรังที่ใช้ในการศึกษาและลูกรังจากโครงการฯ

4.2 ผลการศึกษาการไหลซึมของดินไม่อิ่มน้ำ

ผลการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณะด้วยวิธี IPM ของหินคลุกและลูกรังที่ได้จากการออกแบบขนาดผล แสดงดังรูปที่ 8 และ 9 จากรูปจะเห็นว่าหินคลุกออกแบบมีค่าความชื้นโดยปริมาตรที่แรงดูด 0.1 กิโลปาสคาล เท่ากับ 19.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่ำกว่าลูกรังออกแบบที่มีค่าความชื้นโดยปริมาตรอยู่ที่ 24.5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Air-Entry Point ของหินคลุกและลูกรังออกแบบมีค่า 1.4 และ 3.0 กิโลปาสคาล ตามลำดับ เนื่องจากหินคลุกมีอนุภาคของเม็ดหยาบมากกว่า ทำให้มีความพรุน (Porosity) น้อยกว่า

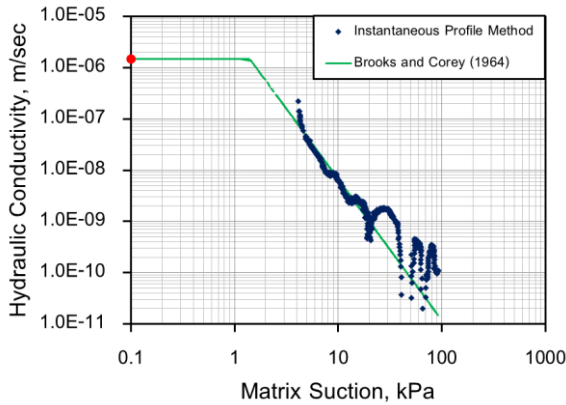


รูปที่ 8 เส้นอัตราลักษณะของหินคลุกออกแบบ

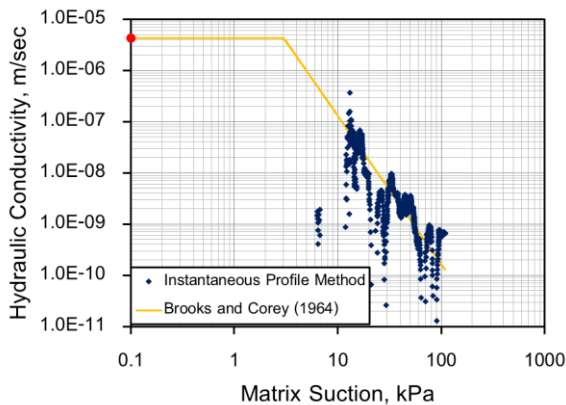


รูปที่ 9 เส้นอัตราลักษณะของลูกรังออกแบบ

จากรูปที่ 10 และ 11 เป็นฟังก์ชันความสัมพันธ์ของหินคลุกและลูกรัง ออกแบบ โดยมีค่าการไหลซึมที่ดินอิ่มตัวจากการทดสอบด้วยวิธีความดันคงที่ของหินคลุกและลูกรังออกแบบมีค่า $1.49E-6$ และ $4.30E-6$ เมตรต่อวินาที ตามลำดับ เมื่อทำการ Curve Fitting ของข้อมูลด้วย Brooks and Corey, 1964 ดังสมการที่ 2 จะได้ตัวแปรของสมการดังตารางที่ 3



รูปที่ 10 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของหินคลุกออกแบบ



รูปที่ 11 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของลูกรังออกแบบ

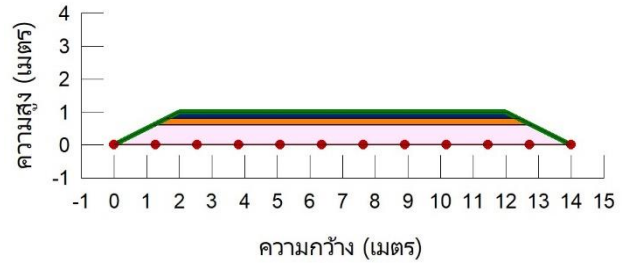
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์สมการความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความสัมพันธ์

วัสดุ	สัมประสิทธิ์การไหลซึม ในภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ, m/s	ตัวแปรในสมการ Brooks and Corey
หินคลุก**	$1.49E-6$	$\psi_b = 1.40$ $\eta = 2.75$ $\lambda = 0.25$
ดินลูกรัง**	$4.30E-6$	$\psi_b = 3.00$ $\eta = 2.90$ $\lambda = 0.30$

** วัสดุที่ได้จากการออกแบบขนาดผล

4.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึม

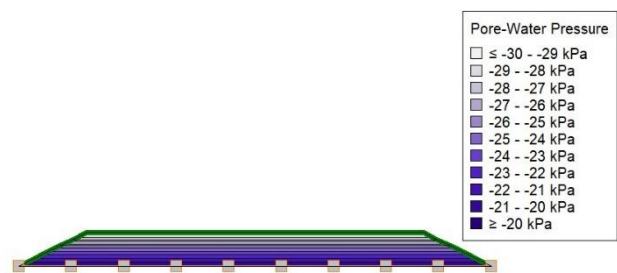
หน้าตัดแบบจำลองการไหลซึมกำหนดให้คันทางมีความสูง 1 เมตร มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วย พื้นทางและรองพื้นทางที่ได้จากการออกแบบ ขนาดผล หนาชั้นละ 20 เซนติเมตร และชั้นดินเดิมที่เป็นดินเหนียวมีความหนา 60 เซนติเมตร และมีลาดคันทาง 2:1 (X:Y) ดังรูปที่ 12 โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ในส่วนของดินเดิมมีรายละเอียดตาม [10]



รูปที่ 12 รูปตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึม

การวิเคราะห์การไหลซึมใช้โปรแกรม GeoStudio SEEP/W ในการวิเคราะห์จะแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือสถานะเริ่มต้น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบสถานะคงที่ (Steady State Analysis) และการวิเคราะห์การไหลในสถานะแปรเปลี่ยน (Transient Analysis) โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ตาม [7-9]

Boundary Condition ในสถานะเริ่มต้น กำหนดให้ของเขตล่างของโครงสร้างทางมีแรงดันน้ำ (Pressure Head) -2 เมตร หรือมีระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าโครงสร้างทาง 2 เมตร ในขณะที่ด้านอื่นๆ ของโครงสร้างทางไม่กำหนด Boundary Condition ใดๆ หรือไม่มีมีการไหลเกิดขึ้น (No Flow) โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 13 จากรูปจะเห็นว่าแรงดันน้ำในดิน (Pore Water Pressure) มีความเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง -30 ถึง -20 กิโลปาสกาล โดยแรงดันน้ำค่าลบจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากระดับน้ำใต้ดินไปจนถึงผิวทาง

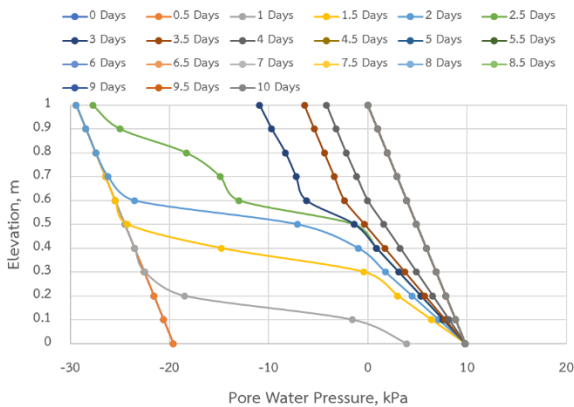


รูปที่ 13 แรงดันน้ำในสถานะเริ่มต้น

ในขั้นตอนการวิเคราะห์สถานะแปรเปลี่ยน จะกำหนดให้ระดับใต้ดินค่อยๆ เพิ่มขึ้น ในที่นี้กำหนด Boundary Condition เป็นฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่าง Total Head และเวลา โดยให้ที่ระยะเวลา 10 วัน ระดับน้ำขึ้นจาก -2 เมตร มาจนถึงผิวถนน ผลการวิเคราะห์ (รูปที่ 14) แสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของความชื้นของวัสดุสร้างทางเมื่อเวลาเปลี่ยนไป เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาชั้นทางจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน วัสดุสร้างทางเริ่มมีความชื้นเกิดขึ้นใน

ชั้นดินเดิม และวัสดุสร้างทางจะอิ่มตัวด้วยน้ำทั้งหมดเมื่อระยะเวลาผ่านไป 4 วัน

จากผลการวิเคราะห์การไหลซึมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบชั้นทางได้ โดยหากมีการปรับเปลี่ยนวัสดุชั้นทางด้านล่างสุดให้มีความสมบัติที่บ่มแน่นมากขึ้น ระยะเวลาที่ทำให้ความชื้นของวัสดุชั้นทางเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากแรงดันน้ำใต้ดินก็จะมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างชั้นทางมีเสถียรภาพมากขึ้น



รูปที่ 14 แรงดันน้ำที่ระยะเวลาและตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างชั้นทาง

5. บทสรุป

การทดสอบฟังก์ชันความชื้นน้ำของวัสดุงานทางในสภาวะดินไม่อิ่มตัวในการศึกษาครั้งนี้ ดำเนินการทดสอบด้วยวิธี Instantaneous Profile Method วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยหินคลุกและดินลูกรังที่ออกแบบขนาดคละให้มีความใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษาวิจัยของกรมทางหลวง ในโครงการการประยุกต์ใช้วัสดุท้องถิ่นในงานออกแบบและก่อสร้างทางหลวง จ.เพชรบูรณ์ โดยผลการศึกษาพบว่าเส้นอัตราลักษณ์ของหินคลุกและลูกรังออกแบบมีค่า Air Entry Suction อยู่ที่ 1.4 และ 3.0 กิโลปาสกาล ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกรณีดินอิ่มตัวด้วยน้ำของหินคลุกและลูกรังออกแบบ อยู่ที่ $1.49E-6$ และ $4.30E-6$ เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และมีสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุสร้างทางทั้งสองชนิดอยู่ในช่วง 1×10^{-5} ถึง 1×10^{-10} เมตรต่อวินาที

ค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุสร้างทางเนื่องจากแรงดันน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงไป ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SEEP/W โดยกำหนดให้โครงสร้างชั้นทางหนา 1 เมตร ประกอบด้วยหินคลุก ดินลูกรัง และดินเดิม ผลการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าวัสดุสร้างทางชั้นดินเดิมเริ่มมีความชื้นเกิดขึ้นที่เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน และโครงสร้างชั้นทางทั้งหมดจะอิ่มตัวด้วยน้ำที่ระยะเวลา 4 วัน

จากการศึกษาแสดงให้เห็นแนวทางการศึกษาพฤติกรรมการไหลซึมในสภาวะไม่อิ่มตัว ซึ่งช่วยให้สามารถเข้าใจในพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความชื้นในชั้นทางจาก Capillary Rise ได้ และสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และออกแบบชั้นทางได้ต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการศึกษาขอขอบพระคุณกรมทางหลวงที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง จากโครงการการประยุกต์ใช้วัสดุท้องถิ่นในงานออกแบบและก่อสร้างทางหลวง จ.เพชรบูรณ์ และศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม SEEP/W สำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sawangsuriya, A. (2021). *A national highway no.2275: Huay Rai – Ban Klang rehabilitation project for green and sustainable development of Thailand rural highway network*. 16th Road Engineering Association of Asia and Australasia Conference, Manila Marriot Hotel, Manila, Philippines, 16-18 September 2021.
- [2] Sousa, M. A. D. S., Coutinho, R. Q., & Motta, L. M. G. D. (2023). Analysis of the unsaturated behaviour of compacted lateritic fine-grained tropical soils for use in transport infrastructure. *Road Materials and Pavement Design*, 24(1), pp.31-58.
- [3] อภินิติ โชติสังกาศ (2555). *กลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัว*. หจก.พีริ-วัน, หน้า 3-1 ถึง 3-13.
- [4] Charles W.W. Ng and Bruce Menzies (2007). *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering*. Taylor & Francis, pp.100-110.
- [5] Ning Lu and William J. Likos (2004). Flexural strength of notched concrete beam filled with alkali-activated binders under different types of alkali solutions. John Wiley & Sons, Inc., pp.466-516.
- [6] Sirirattanachat, T. (2015). *Influence of Vetiver Roots on Hydraulic Characteristic of Slope and Slope Stability*. M.Eng. Dissertation, Kasetsart University, Thailand.
- [7] จิตมา เทพพานิช และ อภินิติ โชติสังกาศ. พฤติกรรมการไหลซึมและแรงดันน้ำในช่องว่างดิน กรณีศึกษาพื้นที่ดินถล่ม ตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16*, ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554.
- [8] อภินิติ โชติสังกาศ. เสถียรภาพของลาดดินที่ปลูกหญ้าแฝกในสภาวะฝนตกจากแบบจำลองคณิตศาสตร์. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18*, เชียงใหม่, 8-10 พฤษภาคม 2556.
- [9] อภินิติ โชติสังกาศ และ อัครพัฒน์ สว่างสุริย์. การประยุกต์ใช้ความรู้ทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัวสำหรับงานเสถียรภาพของลาดดิน. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13*, ชลบุรี, 13-16 พฤษภาคม 2556.

- [10] Jotisankasa, A. and Sirirattanachat, T. (2017). Effect of grass roots on soil-water retention curve and permeability function. Canadian Geotechnical Journal.