

การไหลของน้ำในดินเนื่องจากอิทธิพลของน้ำฝน

ชนาธิป ศุภโกทยาน^{1*} อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์² และ สมใจ ยุบลชิต³

บทคัดย่อ

ปัญหาดินถล่มเนื่องจากฝนเป็นที่ทราบกันอย่างแพร่หลายว่าเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่าง การตอบสนองทางอุทกวิทยาและการเปลี่ยนแปลงกำลังของดินในลาดดิน การซึมของฝนลงสู่ลาดดินทำให้ความชื้นในดิน เพิ่มขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนรวมทั้งเสถียรภาพของลาดดิน ดังนั้นความเข้าใจในปฏิสัมพันธ์ ดังกล่าวจึงมีส่วนสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อบูรณาการระบบการเตือนภัยพิบัติดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพที่สามารถช่วย บรรเทาความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่เสี่ยงภัย งานวิจัยนี้ศึกษาการตอบสนองทางอุทกวิทยาใน ลาดดินจากแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติภายใต้สภาวะฝนที่เป็นไปได้ 3 สภาวะ ประกอบด้วย 1) สภาวะฝนที่ มีความเข้มฝนต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน 2) ความเข้มฝนใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน และ 3) ความเข้มฝนสูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษานี้ถูกเก็บมาจากสถานีเตือนภัย ดินถล่ม บ้านคลองสะทอน ตำบลวังหมี อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา จากการทดสอบพบว่า ภายใต้สภาวะฝนที่ 1 การตอบสนองความชื้นในดินจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอย่างชัดเจนประกอบด้วยช่วงการซึมและช่วงการเพิ่มขึ้นของระดับ น้ำใต้ดิน ในช่วงแรกความชื้นในดินจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ลงของแผ่นความชื้น จากความชื้นเริ่มต้น (θ_{wi}) ไปถึง ความชื้นที่เรียกว่าความชื้นพื้นหลัง (θ_{wb}) เมื่อแผ่นความชื้นดังกล่าวเคลื่อนไปถึงชั้นที่น้ำที่ถูกจำลองขึ้น ความชื้นในดิน จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินจาก θ_{wb} ไปถึงความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (θ_{sat}) เมื่อเปรียบเทียบสภาวะฝนที่ 2 และ 3 พบว่าขนาดของ θ_{wb} จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของความเข้มฝน จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ θ_{sat} เมื่อความเข้มฝนมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน นอกจากนี้ผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า การเคลื่อน ตัวของแผ่นความชื้นจะเร็วขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มฝน ดังนั้นการตอบสนองความชื้น ณ สภาวะฝนที่แตกต่าง ดังกล่าวมาข้างต้นอาจจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการวิบัติรวมทั้งความลึกของระนาบวิบัติของลาดดิน

คำสำคัญ: แบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ, การเปลี่ยนแปลงความชื้น, การไหลซึม

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ นักวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร. +666 1230 2777 อีเมล: ch.supotayan@gmail.com



Seepage Responses in Soil Subjected to Rainfall

Chanathip Supotayan^{1*} Avirut Chinkulkijniwat² and Somjai Yubonchit³

Abstract

Landslides triggered by rainfall are widely known disaster related to the interactions between hydrological responses and change in strength of the sloping ground. The infiltration of rainwater into the soil results in increment of soil water content, hence the drop of shear strength and factor of safety against slope failure. Understanding this interaction is vital to enhance the landslides warning system such that mitigation of landslide disaster can be performed effectively. This research investigated the seepage response in the soil by one-dimensional infiltration model under 3 rainfall conditions : 1) Rainfall intensity was less than permeability coefficient of the soil, 2) Rainfall intensity was close to permeability coefficient of the soil, and 3) Rainfall intensity was higher than permeability coefficient of the soil. Soil samples used in this study were gathered from the landslide warning station ; Ban Khlong Sathon, Wang Mi Sub-district, Wang Nam Khieo District, Nakhon Ratchasima Province. The test found that, under the 1st rainfall condition, the change of soil volumetric water content can be divided into two phases : infiltration phase and rising of water table phase. The infiltration phase involved the downward movement of the wetting front. In this phase, the water content increased from the initial value of the volumetric water content (θ_{wi}) to the final volumetric water content called volumetric water content behind wetting front (θ_{wb}) to reach saturated water content (θ_{sat}). When the wetting front reaches to the impervious layer, the water content in the soil will increase due to the rising of water table. The magnitude of θ_{wb} increases with increasing the magnitude of rainfall intensity. The magnitude of θ_{wb} is equal to θ_{sat} when the rainfall intensity is equal to the permeability coefficient of the soil. In addition, the results showed that the wetting front velocity also depends on the rainfall intensity.

Keywords: one-dimensional infiltration model, change of volumetric water content, infiltration

¹ Master Degree Graduate, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

² Associate Professor, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

³ Researcher, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author Tel. +666 1230 2777 e-mail: ch.supotayan@gmail.com

1. บทนำ

ธรณีพิบัติภัยจากการเกิดดินโคลนถล่มถือเป็นภัยทางธรรมชาติที่พบได้บ่อยในทางภาคเหนือและภาคใต้ของประเทศไทยเนื่องจากภูมิประเทศเป็นลาดภูเขาสูงชัน และพบในบางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นหลังจากที่มวลดินและหินที่ไหลมาตามลาดเขาได้เกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก ถือเป็นภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และสามารถป้องกันได้ค่อนข้างยาก ซึ่งดินถล่มมักเกิดตามมาหลังจากเกิดน้ำป่าไหลหลากในขณะที่เกิดพายุฝนตกหนักรุนแรงต่อเนื่อง ดินถล่มในพื้นที่ประเทศไทยมีรูปแบบการวิบัติได้หลายรูปแบบ โดยส่วนมากจะเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นในระดับตื้น (Shallow landslides) ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบการวิบัติเป็นการเลื่อนไถลลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่ของมวลดิน (Translational slide) และเป็นปัญหาทางด้านเสถียรภาพของลาดดินเอียงที่ไม่คงที่ ซึ่งจะแปรผันไปตามปัจจัยภายนอกที่มากระตุ้น [1] โดยกำลังรับแรงเฉือนของดินเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำในดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำฝนที่ได้รับ ปริมาณน้ำในดินที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้แรงดึงน้ำในดิน (Soil suction) ลดลง [2] เป็นผลให้กำลังรับแรงเฉือนลดลง ทำให้มีโอกาสเกิดดินถล่มสูงขึ้น รัฐบาลไทยเล็งเห็นความสำคัญของปัญหาน้ำท่วมดินโคลนถล่ม จึงมีการจัดตั้งหน่วยงานเพื่อเฝ้าระวังและเตือนภัยล่วงหน้า (Early warning) ของภัยพิบัติที่รวมทั้งปัญหาน้ำหลากและการวิบัติของลาดดิน ระบบเตือนภัยล่วงหน้าเป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการจัดการภัยพิบัติแผ่นดินถล่ม น้ำท่วม และเศษขยะไหล โดยทั่วไปในปัจจุบันระบบเตือนภัยประเมินระดับของความเสี่ยงจากภัยพิบัติตามการสังเกตข้อมูลในเวลาจริง รวมถึงการวัดของระยะเวลาและความรุนแรงของปริมาณน้ำฝน และการเปรียบเทียบความเข้มฝนที่มีเกณฑ์ความเสี่ยงที่สอดคล้องกัน

ระบบเตือนภัยล่วงหน้าที่น่าสนใจคือวิธีทางกายภาพ [3], [4], [5] ในวิธีการนี้ระดับการแจ้งเตือนจะมีการประเมินผ่านการตอบสนองของความชื้นในช่วงเวลาจริง ซึ่งอ่านค่าจากชุดอุปกรณ์การตรวจสอบ โดยส่วนใหญ่จะเป็นตัววัดความชื้น (Moisture sensors), เครื่องมือวัดและสังเกตระดับน้ำ (Piezometers), และเครื่องมือวัดแรงดึงความชื้น (Tensiometers) ตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องมือวัดมี

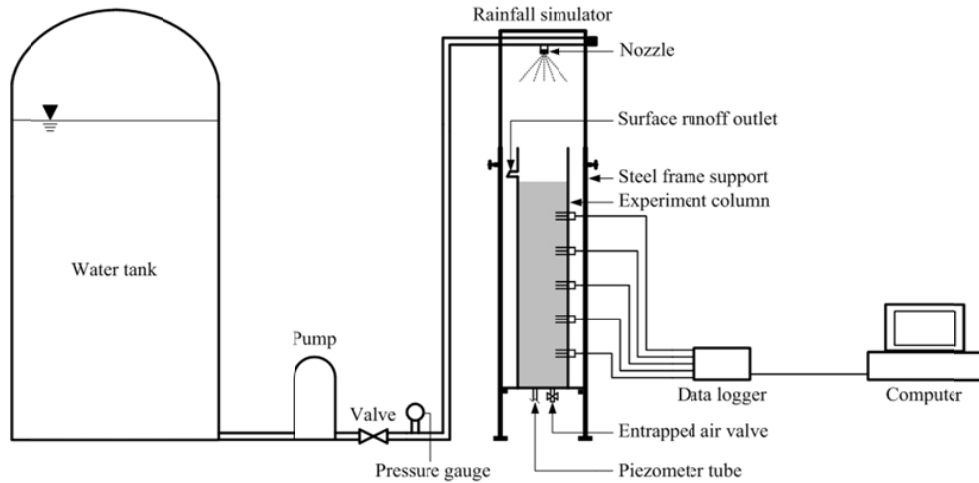
ความสำคัญต่อระบบเตือนภัยล่วงหน้าที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ Tohari et al. [3] ดำเนินการทดสอบด้วยชุดการทดสอบขนาดใหญ่ในลาดดินที่เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อให้เข้าใจกลไกการวิบัติของลาดดินที่เกิดจากเหตุการณ์ฝนตก มีการรายงานว่ารณะนาวิบัติส่วนใหญ่เกิดใกล้พื้นผิวของลาดดิน และถูกควบคุมด้วยการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ได้แนะนำว่าอุปกรณ์ตรวจสอบควรจะติดตั้งอยู่ใกล้กับพื้นผิวลาดดิน และแนะนำระดับเตือนภัยไว้สองระดับเรียกว่าเตือนภัยล่วงหน้าและเตือนภัยขั้นสุดท้าย การเตือนล่วงหน้าจะเริ่มขึ้นเมื่อแผ่นความชื้นเคลื่อนผ่านตัววัดความชื้น ส่วนการเตือนครั้งสุดท้ายจะเริ่มขึ้นในไม่ช้าหลังจากที่แผ่นความชื้นไปถึงชั้นตื้นน้ำ และระดับน้ำใต้ดินเริ่มเพิ่มขึ้น มีงานวิจัยหลายบทความ [6], [7], [8], [9] ได้รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันอากาศภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินขึ้นอยู่กับดัชนีการซึม [10] ทำการศึกษาพฤติกรรมของลาดดินต่อการตอบสนองต่อน้ำฝนของดิน 4 ชนิด โดยการจำลองลาดดินแบบหนึ่งมิติและสองมิติ ใช้ค่าความเข้มฝน 2 ค่า (3.35×10^{-6} และ 1.85×10^{-5} เมตร/วินาที) และระยะเวลาฝนตก 1 และ 24 ชั่วโมง เพื่อสังเกตการณ์การซึมของน้ำฝนสู่ลาดดิน แล้ววัดค่าแรงดึงน้ำ (Suction) เปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองทั้งสองแบบ พบว่าการทดสอบทั้งสองแบบให้ผลการทดสอบที่เหมือนกัน และงานวิจัยในช่วงเวลาที่ผ่านมา [10], [11] เกี่ยวกับเรื่องการเปลี่ยนแปลงความชื้นในลาดดินต้น มีการทดลองวิจัย รวบรวมข้อมูล และรายงานผลการศึกษาว่าความชื้นของลาดดินไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในช่วงการไหลซึม งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปสู่การศึกษาอิทธิพลของความเข้มฝนต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่เพิ่มขึ้นในมวลดินในดินที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำ โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานตามแบบจำลองของ Green and Ampt [12] ดินตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นดินที่อยู่ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยดินโคลนถล่มในเขตจังหวัดนครราชสีมา แบบจำลองถูกสร้างขึ้นเพื่อทำความเข้าใจและประเมินการตอบสนองทางอุทกวิทยาในความเข้มฝนต่าง ๆ เทียบกับระยะเวลาของการรับน้ำฝน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินโอกาสการเกิดดินถล่มในพื้นที่เสี่ยงภัยดังกล่าว

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

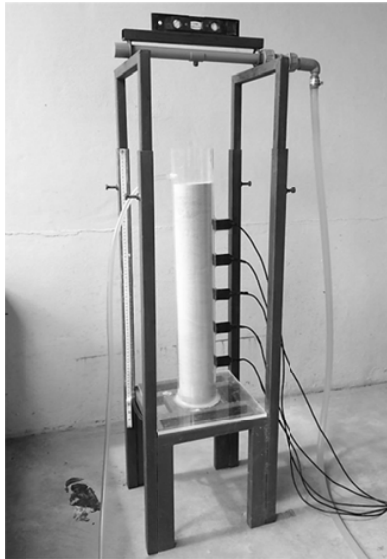
2.1 รายละเอียดของแบบจำลอง

แบบจำลองการซึมในหนึ่งมิติถูกใช้สำหรับการศึกษาค้างนี้ แผนภาพและภาพถ่ายของแบบจำลองแสดงไว้ใน

รูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ รูปที่ 1 แสดงภาพรวมของแบบจำลองที่ประกอบด้วยสี่ส่วนหลัก ส่วนแรกคือชุดปั้มน้ำแบบความดันคงที่ เพื่อควบคุมน้ำที่ไหลเข้าระบบให้มีอัตราการคงที่



รูปที่ 1 แผนผังของแบบจำลองการทดสอบ

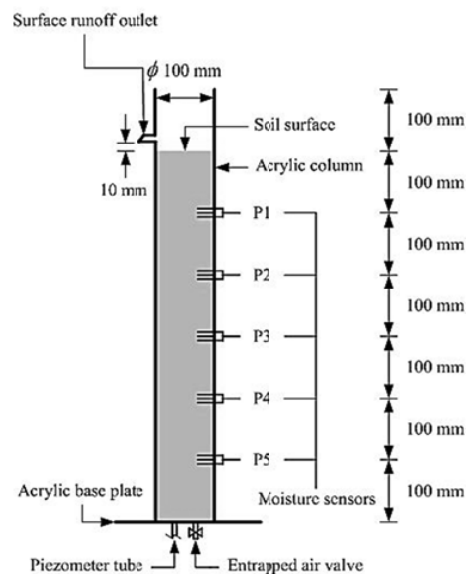


รูปที่ 2 ภาพถ่ายของแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ

ส่วนที่สองคือแบบจำลองน้ำฝนเทียม (Simulated rainfall simulator) เป็นท่อ PVC และติดหัวสเปรย์ขนาดเล็กเพื่อจำลองเป็นน้ำฝน ควบคุมปริมาณน้ำเข้าด้วยวาล์วและมาตร วัดแรงดันน้ำ ส่วนที่สามคือ

แบบจำลองท่ออะคริลิก ส่วนที่สี่คือเซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นและดาต้าล็อกเกอร์เก็บข้อมูล รายละเอียดของแบบจำลองถูกอธิบายไว้ในส่วนต่อไปนี้

2.1.1 แบบจำลองท่ออะคริลิก



รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของแบบจำลองท่ออะคริลิก

รายละเอียดของท่ออะคริลิคแสดงไว้ในรูปที่ 3 แบบจำลองมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกเพื่อใช้บรรจุดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ทำด้วยอะคริลิคใสเพื่อให้ง่ายต่อมองเห็นและสังเกตพฤติกรรมกรรมกรซึมของน้ำฝนมีความหนา 5 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 มิลลิเมตร และสูง 700 มิลลิเมตร ฐานของแบบจำลองทำจากแผ่นอะคริลิคใสหนา 10 มิลลิเมตร ขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร ด้านข้างด้านหนึ่งของท่ออะคริลิคเจาะรูขนาดกว้าง 3 มิลลิเมตร สูง 30 มิลลิเมตร จำนวน 5 รู มีระยะห่างจากฐาน 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อใช้ในการติดตั้งตัววัดความชื้น (Moisture sensors) และอีกด้านหนึ่งของท่อถูกเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เพื่อติดตั้งท่อระบายน้ำผิวดินที่ระดับเหนือผิวดิน 10 มิลลิเมตร (โดยในการศึกษาพิจารณาให้มีน้ำข้างเหนือผิวดินที่ระดับ 10 มิลลิเมตร) ที่ฐานด้านล่างเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู เพื่อติดตั้งตัววัดระดับน้ำใต้ดิน (Piezometer) ด้วยท่อพลาสติกใสปลายเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ใช้ในการสังเกตการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำเมื่อน้ำฝนซึมผ่านดินจากผิวดินจนถึงชั้นที่บ้น้ำที่จำลองขึ้น หลังจากนั้นคือระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้น อีก 1 รูทำการติดตั้งวาล์วระบายอากาศเพื่อไล่อากาศที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินขณะที่น้ำกำลังซึมผ่านดิน ที่อาจจะส่งผลต่อการวัดปริมาณความชื้น ที่พื้นล่างภายในแบบจำลองได้ใช้แผ่นจีโอเทคโพลีเอทิลีนไว้เพื่อให้น้ำไหลผ่านออกเมื่อน้ำฝนซึมถึงชั้นที่บ้น้ำ และทำหน้าที่กั้นไม่ให้ดินที่ใช้ในการทดสอบเข้าไปอุดตันอยู่ภายในท่อสังเกตระดับน้ำและท่อระบายอากาศ

2.1.2 ระบบแบบจำลองน้ำฝน

แบบจำลองน้ำฝนจะถูกติดตั้งไว้เหนือแบบจำลองแห้งดิน ประกอบไปด้วยถังเก็บน้ำที่มีความจุขนาด 2000 ลิตร ป้อนน้ำแบบความดันคงที่ วาล์วควบคุมการไหลของน้ำมาตรวัดความดันน้ำ ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร และหัวสเปร์ยขนาดเล็ก โดยที่น้ำจะถูกส่งจากถังเก็บน้ำซึ่งอาศัยแรงดันจากปั้มน้ำความดันคงที่ ถูกควบคุมปริมาณน้ำเข้าด้วยวาล์วและมาตรวัดแรงดันน้ำก่อนส่งผ่านเข้าไปในท่อพลาสติกที่ติดหัวสเปร์ยที่ปล่อยน้ำออกให้คล้ายกับลักษณะการกระจายของน้ำฝนที่ตกลงมาสู่ผิวดิน โดยท่อพลาสติกที่ปล่อยน้ำฝนจะมี

หัวสเปร์ยเพียงหนึ่งหัวเท่านั้น ซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่กึ่งกลางท่อและมีตำแหน่งอยู่ตรงกลางของแบบจำลองท่ออะคริลิค ระดับปลายหัวสเปร์ยอยู่เหนือปลายขอบท่ออะคริลิคที่ระยะ 400 และ 800 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าปริมาณความชื้นฝนอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 70 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ใช้ความดันอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งถูกควบคุมด้วยวาล์วระบายน้ำ ความชื้นฝนที่ต้องการถูกสอบเทียบความสม่ำเสมอของความชื้นฝน (Uniformity coefficients, CU) ได้อธิบายไว้โดย [13] ขอบเขตความชื้นฝนอยู่ระหว่าง 90% ถึง 99% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองน้ำฝนนี้มีความน่าเชื่อถือที่จะนำมาใช้ในการทดสอบได้ เมื่อทำการทดสอบจะเลือกระยะห่างของหัวสเปร์ยถึงปลายขอบท่ออะคริลิคที่สามารถให้ค่าปริมาณความชื้นฝนที่ต้องการ ได้จากการสอบเทียบความสม่ำเสมอของความชื้นฝนโดยใช้กระป๋อง 1 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร วางไว้ด้านบนของแบบจำลองขณะที่ปล่อยน้ำฝนเพื่อวัดปริมาณน้ำฝนกับเวลาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของแต่ละความชื้นฝนถูกหาด้วยความสม่ำเสมอของการกระจายน้ำฝน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$CU = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n I_i - I_m}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (1)$$

เมื่อ I_i คือ ปริมาณความชื้นฝนที่วัดได้ของแต่ละกระป๋อง, I_m คือ ปริมาณความชื้นฝนเฉลี่ยที่วัดได้ของทุกกระป๋อง, และ n คือ จำนวนกระป๋องทั้งหมด (ในการศึกษานี้ $n = 1$)

2.1.3 อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น



(a)



(b)

รูปที่ 4 (a) Moisture sensors (b) Data logger

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับระยะเวลาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นโดยใช้ดินตัวอย่างหนึ่งชนิด การศึกษาครั้งนี้ใช้หัวรับข้อมูลชนิด Frequency Domain Reflectometry (FDR) รุ่น 5TE ดังแสดงในรูปที่ 4 (a) จำนวน 5 ตัว ซึ่งสามารถวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิของดิน ถูกติดตั้งเพื่อสังเกตการณ์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น (Volumetric water content, θ_v) ตลอดการทดสอบ หัววัดความชื้นประเภทนี้จะมีขนาดเล็กซึ่งมีขนาดเท่ากับ 145 มิลลิเมตร \times 33 มิลลิเมตร \times 7 มิลลิเมตร (ยาว \times กว้าง \times หนา) หัววัดความชื้นถูกติดตั้งในด้านหนึ่งของท่ออะคริลิก แต่ละตัวมีระยะห่างกัน 100 มิลลิเมตร หัววัดความชื้นวัดค่าความชื้นเชิงปริมาตร (θ') ของดิน โดยรวบรวมข้อมูลและบันทึกไว้ในตัวเก็บข้อมูล (Data logger, Em50) ดังแสดงในรูปที่ 4 (b)

ก่อนทำการทดสอบ, ผลของ θ' ที่ได้จากหัววัดความชื้นถูกสอบเทียบกับการคำนวณความชื้นในดินที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้การบดอัดดินมาตรฐานและเสียบหัววัดความชื้นลงในดินที่ใช้ในการทดสอบที่ทำการบดอัดไว้แล้ว ซึ่งรู้ความหนาแน่นของดินและปริมาณความชื้นในมวลดิน โดยการคำนวณจาก

$$\theta_w = w \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (2)$$

เมื่อ w คือ ปริมาณความชื้นในมวลดิน (%), γ_d คือ หน่วยน้ำหนักแห้งของดิน (กรัม/ลบ.ซม.), γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ (เท่ากับ 1 กรัม/ลบ.ซม.)

เมื่อทำการสอบเทียบอุปกรณ์แล้วนำข้อมูลที่ได้อ่านค่าความสัมพัทธ์ระหว่างความชื้นเชิงปริมาตรที่ได้จากหัววัดความชื้น (θ') กับปริมาณความชื้นในดิน (w) และความชื้นเชิงปริมาตรที่ถูกต้อง (θ) พบว่าค่าความชื้นที่ได้จากสมการกับค่าที่อ่านได้จากหัววัดความชื้นมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ค่าความชื้นที่ได้จากหัววัดความชื้น เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการ หัววัดความชื้นจะต้องปรับแก้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องโดยสมการที่ (3) ถือเป็นที่ยอมรับในการศึกษาครั้งนี้ โดยได้ค่า $r^2 = 0.956$

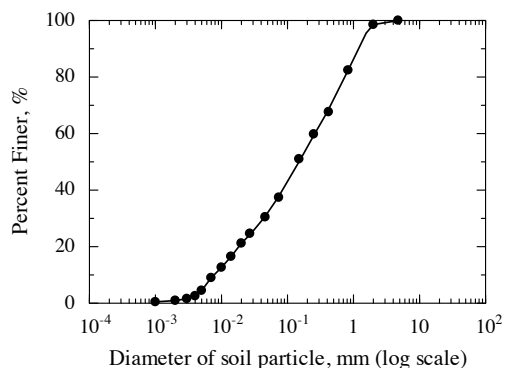
$$\theta = 1.2233\theta' - 0.0649 \quad (3)$$

3. คุณสมบัติดิน

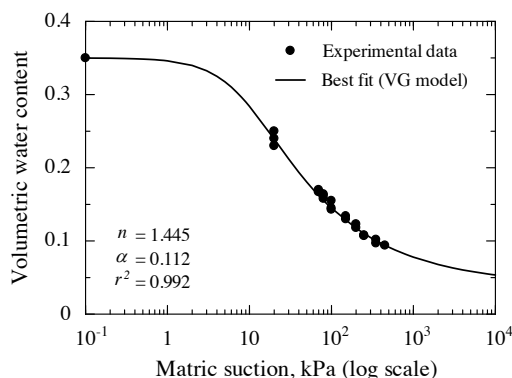


รูปที่ 5 สภาพดินตัวอย่างที่เก็บจากบ้านคลองสะทอน

ดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินตัวอย่างที่ถูกเก็บมาจากบ้านคลองสะทอน ตำบลวังหมี อำเภอน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นพื้นที่ตั้งสถานีเตือนภัย ระบบเตือนภัยน้ำหลากดินถล่ม ระดับเฝ้าระวัง โดยทำการเก็บตัวอย่างดินแบบมีการรบกวนตัวอย่างขณะเก็บ (Disturbed) โดยเก็บที่ความลึกช่วงผิวดินถึง 1 เมตร ทำการจำแนกชนิดดินด้วยระบบ USCS (Unified Soil Classification System) ตามมาตรฐาน ASTM D 2487 ได้เป็นดินประเภท silty sand (SM) กราฟแสดงขนาดเม็ดดินดังรูปที่ 6 หาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of soil) ตามมาตรฐาน ASTM D 854 หาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน (Permeability) ตามมาตรฐาน ASTM D 2434-68 หาค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry density) ตามมาตรฐาน ASTM D 698-70 การทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 3080 และทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงจุดเมทริกกับความชื้น (SWCC) โดยวิธีห่อแรงดันทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 6836-02 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงจุดเมทริกกับความชื้นดิน ดังรูปที่ 7 และแสดงคุณสมบัติทั้งหมดของดินตัวอย่างตามตารางที่ 1



รูปที่ 6 การกระจายขนาดของเม็ดดิน



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงคาพิวลาเรียกับความสัมพันธ์ (SWCC)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติ	ค่า
ประเภทดิน (USCS classification)	SM
% ดินเหนียว	2
% ดินตะกอน	36
% ดินทราย	62
ความถ่วงจำเพาะ, G_s	2.59
หน่วยน้ำหนักแห้ง, ρ_d (กรัม/ลบ.ซม.)	1.64
ความซึมผ่านน้ำ, k_s (เมตร/วินาที)	4.17×10^{-6}
ความพรุน, n	0.350
พารามิเตอร์ความแข็งแรงของดิน	
ค่ามุมเสียดทานภายใน, ϕ (°)	31
ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน, c (กิโลปาสกาล)	14

4. ขั้นตอนการทดสอบ

4.1 การเตรียมตัวอย่างดินทดสอบ

เริ่มต้นด้วยการนำดินตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบทั้งหมดตากทิ้งไว้ที่อากาศแห้งเป็นเวลา 20 วัน จนดินมีลักษณะ

ตารางที่ 2 โปรแกรมการทดสอบ

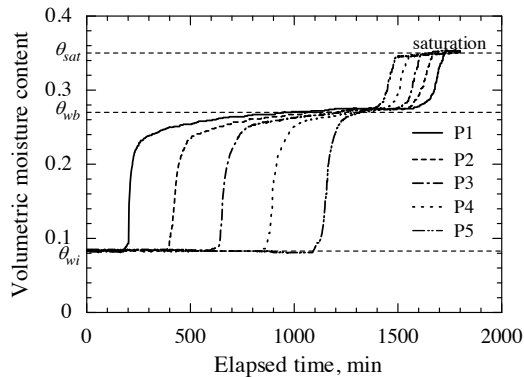
การทดสอบที่	ดินที่ใช้	หน่วยน้ำหนักแห้ง, ρ_d (กรัม/ลบ.ซม.)	ความชื้นผืน, i (มม./ซม.)	ความชื้นผืน/ความซึมผ่านน้ำ i/k_s
1	SM	1.64	5	0.333
2	SM	1.64	10	0.667
3	SM	1.64	20	1.333

แห้งหรือมีความชื้นค่าหนึ่ง หลังจากนั้นทำการบดอัดดินลงในแบบจำลองท่ออะคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 700 มิลลิเมตร ให้ดินมีความสูง 600 มิลลิเมตร ซึ่งการบรรจุดินลงในแบบจำลองนั้นจำเป็นที่จะต้องทำให้ดินทดสอบเป็นเนื้อเดียวกัน การบดอัดดินจะต้องมีการควบคุมหน่วยน้ำหนักแห้ง โดยแบ่งการบดอัดดินออกเป็น 12 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นจะมีความหนา 50 มิลลิเมตร การตอกบดอัดในแต่ละชั้นจะต้องมีจำนวนครั้งที่เท่า ๆ กัน ดินที่ถูกควบคุมในแต่ละชั้นจะมีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 1.64 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าอัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.549 ในระหว่างขั้นตอนการบดอัดดินนั้นต้องทำการติดตั้งตัววัดความชื้นที่ผ่านการสอบเทียบเรียบร้อยแล้วเข้ากับรูที่อยู่ทางด้านข้างของท่ออะคริลิกด้วย

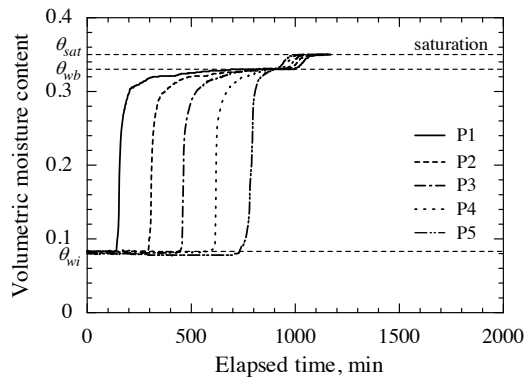
4.2 เงื่อนไขการทดสอบ

แบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติได้รับการออกแบบมาเพื่อที่จะศึกษาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ระยะเวลาการซึมของปริมาณน้ำฝนและการเกิดน้ำขังบนผิวดิน ดินที่ใช้ในการศึกษาจะทำการทดสอบ 3 การทดสอบ โดยแต่ละการทดสอบใช้ค่าปริมาณความชื้นผืนที่แตกต่างกัน การทดสอบแต่ละครั้งถูกกำหนดปริมาณความชื้นผืนในช่วงที่ต่ำกว่าใกล้เคียง และสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินคือ 5, 10 และ 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในการทดสอบที่ปริมาณความชื้นผืนสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน จะมีการเกิดน้ำขังที่ผิวดิน ในการศึกษานี้จะพิจารณาระดับน้ำขังที่ผิวดิน 10 มิลลิเมตร และมีการระบายน้ำออกอย่างอิสระ ข้อมูลจะถูกบันทึกตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสภาวะที่ปริมาณความชื้นมีค่าคงที่ โดยโปรแกรมการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 2

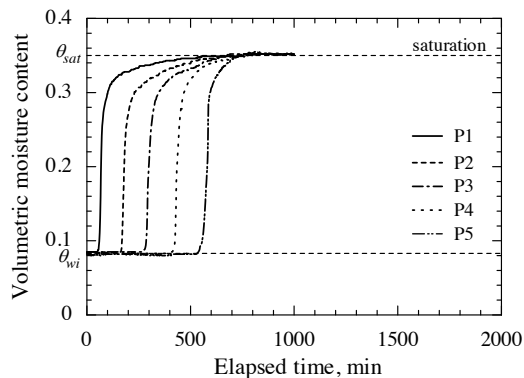
5. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเชิงปริมาตรกับเวลา

- (a) ปริมาณความชื้น 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
- (b) ปริมาณความชื้น 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
- (c) ปริมาณความชื้น 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

การตอบสนองของความชื้นที่ตรวจวัดได้ระหว่างทำการทดสอบถูกแสดงไว้ในรูปที่ 8 การทดสอบทั้งหมดใช้ตัววัดความชื้นในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นที่ระดับความลึกต่าง ๆ ตัววัดความชื้น P1, P2, P3, P4 และ P5 ตรวจวัดความชื้นที่ระดับความลึก 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตรจากผิวดิน ตามลำดับ

รูปที่ 8 (a) แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรขึ้นกับเวลา สำหรับปริมาณความชื้น 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ($i < k_s = 4.17 \times 10^{-6}$ ม./วินาที หรือ 15 มม./ชม.) โดยอัตราส่วนระหว่างค่าความชื้นต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินเท่ากับ 0.333 ($i/k_s = 0.333$) ความชื้นเชิงปริมาตรเริ่มต้น (θ_{wi}) ของดินที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.081 ถึง 0.085 เมื่อแปลงแล้วมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 2.3% ถึง 2.4% หลังจากเริ่มทำการทดสอบปล่อยน้ำฝนตัววัดความชื้น P1 ที่ความลึก 100 มิลลิเมตรตอบสนองต่อความชื้นครั้งแรกเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาทีจากน้ำฝนที่ตกลงสู่ผิวดินทำให้แผ่นความชื้น (Wetting front) เคลื่อนตัวลงสู่ด้านล่างของชั้นดิน การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จากปริมาณความชื้นเริ่มต้นจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ 0.270 หรือมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 77% เมื่อแผ่นความชื้นเคลื่อนที่ลงถึงความลึก 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตร ตัววัดความชื้น P2, P3, P4 และ P5 เริ่มตอบสนองต่อความชื้นที่เคลื่อนตัวลงมาครั้งแรกเมื่อเวลาผ่านไป 400, 620, 870 และ 1100 นาที ตามลำดับ และมีค่าความชื้นเชิงปริมาตรคงที่ที่ 0.272 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความชื้นที่ตำแหน่ง P1 แผ่นความชื้นจะเคลื่อนที่ไปตามความลึกของชั้นดินด้วยอัตราเร็วคงที่ (มีค่าเท่ากับค่าความชื้นที่ใช้ทดสอบ) ไปถึงความชื้นที่เรียกว่าความชื้นพื้นหลัง (θ_{wb}) ระยะเวลาที่ตัววัดความชื้นแต่ละตำแหน่งตรวจวัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีพื้นฐานการซึมของ Green and Ampt [12] ระดับความลึกของแผ่นความชื้น ณ ตำแหน่งใด ๆ คือปริมาณน้ำที่ดินได้รับในหนึ่งหน่วยเวลาต่อความสามารถการรับน้ำของดิน หรือกล่าวได้ว่าปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงในหนึ่งหน่วยเวลาสามารถเคลื่อนที่ไปได้หนึ่งหน่วยระยะทาง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$Z_w = \frac{i \times t}{\theta_1 - \theta_0} \quad (4)$$

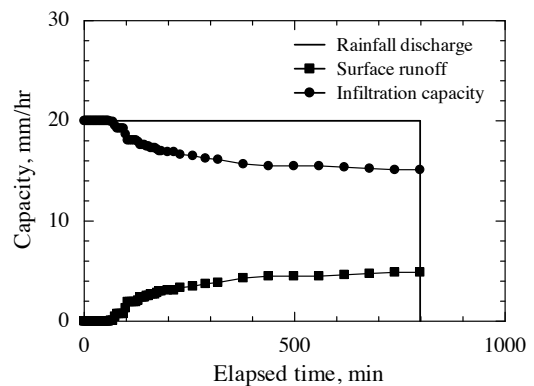
เมื่อพิจารณาในเทอมของระยะเวลา ณ ความลึก Z_w ใด ๆ สามารถเขียนใหม่ได้ว่า :

$$t = \frac{Z_w(\theta_1 - \theta_0)}{i} \quad (5)$$

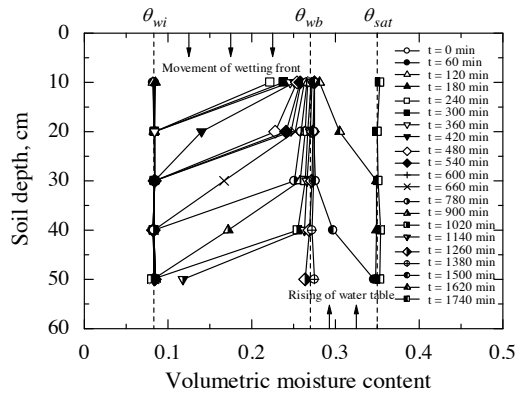
หลังจากนั้นพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นขึ้นอีกครั้งหนึ่งจากการเคลื่อนตัวของแผ่นความชื้น เนื่องจากพื้นของแบบจำลองไม่สามารถระบายน้ำได้ ทำให้ดินอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained state) ดังนั้นน้ำที่ซึมลงสู่ด้านล่างของชั้นดินจะเกิดการสะสมและเพิ่มระดับขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นสาเหตุทำให้เกิดการตอบสนองของตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P5 อีกครั้งเมื่อเวลาผ่านไป 1350 นาที ทำให้ค่าปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 0.272 ไปถึงความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (θ_{sat}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.350 หรือมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 100% เมื่อระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นเกินระดับตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P5 จากนั้นตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P4, P3, P2 และ P1 ตอบสนองอีกครั้งที่เวลาประมาณ 1430, 1500, 1560 และ 1600 นาที ตามลำดับ มีการเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นเชิงปริมาตรจาก 0.272 ถึง 0.350 ซึ่งมีค่าเท่ากับที่ตำแหน่ง P5

รูปที่ 8 (c) แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรต่อเวลา สำหรับปริมาณความชื้น 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งอยู่ในช่วงที่สูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน โดยอัตราส่วนระหว่างค่าความชื้นเพิ่มต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินเท่ากับ 1.333 ($i/k_s = 1.333$) ค่าความชื้นเชิงปริมาตรเริ่มต้นของดินมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.081 ถึง 0.085 หลังจากเริ่มทำการทดสอบปล่อยน้ำฝนตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P1 ตอบสนองต่อความชื้นครั้งแรกเมื่อเวลาผ่านไป 50 นาที และมีค่าปริมาณความชื้นคงที่ที่ 0.350 ตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P2, P3, P4 และ P5 เริ่มตอบสนองต่อความชื้นเมื่อเวลาผ่านไป 160, 270, 405 และ 545 นาที ตามลำดับ โดยค่าความชื้นเชิงปริมาตรที่วัดได้จากตัววัดความชื้นทุกตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันและคงที่

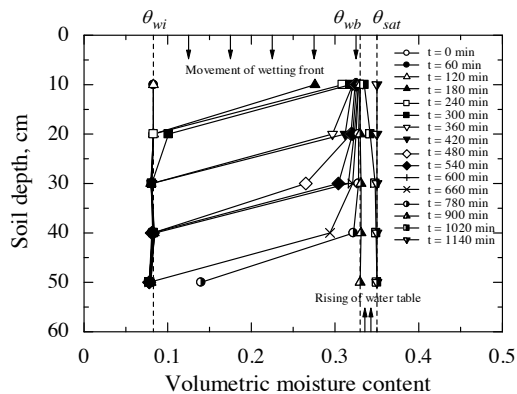
ตลอดการทดสอบที่ 0.350 หรือมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 100% จากการทดสอบพบว่าเมื่อเวลาทดสอบผ่านไป 58 นาที เกิดน้ำขัง (Ponding) ที่ผิวดิน น้ำฝนซึมผ่านผิวดินไปได้ 150 มิลลิเมตร ในช่วงเวลานี้ดินมีความชื้นผ่านน้ำที่สภาวะอิ่มตัว (Saturated state) จนสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ เป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียวคือช่วงการไหลซึม และจากผลการทดสอบยังพบว่าแผ่นความชื้นจะเคลื่อนที่ช้าลงในช่วงแรก และในเวลาถัดไปจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราคงที่ไปตลอดการทดสอบ เนื่องจากก่อนเริ่มการทดสอบดินมีลักษณะแห้ง โดยทางกายภาพคือมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่ำ จัดเป็นดินที่อยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แรงดันน้ำจะมีค่าเป็นลบ เมื่อเริ่มการทดสอบปล่อยน้ำฝนในช่วงแรกผิวหน้าของดินจะดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีความต่างศักย์ของการซึมอยู่มาก ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำ [2] และเกิดแรงคาพิลลารี (Capillary) เป็นแรงดึงน้ำที่เกิดเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำ ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างความเชื่อมแน่น (Cohesion) ของน้ำและการประสาน (Adhesion) ระหว่างน้ำกับผิวของอนุภาคเม็ดดินตรงผิวของน้ำ (Air - water interface) ประกอบกับมีแรงดันอากาศ (Pore - air pressure) อยู่ภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน จึงทำให้ความสามารถการไหลซึมของน้ำช้าลง ดังผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 9



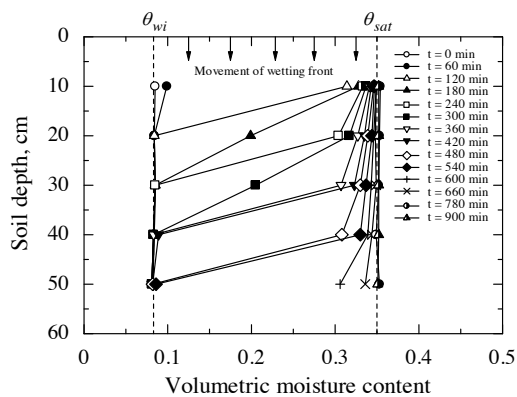
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการซึมผ่านกับระยะเวลาทดสอบ



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของแท่งดินกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเชิงปริมาตร
 (a) ปริมาณความชื้น 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
 (b) ปริมาณความชื้น 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
 (c) ปริมาณความชื้น 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

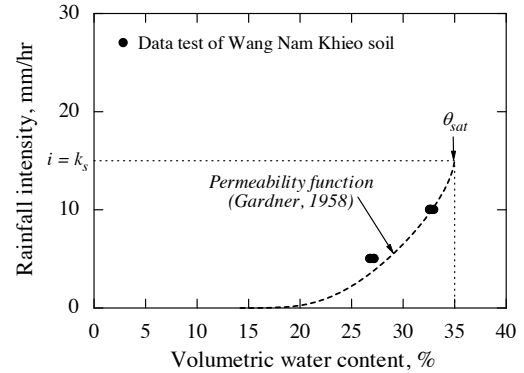
รูปที่ 10 (a) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรตามความลึกของแท่งดิน ในช่วงเวลาที่ปล่อยน้ำฝนสำหรับความชื้นฝนเท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้นเกิดจากขบวนการสองขั้นตอน คือ 1) การไหลซึมของน้ำฝนผ่านผิวดิน และ 2) การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในช่วงแรกได้จากค่าความชื้นเชิงปริมาตรเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นจาก 0.083 ถึง 0.270 เป็นความชื้นที่เกิดขึ้นหลังจากการเคลื่อนตัวของผิวดินขึ้นจากผิวดิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในขั้นตอนนี้ดินยังอยู่ในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ขณะที่ช่วงที่สองจะเกิดหลังจากการเคลื่อนตัวของผิวดินความชื้นมาถึงชั้นที่บีบน้ำของแบบจำลอง จนกระทั่งเริ่มเกิดการสะสมของปริมาณความชื้นอย่างต่อเนื่องและเกิดการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ทำให้มีค่าความชื้นเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นจนถึง 0.350 ซึ่งเท่ากับค่าปริมาณความชื้นที่สถานะอิ่มตัว (θ_{sat}) ขนาดของปริมาณความชื้น (θ_{wb}) ที่เพิ่มขึ้นมีความคล้ายคลึงกันกับการศึกษาที่มีมาก่อนหน้านี้ [3], [11], [14], [15], [16], [17] และรูปที่ 10 (c) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรตามความลึกของแท่งดิน ในช่วงเวลาที่ปล่อยน้ำฝนสำหรับความชื้นฝนเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง สังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเกิดขึ้นเพียงช่วงแรกหรือช่วงการไหลซึมเท่านั้น และคงที่ไปตลอดจนสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ เนื่องจากบริเวณผิวดินอยู่ในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำตั้งแต่เริ่มเกิดน้ำขังที่ผิวดิน ความชื้นเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นคือ 0.083 ไปถึงสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (θ_{sat}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.350 หรือมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 100%

เปรียบเทียบระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรต่อเวลาแสดงไว้ในรูปที่ 8 (b) และการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรกับความลึกของแท่งดิน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 10 (b) สำหรับการทดสอบที่ค่าความชื้นฝนเท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน สังเกตเห็นได้ว่าขนาดของปริมาณความชื้น (θ_{wb}) ที่เพิ่มขึ้นในช่วงการไหลซึมมีค่าใกล้เคียงปริมาณความชื้นที่สถานะอิ่มตัวเวลาในการตอบสนองต่อปริมาณความชื้นจะเร็วกว่าที่

ความชื้นฝน 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และตอบสนองช้ากว่าที่ความชื้นฝน 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยกล่าวได้ว่าปริมาณความชื้นฝนมีผลต่อเวลาการตอบสนองต่อปริมาณความชื้นในช่วงการไหลซึม โดยการเคลื่อนตัวของแผ่นความชื้นจะเร็วขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความชื้นฝน ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่เคยมีการศึกษามา [11] ที่ได้ทำการทดสอบการตอบสนองทางอุทกวิทยาและการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินต้นด้วยแบบจำลองลาดดินสองมิติ

จากรูปที่ 9 เมื่อเริ่มการทดสอบปล่อยน้ำฝน สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของน้ำที่ระบายออกมาทางผิวดินคือปริมาณน้ำฝนสะสม สำหรับความชื้นฝน 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยในช่วง 0 ถึง 56 นาทีแรกน้ำฝนสามารถซึมผ่านผิวดินได้ทั้งหมด หมายความว่าดินมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอัตราเร็วของการซึมผ่านมีค่าเท่ากับปริมาณความชื้นฝนที่ใช้ในการทดสอบ โดยการไหลซึมผ่านผิวดินไปตามความลึกของชั้นดินจะเป็นไปตามกฎของ Darcy (Darcy's law) [18] น้ำฝนที่ปล่อยออกจากแบบจำลองน้ำฝนสามารถคำนวณเป็นปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่พื้นผิวดินมีค่าคงที่ที่ 261.80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ หลังจากนั้นเมื่อชั้นผิวดินเริ่มอิ่มตัวด้วยน้ำ คืออัตราเร็วของน้ำฝนสูงกว่าค่าการซึมผ่านน้ำอิ่มตัวของดิน จะก่อให้เกิดน้ำขังที่ผิวดินหรือเรียกว่าปริมาณน้ำฝนส่วนเกิน (Rainfall excess rate) หลังจากสภาวะนี้ดินจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้น้อยและช้าลงจนถึงนาที่ที่ 400 น้ำระบายออกที่ผิวดินจะมีอัตราการไหลออกคงที่ไปตลอดการทดสอบ และมีอัตราการซึมผ่านดินที่น้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าระบบได้เข้าสู่สภาวะการไหลแบบคงตัว (Steady state) ซึ่งค่าแรงดันอากาศ ณ สภาวะนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของความชื้นฝนและความลึกของน้ำที่ขังบนผิวดิน โดยค่าอัตราการซึมผ่านสุดท้ายของน้ำภายในดินจะมีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองการซึมของ Philip [19] และเป็นไปตามแนวคิดของ Horton [20] ที่ใช้สมการคณิตศาสตร์มาอธิบายธรรมชาติของอัตราการซึมผ่านน้ำผ่านผิวดินว่าจะมีค่าสูงสุดในระยะเวลาแรกและจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าคงที่ตลอดไป ดังสมการต่อไปนี้

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (6)$$



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นพื้นหลัง (θ_{wb}) กับปริมาณความชื้นฝน (i)

จากรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นพื้นหลัง (θ_{wb}) ที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบกับปริมาณความชื้นฝน (i) ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าขนาดของ θ_{wb} ขึ้นกับปริมาณความชื้นฝน โดยความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้ว่าในช่วงแรกความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดินต่ำกว่าค่าความชื้นฝน เมื่อพิจารณาที่ชั้นผิวดินบางๆ ไม่นานหลังจากที่น้ำฝนแรกซึมเข้าไป น้ำฝนจะถูกกักเก็บไว้ในดินชั้นนี้ ซึ่งการไหลออกของน้ำในชั้นนี้ต่ำกว่าค่าความชื้นฝน ทำให้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นค่าการซึมผ่านในดินชั้นนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในชั้นนี้มีอัตราการไหลออกของน้ำในดินเท่ากับอัตราการไหลเข้าของน้ำฝนและไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตลอดเหตุการณ์ฝนตก ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละชั้นดิน แผ่นความชื้นจะเคลื่อนที่ไปตามความลึกของชั้นดินซึ่งอยู่ในช่วงระหว่างปริมาณความชื้นเริ่มต้นกับปริมาณความชื้นที่ θ_{wb}

อย่างไรก็ตามผลการศึกษานี้ทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมกรการไหลของน้ำในดิน ซึ่งจะนำไปใช้เป็นตัวบ่งชี้และประเมินโอกาสการเกิดดินโคลนถล่มในเขตพื้นที่อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมาต่อไป และเป็นความเข้าใจเบื้องต้นที่จะนำไปสู่การพัฒนาการติดตั้งและระบุตำแหน่งของเครื่องมือเตือนภัยล่วงหน้าให้มีประสิทธิภาพต่อการแจ้งเตือน คือสามารถแจ้งเตือนได้ทันเวลาที่ก่อให้เกิดพิบัติที่จะเกิดขึ้นเพื่อช่วยบรรเทาความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่เสี่ยงภัย

6. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาการไหลของน้ำในดินเนื่องจากอิทธิพลของน้ำฝนของดินตัวอย่างที่เก็บมาจากอำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเมื่อดินอยู่ภายใต้สภาวะรับน้ำฝนแบบคงที่ ด้วยแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติภายใต้เงื่อนไขไม่มีการระบายน้ำใต้ดิน และค่าความชื้นฝนอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า ใกล้เคียง และสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน สามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 ปริมาณน้ำฝนเป็นเงื่อนไขหลักที่มีอิทธิพลต่อการซึมผ่านผิวดิน โดยที่ขนาดของ θ_{wb} ขึ้นกับปริมาณความชื้นฝน ที่ความชื้นฝนสูงจะส่งผลให้แรงดันน้ำภายในมวลดินสูงกว่าที่ความชื้นฝนต่ำ เป็นสาเหตุทำให้เกิดการวิบัติของลาดดินเมื่อเกิดพายุฝนรุนแรงได้เร็วกว่า

6.2 ผลการทดสอบชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ณ สภาวะหนึ่งเมื่ออัตราเร็วของน้ำฝนสูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน อัตราการไหลซึมผ่านผิวดินจะช้าลงในช่วงเวลาแรกตามความลึกของชั้นดิน เนื่องจากที่ชั้นผิวดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและเกิดแรงคาพิลลารีภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินขณะได้รับน้ำฝน และจะมีอัตราการซึมผ่านคงที่ไปตลอดการทดสอบในเวลาถัดไป

6.3 อิทธิพลของความชื้นฝนที่แสดงโดยอัตราส่วนระหว่างค่าความชื้นฝนต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน (i/k_s) จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อ $i/k_s < 1$ การเคลื่อนตัวของแผ่นความชื้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสองช่วง คือช่วงการไหลซึม และช่วงการอิ่มตัวเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำเมื่อแผ่นความชื้นเคลื่อนตัวถึงชั้นที่เปียก และอัตราการซึมของน้ำฝนผ่านผิวดินจะมีค่าเท่ากับค่าความชื้นฝน ในขณะที่ $i/k_s > 1$ การเคลื่อนตัวของแผ่นความชื้นจะเกิดขึ้นในช่วงของการไหลซึมเท่านั้น จากปริมาณความชื้นเริ่มต้น (θ_{wi}) ไปสู่ความชื้น ณ สภาวะอิ่มตัว (θ_{sat})

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การศึกษานายชนาธิป ศุภโกทยาน

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Santi Thaiyuenwong, *Landslide Hazard Analysis by Geotechnical Engineering Method Considering Dynamic Factors in Andaman Coastal Area of Southern Thailand*. Bangkok, Thailand: Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 2010. (in Thai)
- [2] Delwyn G. Fredlund, *The emergence of unsaturated soil mechanics*, A.W. Clifton, G.W. Wilson, and S.L. Barbour, Eds. Canada: National Research Council of Canada, 1996.
- [3] Adrin Tohari, Makoto Nishigaki, and Mitsuru Komatsu, "Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, no. 5, pp. 575-587, May 2007.
- [4] R. Greco, A. Guida, E. Damiano, and L. Olivares, "Soil water content and suction monitoring in model slopes for shallow flowslides early warning applications," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 35, no. 3-5, pp. 127-136, 2010.
- [5] John Eichenberger, Alessio Ferrari, and Lyesse Laloui, "Early warning thresholds for partially saturated slopes in volcanic ashes," *Computers and Geotechnics*, vol. 49, pp. 79-89, April 2013.
- [6] Daniel Pradel and Glen Raad, "Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 119, no. 2, pp. 315-332, February 1993.
- [7] Lee Min Lee, Nurly Gofar, and Harianto Rahardjo, "A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability," *Engineering Geology*, vol. 108, no. 3, pp. 272-285, October 2009.



- [8] Wei Chao Li et al., "Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope," *Engineering Geology*, vol. 153, pp. 105-113, February 2013.
- [9] Abid Ali et al., "Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modelled by infinite slopes," *Engineering Geology*, vol. 179, pp. 102-116, September 2014.
- [10] L.M. Lee, A. Kassim, and N. Gofar, "Performances of two instrumented laboratory models for the study of rainfall infiltration into unsaturated soils," *Engineering Geology*, vol. 117, no. 1-2, pp. 78-89, January 2011.
- [11] Avirut Chinkulkijniwat et al., "Hydrological responses and stability analysis of shallow slopes with cohesionless soil subjected to continuous rainfall," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 53, no. 12, pp. 2001-2013, August 2016.
- [12] W. Heber Green and G.A. Ampt, "Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils," *Journal of Agricultural Science*, vol. 4, no. 1, pp. 1-24, May 1911.
- [13] M.J. Hall, P.M. Johnston, and H.S. Wheather, "Evaluation of overland flow models using laboratory catchment data. I. An apparatus for laboratory catchment studies," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 34, no. 3, pp. 277-288, 1989.
- [14] Ching-Chuan Huang, Chien-Li Lo, Jia-Shiun Jang, and Lih-Kang Hwu, "Internal soil moisture response to rainfall-induced slope failures and debris discharge," *Engineering Geology*, vol. 101, no. 3-4, pp. 134-145, October 2008.
- [15] She-Chieh Yuin Ching-Chuan Huang, "Experimental investigation of rainfall criteria for shallow slope failures," *Geomorphology*, vol. 120, no. 3-4, pp. 326-338, August 2010.
- [16] Raj Hari Sharma and Hajime Nakagawa, "Numerical model and flume experiments of single- and two-layered hillslope flow related to slope failure," *Landslides*, vol. 7, no. 4, pp. 425-432, December 2010.
- [17] Son Phi, William Clarke, and Ling Li, "Laboratory and numerical investigations of hillslope soil saturation development and runoff generation over rainfall events," *Journal of Hydrology*, vol. 493, pp. 1-15, June 2013.
- [18] Edgar Buckingham, *Studies on the movement of soil moisture*. United States, Washington: Washington, Govt. Print. Off., 1907.
- [19] J.R. Philip, "The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution," *Soil Science*, vol. 83, no. 5, pp. 345-357, 1957.
- [20] Robert E. Horton, "The role of infiltration in the hydrologic cycle," *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 14, no. 1, pp. 446-460, June 1933.