

พฤติกรรมคาร์โบไฮเดรตและเสถียรภาพของลาดดินต้น
ที่มีหน่วยแรงยึดเกาะ



นายธานีป สุโกทยาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**SEEPAGE BEHAVIOR AND STABILITY
OF COHESIVE SHALLOW SLOPE**



Chanathip Supotayan

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2017

พฤติกรรมกรไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดินตื้นที่มีหน่วยแรงยึดเกาะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ศ. ดร. สุตสันติ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง)

กรรมการ



(ศ. ดร. พานิช วุฒิพิภพ)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม้นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชนาธิป สุโกทยาน : พฤติกรรมการไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดินตื้นที่มีหน่วยแรงยึดเกาะ (SEEPAGE BEHAVIOR AND STABILITY OF COHESIVE SHALLOW SLOPE)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 105 หน้า.

ปัญหาดินถล่มเนื่องจากฝนเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินและการเปลี่ยนแปลงกำลังของดิน การซึมของฝนลงสู่ลาดดินทำให้ความชื้นในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนรวมทั้งเสถียรภาพของลาดดิน ความเข้าใจในปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวจึงมีส่วนสำคัญในการปรับปรุงและพัฒนาระบบการเตือนภัยดินถล่มให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพบนหลักการลาดดินอนันต์เพื่อความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับดินถล่มแบบตื้น ด้วยการศึกษาค้นคว้าการตอบสนองทางชลศาสตร์ในลาดดินจากแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติภายใต้สภาวะฝนที่เป็นไปได้ 3 สภาวะ ประกอบด้วย 1) สภาวะฝนที่มีความเข้มฝนต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน 2) ความเข้มฝนใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน และ 3) ความเข้มฝนสูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษามี 2 ประเภท จากการทดสอบพบว่า ภายใต้สภาวะฝนที่ 1 การตอบสนองความชื้นในดินจะแบ่งออกเป็นสองช่วงอย่างชัดเจนประกอบด้วยช่วงการซึมและช่วงการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ในช่วงแรกความชื้นในดินจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ลงของระนาบความชื้น (Wetting front) จากความชื้นเริ่มต้น (θ_{wi}) ไปถึงความชื้นที่เรียกว่าความชื้นหลังระนาบความชื้น (θ_{wb}) เมื่อระนาบความชื้นดังกล่าวเคลื่อนไปถึงชั้นที่น้ำที่ถูกจำลองขึ้น ความชื้นในดินจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินจาก θ_{wb} ไปถึงความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (θ_{sat}) เมื่อเปรียบเทียบสภาวะฝนที่ 2 และ 3 พบว่าขนาดของ θ_{wb} จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของความเข้มฝน จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ θ_{sat} เมื่อความเข้มฝนมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน นอกจากนี้ผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นจะเร็วขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มฝน ดังนั้นการตอบสนองความชื้น ณ สภาวะฝนที่แตกต่างดังกล่าวมาข้างต้นจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการวิบัติรวมทั้งความลึกของระนาบวิบัติของลาดดิน จากข้อสรุปที่ได้ เมื่อนำไปประเมินเสถียรภาพด้วยหลักการลาดดินอนันต์ พบว่าสำหรับทุกๆความเข้มฝนที่ดัชนีการซึม (i/k_s) มีค่าน้อยกว่า 1.0 เสถียรภาพของลาดดินจะค่อยๆลดลงตามความลึกของระนาบความชื้น (Z_w) ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาหน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิผลของดิน (c') ของดินที่มีค่าหน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิผลสูงจะส่งผลให้เสถียรภาพของลาดดินสูงตามไปด้วย ทั้งนี้การวิบัติของลาดดินอาจเกิดได้ทั้งในช่วงระยะการซึมหรือระยะอิ่มตัวด้วยน้ำ ขึ้นอยู่กับค่าของหน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิผลมุมเสียดทานภายในประสิทธิผล และความชันของลาดดิน จากการวิเคราะห์ดังกล่าวในงานวิจัยนี้

สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการระบุตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการติดตั้งเครื่องมือเพื่อเฝ้าระวังดิน
ถล่มระดับต้นได้ในอนาคต ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินเมื่อเกิดภัยพิบัติดังกล่าว



สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา ชนาธิป ๗ โภทอน

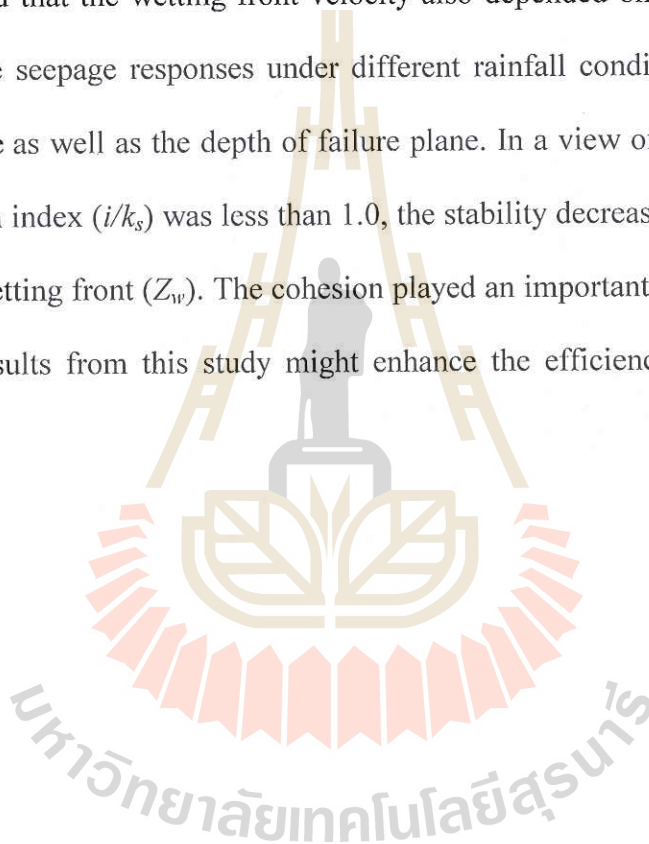
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ธีรยุทธ

CHANATHIP SUPOTAYAN : SEEPAGE BEHAVIOR AND STABILITY
OF COHESIVE SHALLOW SLOPE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D., 105 PP.

SEEPAGE/RAINFALL INFILTRATION/WETTING FRONT/SHALLOW SLOPE/
STABILITY ANALYSIS/ONE-DIMENSIONAL INFILTRATION MODEL

Landslides triggered by rainfall are widely known disaster related to the interactions between the change of soil water content and strength of the sloping ground. The infiltration of rainwater into the soil results in increment of soil water content, and 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 thesis presents a series of laboratory experiments together with the stability analysis on the infinite slope principle for a basic understanding of shallow landslide. This research investigated the seepage response in the soil using a one-dimensional infiltration model under 3 rainfall conditions depending on the rainfall intensity (i) and the coefficient of saturated permeability of the soil (k_s); 1) $i < k_s$, 2) $i \simeq k_s$, 3) $i > k_s$. Two soil types used in this study were silty sand (SM) and poorly graded sand with silt (SP-SM). 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_w) 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 reached the impervious layer, the water content in the soil increased due to the rising of water table. The magnitude of θ_{wb} increased with increasing the magnitude of rainfall intensity. The magnitude of θ_{wb} was equal to θ_{sat} when the rainfall intensity was equal to the permeability coefficient of the soil. In addition, the results showed that the wetting front velocity also depended on the rainfall intensity. Therefore, the seepage responses under different rainfall conditions might affect the time of failure as well as the depth of failure plane. In a view of slope stability, when the infiltration index (i/k_s) was less than 1.0, the stability decreased with increasing the advance of wetting front (Z_w). The cohesion played an important role to the stability of the slope. Results from this study might enhance the efficiency of current warning system.



School of Civil Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature Ch. Supotayan

Advisor's Signature Sr. FMS

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจอย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร หัวหน้าสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวางแผนการศึกษาเป็นอย่างดี

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำให้คำปรึกษาในการเขียนและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และดูแลเอาใจใส่ในการศึกษาของผู้วิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ดันเส็ง กรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

เจ้าหน้าที่ศูนย์บรรณสาร เจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยและพัฒนา เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการปฏิพิกลศาสตร์ เจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา เจ้าหน้าที่สำนักวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยดูแลเอาใจใส่และอำนวยความสะดวกในเรื่องเอกสารต่างๆจนการศึกษาเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมด้านการศึกษา และให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

ชนาธิป สุโกทยาน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทัศนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำในดิน.....	7
2.2.1 ความชื้นดิน.....	7
2.2.2 การวัดความชื้นในดิน.....	9
2.2.3 แรงดึงคือน้ำในดิน.....	9
2.2.4 สมดุลความชื้น.....	10
2.2.5 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน.....	11
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15

สารบัญ (ต่อ)

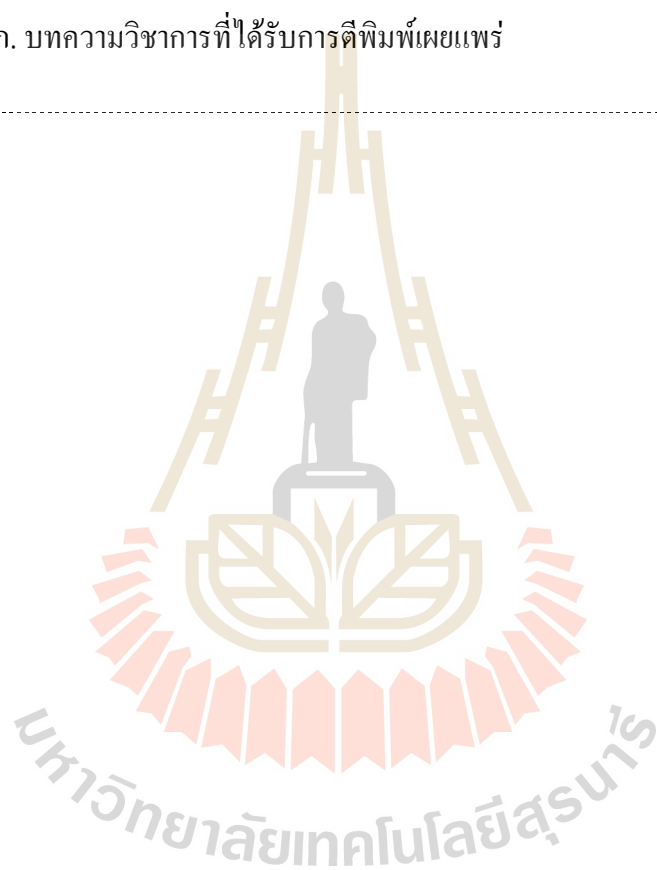
หน้า

2.3.1	เสถียรภาพของลาดดินภายใต้กระบวนการอุทกวิทยา.....	15
2.3.2	การตอบสนองของลาดดินต่อกระบวนการทางอุทกวิทยา.....	19
2.3.3	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการณ์น้ำภายในลาดดิน.....	20
2.3.4	ปัจจัยกระตุ้นภายนอกที่ส่งผลต่อการวิบัติในลาดดินธรรมชาติ.....	21
2.3.5	แบบจำลองกายภาพของลาดดิน.....	23
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1	บทนำ.....	33
3.2	การเลือกและเตรียมตัวอย่างดิน.....	33
3.3	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน.....	36
3.4	การสร้างแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ และแบบจำลองน้ำฝน.....	39
3.4.1	รายละเอียดของแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ.....	39
3.4.2	รายละเอียดของแบบจำลองน้ำฝน.....	39
3.5	อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Sensor) และการสอบเทียบ.....	44
3.5.1	ตัววัดความชื้น (Sensor).....	44
3.5.2	การสอบเทียบตัววัดความชื้น.....	45
3.6	ขั้นตอนการทดสอบการไหลซึมของน้ำฝนในห้องปฏิบัติการ.....	47
3.6.1	เตรียมตัวอย่างดินทดสอบ.....	47
3.6.2	เงื่อนไขการทดสอบ.....	49
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล.....	50
4.1	บทนำ.....	50
4.2	พฤติกรรมการณ์การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน.....	50
4.3	ความสามารถในการไหลซึมของน้ำฝนผ่านผิวดิน.....	72
4.4	การประเมินเสถียรภาพลาดดินที่ขึ้นภายใต้สภาวะรับน้ำฝน.....	77
5	สรุปผลการวิจัย.....	83

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	90
ประวัติผู้เขียน.....	105



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ.....	38
3.2 โปรแกรมการทดสอบ.....	49



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 น้ำท่วม-ดินถล่ม ในพื้นที่อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์.....	2
2.1 รูปแบบจำลองลักษณะของ Translational slide.....	7
2.2 วัฏจักรของน้ำ.....	11
2.3 หลักการของคาร์ซี.....	12
2.4 อัตราการไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม.....	13
2.5 การวิเคราะห์แบบลาดอนันต์ (Infinite slope).....	18
2.6 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำกับชั้นดินภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราน้ำเข้า-ออก บริเวณผิวดิน.....	20
2.7 แบบจำลองการซึม Philip (1957).....	22
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมและการไหลผิวดิน.....	22
2.9 แบบจำลองลาดดินและแบบจำลองน้ำฝน Huang et al., (2009).....	24
2.10 แสดงการวิบัติของลาดดินตะกอนปนทราย Huang et al., (2009).....	25
2.11 แสดงการวิบัติของลาดดินทราย Huang et al., (2010).....	25
2.12 แสดงช่วงเวลาการวิบัติของลาดดิน Huang et al., (2009, 2010).....	26
2.13 แบบจำลองลาดดิน Lee (2011).....	27
2.14 กราฟแสดงค่าแรงดันน้ำตามความลึกของดิน Lee (2011).....	28
2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำกับความลึกของดิน ระยะเวลาของน้ำฝน ที่ 1 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ของดินแต่ละชนิด Lee (2011).....	29
2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฝนกับปริมาณความชื้น (Chinkulkijniwat et al., (2016).....	30
2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความปลอดภัยกับความลึก (Chinkulkijniwat et al., (2016).....	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกวิกฤติกับดัชนีการซึม (Chinkulkijniwat et al., (2016)	31
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	34
3.2 สภาพผิวดินของพื้นที่บริเวณเก็บตัวอย่างดิน	35
3.3 แสดงการจำแนกขนาดและการกระจายของเม็ดดิน	36
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดเมตริกกับความชื้นดิน (SWCC)	36
3.5 แสดงรายละเอียดของแบบจำลองท่ออะคริลิกหนึ่งมิติ	40
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นฝนกับความดันน้ำ	42
3.7 แผนผังของแบบจำลองการทดสอบ	43
3.8 ภาพถ่ายของแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ	44
3.9 หัววัด (Sensor)	45
3.10 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) รุ่น Em 50	45
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ได้จากการคำนวณกับความชื้นที่ได้จากหัววัดความชื้น	47
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรกับเวลา ของดินวังน้ำเขียว	56
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของแท่งดินกับความชื้นเชิงปริมาตร ของดินวังน้ำเขียว	59
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรกับเวลา ของดินสังเคราะห์	62
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของแท่งดินกับความชื้นเชิงปริมาตร ของดินสังเคราะห์	65
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกการซึมของน้ำฝนกับเวลาของการซึม กรณี $i < k_s$	68
4.6 แสดงความเร็วในการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นจากผิวดินถึงชั้นที่บ้น้ำ	70
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรความชื้นหลังจากการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้น (w_b) กับปริมาณความชื้นฝน	71
4.8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำฝนที่ปล่อยลงสู่แท่งดินกับความจุการซึมและ การไหลออกที่ผิวดิน ของดินวังน้ำเขียว	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำฝนที่ปล่อยลงสู่ทางดินกับความจุการซึมและการไหลออกที่ผิวดิน ของดินสังเคราะห์.....	76
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นฝนกับเวลาที่เกิดน้ำขัง.....	76
4.11 แสดงอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกของการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นที่ค่าความชื้นฝน (i) และมุมลาดชันของดิน (s) ต่างๆ.....	80
4.12 แสดงอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกของการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นที่ความชันลาดดินเท่ากับ 30 องศา และดัชนีการซึมเท่ากับ 1.000.....	81

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัดของการเคลื่อนที่
C_u	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ
c'	=	หน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิผลของดิน
f	=	ความสามารถในการซึมของดิน
f_c	=	ความสามารถในการซึมสุดท้ายของดิน
f_0	=	ความสามารถในการซึมเริ่มต้นของดิน
FS	=	อัตราส่วนความปลอดภัย
i	=	ปริมาณความชื้นฝน
i_c	=	ความสามารถการแทรกซึมของน้ำฝน
i/k_s	=	ดัชนีการซึม
I_i	=	ปริมาณความชื้นฝนที่วัดได้ของแต่ละกระป๋อง
I_m	=	ปริมาณความชื้นฝนเฉลี่ยที่วัดได้ของทุกกระป๋อง
I_p	=	การแทรกซึมสะสม
h_p	=	เสดแรงดัน
H	=	เสดทางชลศาสตร์
K	=	ฟังก์ชันของความชื้น หรือ เสดความดัน
K_s	=	สภาพนำชลศาสตร์ของดินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ
K_u	=	สภาพนำชลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ
K_w	=	สภาพนำชลศาสตร์ของดินที่ wetting front
n	=	พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่บ่งบอกอัตราการลดลงของความชื้นเชิงปริมาณกับแรงดึงน้ำ หลังจากที่อากาศเริ่มเข้าไปในมวลดิน
N	=	จำนวนกระป๋องทั้งหมด
q	=	อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
Q	=	อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ
S_e	=	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

t_p	=	เวลาที่เกิดน้ำขัง
u_a	=	แรงดันอากาศในช่องว่างเม็ดดิน
$(u_a - u_w)$	=	แรงดึงจุดเมทริก หรือ แรงคาพิลลารี
u_w	=	แรงดันน้ำในช่องว่างเม็ดดิน
V_t	=	ปริมาตรทั้งหมดของตัวอย่างดิน
V_w	=	ปริมาตรน้ำ
w	=	ความชื้น โดยน้ำหนัก
W	=	น้ำหนักของดินทั้งหมด
W_s	=	น้ำหนักดินแห้ง
W_w	=	น้ำหนักน้ำ
Z_w	=	ระดับความลึกของระนาบความชื้น
	=	มุมลาดชันของดิน
H	=	ความแตกต่างระหว่างเสดของน้ำ
L	=	ระยะทางที่น้ำเคลื่อนที่
Z	=	ความลึกที่เปลี่ยนแปลงไป
\ddagger_R	=	กำลังรับแรงเฉือนของดิน
\ddagger_M	=	หน่วยแรงเฉือนที่เกิดตลอดกระบวนการวิบัติสมมุติ
\mathcal{E}	=	แรงดึงจุดน้ำในดิน
"	=	ความชื้นเชิงปริมาตรที่ถูกต้อง
" e	=	ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล
" r	=	ปริมาตรความชื้นที่สภาวะหยุดนิ่ง
" w	=	ปริมาตรความชื้น
" w_i	=	ปริมาตรความชื้นที่สภาวะเริ่มต้น
" w_b	=	ปริมาตรความชื้นหลังจากการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้น (Wetting front)
" sat	=	ความชื้นเชิงปริมาตรที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

θ'	=	ความชื้นเชิงปริมาตรที่ได้จากหัววัด
φ'	=	มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน
x_d	=	หน่วยน้ำหนักของดินรวม
x_w	=	หน่วยน้ำหนักของน้ำ (1 กรัม ต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร)
f	=	แรงดึงคูคอสโมติก
t	=	หน่วยแรงรวม
t_1^s	=	หน่วยแรงดึงคูคเมทริก
t_n'	=	หน่วยแรงตั้งฉากประสิทธิผล
r	=	พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่บ่งบอกค่าแรงดันน้ำ ณ จุดที่อากาศเริ่มเข้าไปในมวลดิน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ธรณีพิบัติภัยจากการเกิดดินถล่มถือเป็นภัยทางธรรมชาติที่พบได้บ่อยในทางภาคเหนือและภาคใต้ของประเทศไทย เนื่องจากภูมิประเทศเป็นลาดภูเขาสูงชัน และพบได้ในบางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือด้วย ถือเป็นภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสามารถป้องกันได้ค่อนข้างยาก ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นหลังจากที่มวลดินและหินที่ไหลมาตามลาดเขาได้เกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งดินถล่มมักเกิดตามมาหลังจากเกิดน้ำป่าไหลหลากในขณะที่เกิดพายุฝนตกหนักรุนแรงต่อเนื่อง หรือหลังจากเกิดฝนตกหนัก เมื่อฝนตกหนักน้ำจะซึมลงไปดินอย่างรวดเร็ว ทำให้การอุ้มน้ำของดินจะม่น้อยลงเพราะดินอึดตัวจากน้ำในดินที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันระดับน้ำใต้ผิวดินจะสูงขึ้นจนทำให้แรงต้านทานการเลื่อนไหลของดินลดลง เมื่อน้ำใต้ผิวดินมีระดับสูงขึ้นก็จะไหลภายในช่องว่างระหว่างดินลงไปตามความชันของลาดเขา เมื่อเปลี่ยนความชันก็จะเกิดเป็นน้ำผุดซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่มีการเลื่อนไหลของมวลดิน พื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มมักเป็นพื้นที่ที่อยู่ตามที่ลาดเชิงเขาหรือพื้นที่ลุ่มที่อยู่ติดกับภูเขาที่มีการพังทลายของดินสูง หรือเป็นแหล่งต้นน้ำที่มีอัตราในการทำลายป่าไม้สูง เป็นภูเขาหรือหน้าผาที่ผุพังง่าย ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.1 เป็นเหตุการณ์ดินถล่มซึ่งเป็นการวิบัติของลาดดินแบบดินเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ.2549 ที่เกิดขึ้นในเขตอำเภอลับแล อำเภอบ่อพลอง อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์, อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย และอำเภอเมือง จังหวัดแพร่ ทำให้มีผู้เสียชีวิต 83 คน บ้านเรือนเสียหายกว่า 600 หลัง มูลค่าความเสียหาย 308 ล้านบาท โดยพื้นที่เสี่ยงภัยดังกล่าวในประเทศไทยมีทั้งสิ้น 51 จังหวัด กระจายอยู่ในทุกภาคของประเทศไทย ส่วนในพื้นที่ 8 จังหวัดทางภาคเหนือตอนบนทั้งเชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน ลำปาง พะเยา แพร่ น่าน และแม่ฮ่องสอน มีพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดดินถล่มเมื่อมีปริมาณฝนมากกว่า 100-300 มิลลิเมตร และหน้าดินขาดรากไม้ยึดเหนี่ยวและพื้นที่มีความลาดเอียงมากกว่า 30 องศา ในทุกอำเภอของพื้นที่ภาคเหนือตอนบนมีสัญญาณเตือนภัยตามธรรมชาติที่อาจสังเกตได้ก่อนเกิดเหตุดินถล่ม เช่น เกิดฝนตกหนักติดต่อกันหลายวันจนดินในพื้นที่ต้นน้ำหรือที่ลาดเขาต้องอุ้มน้ำในปริมาณมาก น้ำในลำห้วยมีสีแดงขุ่นจากตะกอนที่ไหลมาตามลาด

เขา หากเกิดเหตุการณ์ในกรณีดังกล่าวเป็นสิ่งเตือนภัยตามธรรมชาติว่าอาจจะเกิดดินถล่มได้ ซึ่งการป้องกันอาจทำได้โดยการอพยพขึ้นไปอยู่บนที่สูง และรีบแจ้งต่อกันให้ทราบอย่างรวดเร็ว การแก้ไขปัญหาดินถล่มในระยะยาวอาจทำได้โดยการปลูกต้นไม้เพื่อช่วยซับน้ำและปลูกป่าในพื้นที่ต้นน้ำ จะช่วยป้องกันการเกิดดินถล่มได้ และในหมู่บ้านที่อาศัยอยู่ใกล้ที่ราบเชิงเขาไม่ควรสร้างบ้านหรือสิ่งปลูกสร้างขวางทางน้ำหรือลำห้วยมากเกินไป และติดตามข่าวพยากรณ์อากาศอย่างใกล้ชิดเพื่อให้ทราบถึงสภาพภูมิอากาศในแต่ละช่วงฤดูกาล



รูปที่ 1.1 น้ำท่วม-ดินถล่ม ในพื้นที่อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ เมื่อวันที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ.2549 (ที่มา : กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มิถุนายน 2554)

ปัญหาภัยพิบัติธรรมชาติดังกล่าวก่อให้เกิดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินของประชากรที่อาศัยอยู่ใกล้เคียงกับพื้นที่เสี่ยงภัย รัฐบาลไทยได้เล็งเห็นความสำคัญของปัญหาน้ำท่วมดินโคลนถล่ม จึงได้มีการจัดตั้งหน่วยงานเพื่อเฝ้าระวังและเตือนภัยล่วงหน้า (Early warning system) ของภัยพิบัติที่รวมทั้งปัญหาน้ำหลากและการวิบัติของลาดดิน โดยใช้ชื่อว่า ห้องปฏิบัติการเฝ้าระวังและเตือนภัยน้ำหลาก-ดินถล่ม สำนักวิจัยพัฒนาและอุทกวิทยา กรมทรัพยากรน้ำ ซึ่งได้ดำเนินโครงการติดตั้งระบบเตือนภัยล่วงหน้าสำหรับพื้นที่เสี่ยงอุทกภัยและดินถล่มในพื้นที่ลาดชันและที่ราบเชิงเขาเพื่อเป็นกลไกในการติดตามสถานการณ์ เฝ้าระวังและเตือนภัยที่เกิดจากน้ำท่วม

ฉับพลัน โดยมีสถานีหลักซึ่งมีหน้าที่ในการรับข้อมูลจากการตรวจวัด วิเคราะห์ แจ้งสถานการณ์ เผยแพร่ข้อมูลผ่านเว็บไซต์ และเฟ้าระวังสถานการณ์น้ำ และสถานีรองมีหน้าที่ในการบำรุงสถานี เตือนภัยให้มีความพร้อมใช้งาน และเฟ้าระวังสถานการณ์น้ำ ตั้งอยู่ที่สวนอุทกวิทยา สำนักงาน ทรัพยากรน้ำภาค 1-10 ในการเฟ้าระวังสถานการณ์น้ำเจ้าหน้าที่ประจำสถานีหลัก เจ้าหน้าที่ประจำ สถานีรอง และอาสาสมัครประจำสถานีสนามจะร่วมมือกันในการเฟ้าระวังสถานการณ์น้ำหลากดิน ถล่ม การเตือนภัยจะนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสมจากสถานีวัดที่ใกล้เคียงกับพื้นที่เสี่ยงภัยมา เปรียบเทียบกับเกณฑ์ปริมาณน้ำฝนวิกฤติของแต่ละพื้นที่ โดยกำหนดให้เกณฑ์ปริมาณน้ำฝนวิกฤติที่ 12 ชั่วโมง เท่ากับ 150 และ 180 มิลลิเมตร สำหรับพื้นที่ภาคเหนือและภาคใต้ ตามลำดับ การเตือนภัย จะถูกประเมินเป็น 3 ระดับ คือ (1) ระดับสีเขียว เป็นพื้นที่ที่มีค่าปริมาณน้ำฝนสะสมจากสถานีวัดอยู่ ระหว่าง 55 และ 65 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤติ ถือว่าเป็นพื้นที่ปลอดภัยต่อการเกิดดิน โคลนถล่ม (2) ระดับสีเหลือง เป็นพื้นที่ที่มีค่าปริมาณน้ำฝนสะสมอยู่ระหว่าง 65 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤติ จัดเป็นพื้นที่ที่มีการเตือนภัย ประชากรควรเตรียมพร้อมต่อการอพยพ (3) ระดับสีแดง เป็นพื้นที่ที่มีค่าปริมาณน้ำฝนสะสมมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำฝนสะสม วิกฤติ เป็นพื้นที่ที่ต้องมีการอพยพหรือย้ายไปอยู่ในที่ที่ปลอดภัย เพราะเสี่ยงต่อการเกิดน้ำหลากและ ดินโคลนถล่ม

อย่างไรก็ตาม การเตือนภัยเบื้องต้นดังกล่าวมานั้น เป็นการใช้เกณฑ์ปริมาณน้ำฝนวิกฤติที่ ตั้งอยู่บนข้อมูลของเหตุการณ์ในอดีตเป็นตัวแทนสำหรับการประเมินความเสี่ยงการเกิดภัยพิบัติใน พื้นที่เสี่ยงภัยที่กว้างขวาง ดังนั้น มีหลายปัจจัยที่สามารถเป็นตัวกระตุ้นการเกิดการวิบัติของลาดดินที่ ถูกละเอียดในการนำมาพิจารณาประเมินความเสี่ยง เช่น ความชื้นและแรงดึงน้ำเริ่มต้นในลาดดิน (Antecedent moisture content and Metric suction) การแปรเปลี่ยนของความเข้มฝนเชิงเวลาและเชิง พื้นที่ (Temporal and Spatial variations of rain intensity) รวมไปถึงการกระจายของพืชคลุมดินและ คุณสมบัติของดินแต่ละชนิด (Vegetation covers and Variation of soil property) ในพื้นที่เสี่ยงภัย ซึ่ง ปัจจัยเหล่านี้อาจจะส่งผลทั้งทางด้านเวลาและรูปแบบในการเกิดการวิบัติของลาดดินรวมไปถึงเกณฑ์ ปริมาณน้ำฝนวิกฤติที่ใช้ในการเตือนภัย

งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงการตอบสนองทางชลศาสตร์และทางกายภาพ ของดิน โดยมุ่งเน้นไปที่การวิบัติในลาดดินต้นซึ่งเป็นการวิบัติที่พบบ่อยที่สุดในลาดดินธรรมชาติ และการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในเชิงความเข้มจะถูกนำมาศึกษาเป็นปัจจัยแรก เนื่องจากเป็นปัจจัย กระตุ้นหลักของการวิบัติของลาดดินในประเทศไทย การศึกษานี้จะตั้งอยู่บนกลไกทางกายภาพที่

เกิดขึ้นจริงในลาดดินธรรมชาติ ประกอบด้วย กระบวนการไหลซึมของน้ำฝน (Rainfall infiltration) และการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน (Rising of water table) ภายในมวลดิน เพื่อให้เข้าใจอิทธิพลของความชื้นฝนต่อเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ดินที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวต่างกัน โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานตามแบบจำลองของ Green and Ampt (1911) ผลการศึกษาที่ได้รับจะถูกนำมาอธิบายร่วมกับหลักการวิเคราะห์เสถียรภาพ (Slope stability analysis) ที่สอดคล้องกับการวิบัติในลาดดินขึ้น ซึ่งระยะเวลาและความลึกของระนาบวิบัติขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินแต่ละประเภท

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

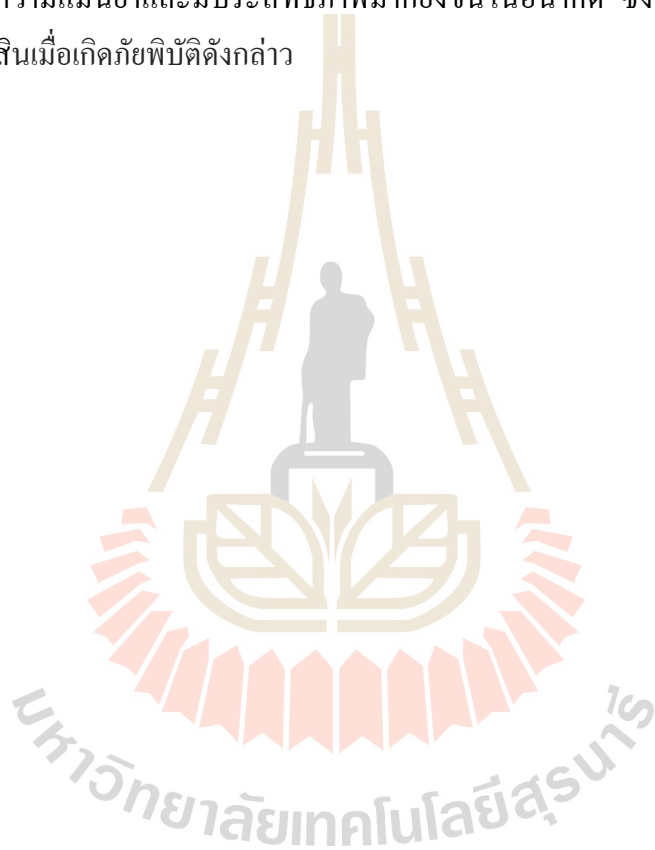
เพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นฝนต่อการตอบสนองทางชลศาสตร์และกลไกทางกายภาพของดินที่มีหน่วยแรงยึดเกาะ ประกอบด้วยกระบวนการไหลซึมของน้ำฝนภายในดิน การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน และการเกิดน้ำขังที่ผิวดิน เทียบกับระยะเวลา ด้วยแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ ผลที่ได้จากการทดสอบจะนำไปสู่การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินขึ้นที่มีค่าหน่วยแรงยึดเกาะและค่ามุมเสียดทานภายในต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เนื่องด้วยปัญหาการวิบัติของลาดดินธรรมชาติเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง โดยที่ดินในแต่ละพื้นที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวแตกต่างกันออกไป ในการติดตั้งเครื่องมือวัดการแจ้งเตือนภัยในสนาม รวมถึงการควบคุมปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องต่อการศึกษาก็เป็นเรื่องที่ยากต่อการดำเนินงานวิจัยนี้จึงนำมาศึกษาในห้องปฏิบัติการ ด้วยการสร้างแบบจำลองการไหลซึมของน้ำฝนในระบบหนึ่งมิติ (One-dimensional infiltration model) โดยแบบจำลองเป็นท่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 700 มิลลิเมตร และแบบจำลองน้ำฝนเทียม (Simulated rainfall simulator) โดยใช้ความชื้นฝน (i) ในการศึกษาเท่ากับ 5, 10, 20, 45, 70 และ 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้น (Moisture sensors) ที่แบบจำลองจำนวน 5 จุด และตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดสอบจะใช้ดินจำนวน 2 ประเภท ท้ายที่สุดผลการทดสอบการตอบสนองทางด้านชลศาสตร์และกลไกทางกายภาพของดินที่มีคุณสมบัติต่างกัน จะถูกนำมาอธิบายร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินอนันต์ (Infinite slope stability)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้จะเป็นองค์ความรู้เพื่อใช้อธิบายให้เข้าใจถึงอิทธิพลของความเข้มข้นต่อการตอบสนองทางชลศาสตร์และกลไกทางกายภาพของลาดดินตื้นที่มีค่าหน่วยแรงยึดเกาะและค่ามุมเสียดทานภายในต่างกัน รวมทั้งเสถียรภาพของลาดดินตื้น องค์ความรู้ที่ได้รับจะสามารถนำไปสู่การพัฒนาาระบบเตือนภัยเหตุการณ์ดินโคลนถล่มเบื้องต้น เพื่อให้การทำนายการวิบัติของลาดดินในธรรมชาติมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินเมื่อเกิดภัยพิบัติดังกล่าว



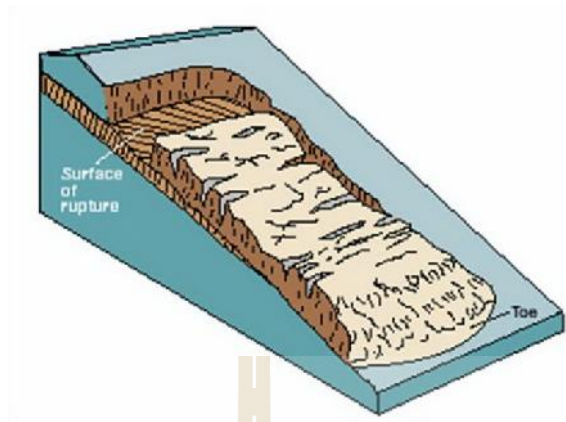
บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ปัญหาดินโคลนถล่มในประเทศไทยยังคงทวีความรุนแรงและเกิดบ่อยครั้งมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชากรที่อาศัยในบริเวณพื้นที่เสี่ยงภัย เนื่องจากภูมิอากาศโลกที่เปลี่ยนแปลงไปในทางลบ ปัญหาดินถล่มเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มักพบอยู่ในท้องถิ่นที่ตั้งอยู่ตามลาดเชิงเขา สาเหตุหลักของดินโคลนถล่ม คือ ดินบริเวณนั้นไม่สามารถรับน้ำหนักของตัวเองได้อีกต่อไป ดินถล่มมักเกิดพร้อมกับหรือตามมาจากน้ำป่าไหลหลากมักเกิดขึ้นในช่วงที่มีฝนตกหนัก โดยเฉพาะเมื่อฝนตกเป็นปริมาณมากและต่อเนื่องยาวนาน หรือบางครั้งเกิดจากการตัดต้นไม้บนพื้นที่ภูเขาและไหล่เขา เมื่อเกิดฝนตกหนักไม่มีต้นไม้ใหญ่ที่จะยึดดินไว้ทำให้เกิดดินถล่ม จากการรวบรวมข้อมูลรายงานสรุปเหตุการณ์ธรณีพิบัติภัยกรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 ถึง พ.ศ.2553 พบว่าการเกิดดินโคลนถล่มในพื้นที่ประเทศไทยมีรูปแบบการวิบัติได้หลายรูปแบบ โดยส่วนมากจะเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นในระดับตื้น (Shallow landslides) ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบการวิบัติเป็นการเคลื่อนไถลลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่ (Translational slide) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ภายหลังการวิบัติรูปแบบนี้มักจะเกิดการไหลร่วมด้วยเนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่มีจำนวนมากและมีความเร็วการไหลสูงตามไหล่เขา จึงทำให้เหตุการณ์ดินโคลนถล่มทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น

การเคลื่อนไถลลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่ (Translational slide) เป็นการวิบัติที่ระนาบการวิบัติขนานกับความลาดของผิวดินและเกิดการวิบัติในระดับตื้น ถึงแม้ชั้นดินจะมีความหนามากหรือน้อยก็ตาม ส่วนใหญ่เป็นการเคลื่อนที่ตามระนาบของโครงสร้างทางธรณีวิทยา เช่น ตามระนาบรอยแตก (Joint) ระนาบทิศทางการวางตัวของชั้นหิน (Bed) รอยต่อระหว่างชั้นดินและหิน โดยปกติแล้วจะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีความลาดชันสูง (Steep slope) และมีปริมาณฝนตกหนัก สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Limit equilibrium ที่สอดคล้องกับการวิบัติรูปแบบนี้จะนิยมใช้วิธีลาดดินอนันต์ (Infinite slope)



จุน้ำของดินต่ำสุด ส่วนดินเหนียวจะมีความจุน้ำสูงสุด ทั้งนี้เนื้อดินที่มีความหยาบจะยอมให้น้ำผ่านได้ง่ายกว่าเนื้อดินที่ละเอียด การแสดงปริมาณความชื้นดิน โดยน้ำหนัก เป็นการแสดงโดยการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักของความชื้นในดินกับน้ำหนักของดินอบแห้ง วิธีที่ง่ายและตรงที่สุดที่จะหาน้ำหนักของความชื้นและน้ำหนักดินอบแห้ง คือการชั่งน้ำหนักดินขณะชื้นและหลังอบแห้ง ความแตกต่างของน้ำหนักที่ได้จากการชั่งทั้งสองครั้งนี้ คือน้ำหนักความชื้นดิน น้ำหนักดินอบแห้ง คือน้ำหนักดินที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 95-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนมีน้ำหนักคงที่ ปริมาณความชื้นดินโดยน้ำหนักสามารถแสดงเป็นสัดส่วนของน้ำหนักความชื้นต่อน้ำหนักดินอบแห้ง โดยตรง เช่น กรัม/กรัม อาจแสดงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (Gravimetric moisture content, w) ก็ได้ ร้อยละโดยน้ำหนักคือสัดส่วนของน้ำหนักความชื้นคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักดินอบแห้ง

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ w คือ ความชื้นดินโดยน้ำหนัก, %

W_w คือ น้ำหนักน้ำ

W_s คือ น้ำหนักดินแห้ง

นอกจากจะคิดความชื้นดินโดยน้ำหนักแล้ว ยังสามารถคิดเป็นร้อยละของปริมาตรน้ำได้ด้วยเรียกว่า ความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric moisture content, v) หมายถึงปริมาตรน้ำที่มีอยู่ในดินต่อปริมาตรทั้งหมดของดิน ซึ่งตัวอย่างดินที่นำมาหาความชื้นโดยปริมาตรเป็นตัวอย่างชุดเดียวกันกับตัวอย่างดินที่ใช้หาความชื้นโดยน้ำหนัก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 (Scott, 2000)

$$v = \frac{V_w}{V_t} \times 100 = w \frac{X_d}{X_w} \quad (2.2)$$

เมื่อ v คือ ความชื้นดินโดยปริมาตร, %

V_w คือ ปริมาตรน้ำ

V_t คือ ปริมาตรทั้งหมดของตัวอย่างดิน

X_d คือ หน่วยน้ำหนักของดินรวม

x_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ

2.2.2 การวัดความชื้นในดิน

การวัดความชื้นโดยปริมาตรยังสามารถวัดด้วยหัววัดความชื้น (Sensor) ได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งเป็นวิธีวัดค่าความชื้นทางไฟฟ้า (Electrical method) ด้วยการวัดค่า Dielectric constant และยังแบ่งวิธีการหาความชื้นออกเป็น 3 วิธี คือ (1) Time Domain Reflectometer method : TDR (2) Frequency Domain Reflectometer method : FDR และ (3) Amplitude Domain Reflectometer method : ADR แสดงผลออกมาเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Topp et al., 1980) ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาหัววัดความชื้นให้สามารถวัดค่าความเค็มของดินพร้อมไปกับวัดค่าความชื้น โดยการแปลงค่า Dielectric constant เป็นค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) เพราะค่าความเค็มของดินแสดงในรูปของค่าการนำไฟฟ้า ค่าความเค็มมีหน่วยเป็นเดซิซีเมนต่อเมตร (dS/m) แต่อย่างไรก็ตามการวัดความชื้นของดินภายใต้เงื่อนไขที่มีความเค็ม หัววัดมักจะถูกจำกัดด้วยชนิดของดิน ปริมาณความเค็ม และความหนาแน่นของดิน ดังนั้นเมื่อใช้หัววัดความชื้นในการวัดความชื้นของดินจำเป็นจะต้องสอบเทียบอุปกรณ์ก่อน เพราะความเค็มจะทำให้ค่าความชื้นที่วัดได้มีปริมาณมากเกินความเป็นจริง (Inoue et al., 2008)

2.2.3 แรงดึงดูดน้ำในดิน (Soil suction or Total suction, Ψ)

แรงดึงดูดน้ำในดิน คือ แรงดูดยึดที่ดินมีกับน้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความชื้นในดินลดลง และเมื่อช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีขนาดเล็กลง น้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ได้สภาวะแรงดึงดูดที่เรียกว่า แรงดึงดูดเมทริกหรือแรงคาพิลลารี (Matric or Capillary suction, $(u_a - u_w)$) และแรงดึงดูดออสโมติก (Osmotic suction, f) คือความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองของดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินด้วย โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมากความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองจะได้น้ำมากด้วย (Fredlund and Rahardjo, 1993) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3 โดยที่ u_a คือแรงดันอากาศในช่องว่างดิน และ u_w คือ แรงดันน้ำในดิน

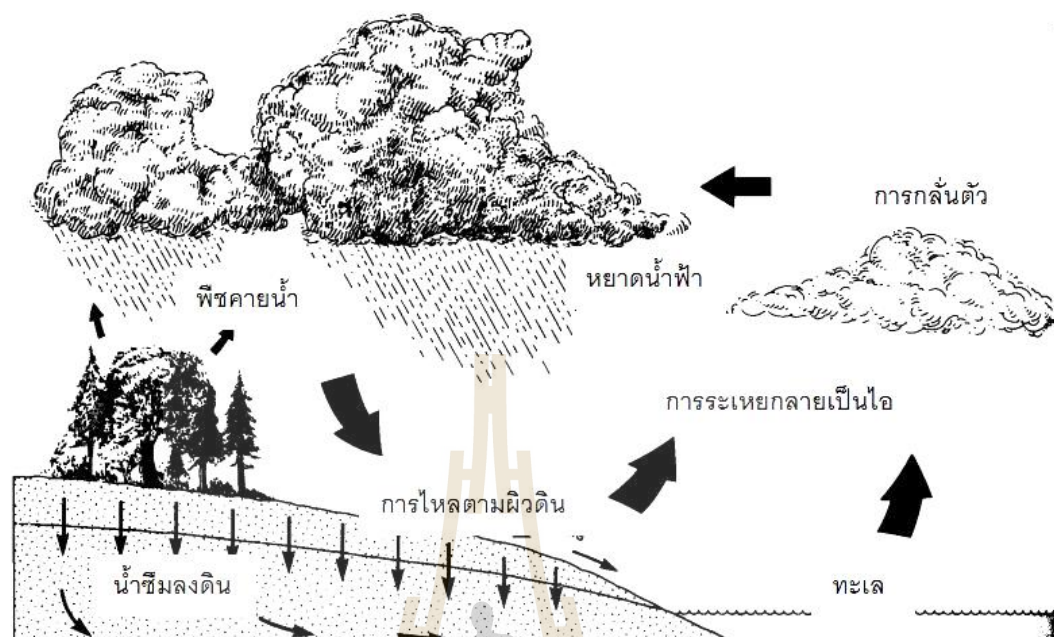
$$\Psi = (u_a - u_w) + f \quad (2.3)$$

แรงดึงคูมเมตริกหรือแรงคาพิวลาไรสามารถหาได้ด้วยการใช้หม้อแรงดัน (Pressure plate) ตามมาตรฐาน ASTM D6836-02 ทดสอบหาค่าแรงคาพิวลาไร เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงดึงคูมเมตริกหรือแรงคาพิวลาไร (Soil Water Characteristic Curve : SWCC)

2.2.4 สมดุลความชื้น

การซึมของน้ำ (Infiltration) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายนอกผิวดินเข้าสู่ดินทางผิวดิน ดังจะเห็นได้จากการให้น้ำโดยระบบชลประทานหรือการที่ฝนตก น้ำเหล่านี้ไหลซึมลงไปในดินด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก โดยสิ่งที่มีอิทธิพลต่อการซึมลงดินสามารถสรุปได้ดังนี้ (1) อัตราการตกของน้ำฝน น้ำชลประทาน หรือความลึกของน้ำที่ขังบนผิวดิน (2) ความสามารถในการรับน้ำของดิน (3) ปริมาณความชื้นในดินขณะเริ่มต้น (4) ความลาดชันและความขรุขระของผิวดิน (5) คุณสมบัติทางเคมีของดิน และ (6) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำ อัตราการซึมของน้ำในดินขึ้นอยู่กับระดับความชื้นของดิน ลักษณะโครงสร้างของเนื้อดินและผิวดิน อัตราการขยายตัวของแร่ดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุในดิน และเสถียรภาพของโครงสร้างดิน

การคายระเหย (Evapotranspiration) เป็นการสูญเสียน้ำจากการระเหย (Evaporation) และการระเหยจากการคายน้ำของพืช (Transpiration) การสูญเสียน้ำของทั้งสองขบวนการนี้รวมเรียกว่า การคายระเหย เป็นการสูญเสียน้ำของดินที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติอยู่เสมอ ซึ่งเป็นไปตามวัฏจักรของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการคายระเหยที่สำคัญ คือ สภาพภูมิอากาศ เช่น แสงแดด อุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ พืชพรรณ ลม เป็นต้น ส่วนปัจจัยอื่น ได้แก่ ปริมาณของน้ำในดิน การพัดพาไอน้ำออกจากผิวน้ำสู่ผิวดิน และสิ่งที่ปกคลุมผิวดิน



รูปที่ 2.2 วัฏจักรของน้ำ (Water cycle)

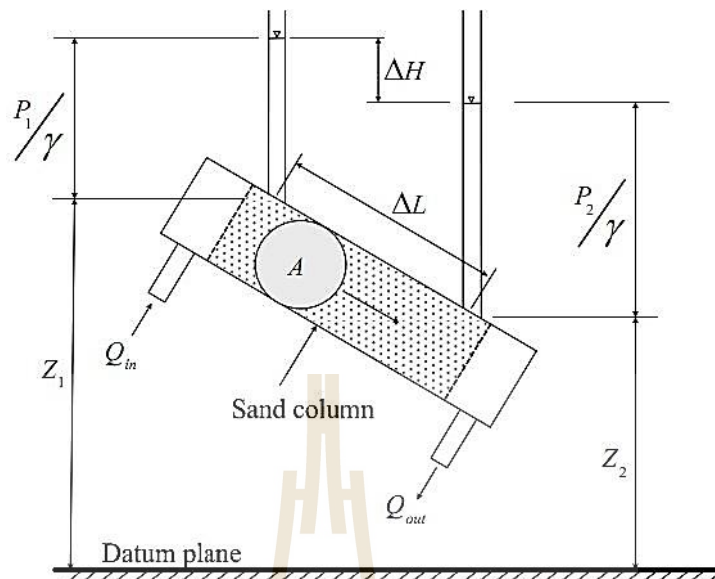
2.2.5 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน (Theory of soil water flow)

ในส่วนนี้ประกอบไปด้วย สมการดาร์ซี-บัคกิงแฮม (Darcy-buckingham equation) ซึ่งอธิบายถึงหลักการการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านวัตถุพรุนโดยพิจารณาผลของค่าความแตกต่างเสดของน้ำเทียบกับระยะการเคลื่อนที่ผ่านวัตถุพรุน ในปี ค.ศ.1856 จากการทดลองให้น้ำผ่านทรายดังรูปที่ 2.3 พบว่าอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ (Q) มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดของการเคลื่อนที่ (A) และค่าแตกต่างระหว่างเสดของน้ำที่บริเวณเข้าและออก (ΔH) และเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางที่เคลื่อนที่ (ΔL) ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = KA \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (2.4)$$

เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ (q) จะได้

$$q = \frac{Q}{A} = K \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.3 หลักการของดาร์ซี (ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)

เรียกสมการที่ 2.5 ว่า กฎของดาร์ซี (Darcy's law) ซึ่งใช้กับการไหลในตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำ กรณีการไหลในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ Buckingham (1907) ได้ประยุกต์ใช้กฎของดาร์ซีสำหรับการไหลในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีรูปสมการ คือ

$$q = -K_u i$$

(2.6)

เมื่อ i คือเกรเดียนต์ชลศาสตร์ ($\Delta H / \Delta L$) และ K_u คือสภาพนำชลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้นของดิน (θ) หรือเฮดแรงดัน (h_p) เขียนได้เป็น

$$K_u = K(\theta) \quad (2.7)$$

หรือ

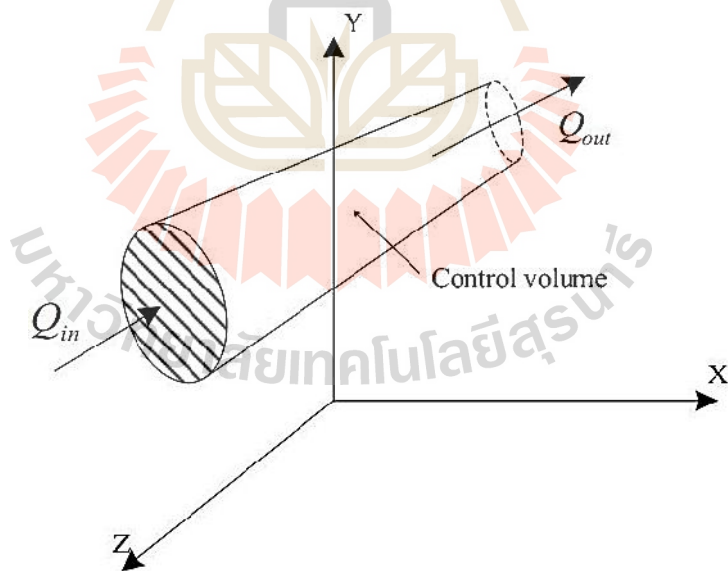
$$K_u = K(h_p) \quad (2.8)$$

สมการริชาร์ดส์ (Richards equation) จากกฎทรงมวลซึ่งกล่าวว่าสสารยอมไม่สูญหายนั้น ใน ปริมาตรควบคุม (Control volume) อัตราไหลเข้าของมวลน้ำลบด้วยอัตราการไหลออก ต้องเท่ากับ อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุม ถ้าพิจารณาว่ามวลนี้คือน้ำซึ่งเป็นของเหลวที่กดอัด ไม่ได้ (Incompressible fluid) พิจารณาปริมาตรแทนมวล ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังรูปที่ 2.4 ในช่วง ระยะเวลา t สมการริชาร์ดส์เป็นสมการสำหรับการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางพรุนหรือดินที่ไม่อิ่มตัว ด้วยน้ำเมื่ออยู่ในสถานะไม่คงตัว (Unsteady flow) และเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ลำดับที่สอง (Second-order) แบบพาราโบลา (Parabolic) ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) เมื่อเขียนในรูปการไหลใน 3 มิติจะได้

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (2.9)$$

เมื่อ K คือ ฟังก์ชันของความชื้นหรือเสดความดัน

H คือ เสดทางชลศาสตร์



รูปที่ 2.4 อัตราการไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม (ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)

ในมวลดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (Soil-Water characteristic, SWC) ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของดินในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเชิงปริมาตร (Volumetric moisture content, θ_w) กับแรงดึงน้ำ (Matric suction, $u_a - u_w$) บนความสัมพันธ์นี้สามารถกล่าวได้ว่า เมื่อแรงดึงน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ความชื้นในดินมีค่าลดลง ในงานวิจัยนี้ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองของ Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) ดังนี้

$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 - [r(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-\frac{1}{n}} \quad (2.10)$$

- เมื่อ S_e คือ ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล (Effective degree of saturation)
- θ_r คือ ความชื้นเชิงปริมาตรที่สถานะหยุดนิ่ง (Residual volumetric moisture content)
- θ_{sat} คือ ความชื้นเชิงปริมาตรที่สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated volumetric moisture content)
- r คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่บ่งบอกค่าแรงดันน้ำ ณ จุดที่อากาศเริ่มเข้าไปในมวลดิน (Air-Entry pressure)
- n คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่บ่งบอกอัตราการลดลงของความชื้นเชิงปริมาตรกับแรงดึงน้ำ หลังจากทีอากาศเริ่มเข้าไปในมวลดิน

เมื่อทำนายคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินได้ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของดินในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำก็สามารถทำนายได้เช่นเดียวกัน โดยอาศัยแบบจำลองของ Van Genuchten-Mualem model (Mualem, 1976) ดังนี้

$$k(h) = k_s \frac{\left\{ 1 - [r(u_a - u_w)]^{n-1} \left(1 + [r(u_a - u_w)]^n \right)^{\frac{1}{n}-1} \right\}^2}{\left\{ 1 + [r(u_a - u_w)]^n \right\}^{\frac{1}{2} \frac{n}{2}}} \quad (2.11)$$

เมื่อ k_s คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในมวลดินที่สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเกิดดินโคลนถล่ม (Landslide) และดินไหล (Flow landslide) คือการเคลื่อนที่ของมวลดินหรือหินลงมาตามลาดเขาด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งส่วนมากจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ภูเขาที่มีความลาดชันสูง โดยปกติดินถล่มที่เกิดขึ้นในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีปริมาณน้ำฝนเป็นตัวกระตุ้นหลัก โดยน้ำจะมีการซึมผ่าน (Infiltration) ลงสู่ลาดดิน เมื่อความชื้นในมวลดินสูงขึ้น จากทฤษฎีของหน่วยแรงประสิทธิผลจะพบว่าความแข็งแรงของดิน จะลดลงตามความชื้นในมวลดินที่เพิ่มขึ้น และน้ำเป็นตัวที่ทำให้คุณสมบัติของดินที่มีสถานะเป็นของแข็งสามารถเปลี่ยนไปเป็นของไหลได้ ดังนั้นสิ่งจำเป็นที่จะต้องพิจารณาเมื่อทำการศึกษาปัญหาการเกิดดินโคลนถล่มคือ กระบวนการทางอุทกวิทยา และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของดินระหว่างการเกิดกระบวนการทางอุทกวิทยา

2.3.1 เสถียรภาพของลาดดินภายใต้กระบวนการอุทกวิทยา

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินได้มีการศึกษาต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลายาวนาน และมีวิธีการวิเคราะห์หลายวิธีด้วยกัน เช่น Slope stability charts โดย Janbu (1968) และ Ducan et al. (1987), Force equilibrium methods โดย Lowe และ Karafiath (1955) และ Corps of Engineers (1982), Ordinary method of slices โดย Fellenius (1927), Janbu's generalized procedure of slices โดย Janbu (1968), Bishop's Modified Method โดย Bishop (1955) และ Morgenstern and price's method โดย Morgenstern and Price (1965) เป็นต้น วิธีวิเคราะห์ที่กล่าวมานี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่เรียกว่า Limit equilibrium method การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะมีการกำหนดระนาบวิบัติ (Failure plane) สมมุติของลาดดินแตกต่างกันออกไป และการวิเคราะห์ทุกวิธีจะมีการประเมินเสถียรภาพของลาดดินเป็นค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, FS) ดังต่อไปนี้

$$FS = \frac{\tau_R}{\tau_M}$$

(2.12)

เมื่อ τ_R คือ กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear strength of the soil)

τ_M คือ หน่วยแรงเฉือนที่เกิดตลอดระนาบการวิบัติสมมุติ (Mobilized shear force)

เมื่ออัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าต่ำกว่า 1 ($FS < 1.0$) จะเกิดการวิบัติของลาดดินที่ระนาบสมมุติ ในขณะที่อัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่า 1 ($FS > 1.0$) จะไม่เกิดการวิบัติขึ้นที่ระนาบสมมุติ สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่สอดคล้องกับเหตุการณ์ฝนตกนั้น สามารถประยุกต์ใช้วิธี Limit equilibrium ในการวิเคราะห์ได้เช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามจะต้องมีความสอดคล้องกับรูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นจริง

Sorbino and Nicora (2012) ได้ทำการวิจัยและศึกษากลไกของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในเหตุการณ์ดินโคลนถล่มที่มีการวิบัติแบบการไหลหรือที่เรียกว่าดินไหล (Flow landslides) โดยทำการศึกษากับลาดดินที่เป็นดินเม็ดหยาบ (Coarse grained soil) เนื่องจากมีการตอบสนองต่อน้ำฝนอย่างรวดเร็วเพราะไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน และมีความรุนแรงในการวิบัติมากกว่าลาดดินที่เป็นดินเม็ดละเอียด (Fine grained soil) งานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่า การเกิดดินโคลนถล่มจะประกอบด้วย 2 สถานะ คือ สถานะวิบัติ (Failure stage) และสถานะหลังการวิบัติ (Post-failure) สำหรับสถานะวิบัติจะเกิดภายใต้การตอบสนองต่อปริมาณน้ำฝนของลาดดิน ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำ (Pore pressure) ในมวลดิน ส่งผลให้เกิดการลดลงของหน่วยแรงประสิทธิภาพในมวลดินจนกระทั่งสถานะของหน่วยแรงเข้าสู่สถานะวิบัติ และภายหลังสถานะวิบัติหากน้ำไม่สามารถระบายออกจากลาดดินหรืออยู่ในสภาวะแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained conditions) จะมีการพัฒนาจากสถานะวิบัติไปสู่การเกิดการวิบัติแบบไหลหรือดินไหล มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาเกี่ยวกับการวิบัติแบบไหลของลาดดิน ทั้งในแบบจำลองทางกายภาพ (Physical model) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical model) เพราะเป็นสถานะการวิบัติที่เกิดร่วมกับการไหลของน้ำฝน เช่น งานวิจัยของ Cascini et al., (2008) และ Huang et al., (2008) เป็นต้น

แม้ว่าจะมีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิบัติแบบการไหลเป็นจำนวนมาก แต่สถานะการไหลดังกล่าวได้เกิดขึ้นหลังสถานะวิบัติของลาดดิน ดังนั้น จึงควรให้ความสนใจตั้งแต่สถานะวิบัติของลาดดินเพื่อการพัฒนาาระบบเตือนภัยดินโคลนถล่มให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และภายใต้สภาวะการวิบัติในชั้นดินตื้นที่เกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ในประเทศไทย สามารถพิจารณาให้เป็นการวิบัติแบบการเลื่อนไถลลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่ (Translational slides) ซึ่งสอดคล้องกับการจำแนกโดยกรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

การเลื่อนไถลลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่ (Translational slides) เป็นการเลื่อนไถลลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่มีลักษณะค่อนข้างตรงและขนานกับลาดของผิวดิน ส่วนใหญ่เป็นการ

เคลื่อนที่ตามระนาบของโครงสร้างทางธรณีวิทยา การวิบัตินี้จะวิบัติในระดับตื้นถึงแม้ว่าชั้นดินจะมีความหนาแน่นมากหรือน้อยก็ตาม โดยปกติแล้วจะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีความลาดชันสูง (Steep slope) และมีปัจจัยต่อการวิบัติคือปริมาณน้ำฝน สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Limit Equilibrium ที่สอดคล้องกับการวิบัติรูปแบบนี้จะนิยมใช้วิธีลาดดินอนันต์ (Infinite slope) โดย Skempton and DeLory (1957) ดังตัวอย่างงานวิจัย เช่น Xie et al. (2004), Lu and Godt (2008), Cho (2009), Ma et al. (2011), Santoso et al. (2011), Eichenberger et al. (2013) เป็นต้น วิธีวิเคราะห์นี้ จะเป็นการประเมินเสถียรภาพของลาดดินตามสมการ (2.12) ดังนี้

$$FS = \frac{\tau_R}{\tau_M} = \frac{c' + \tau'_n \tan \phi'}{\tau_M} \quad (2.13)$$

เมื่อ τ'_n คือ หน่วยแรงตั้งฉากประสิทธิผล (Effective normal stress)

c' คือ หน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิผลของดิน (Effective cohesion intercept)

ϕ' คือ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน (Friction angle)

สมการ (2.13) จะใช้ประเมินค่าอัตราส่วนความปลอดภัยด้วยวิธีลาดดินอนันต์ โดยพิจารณาบนระนาบการวิบัติของมอร์-คูลอมป์ (Mohr-Coulomb Failure Plane) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในลาดดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ แต่หากมีการประยุกต์ใช้กับลาดดินที่ตอบสนองต่อน้ำฝน ดังรูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดินจะสอดคล้องกับการซึมของน้ำฝนลงสู่ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นกำลังรับแรงเฉือนของดิน (τ_R) จึงต้องพิจารณาเป็นกำลังรับแรงเฉือนในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และสามารถพิจารณาตาม Bishop (1959) ได้เสนอให้มีการใช้หน่วยแรงประสิทธิผล (Bishop's Effective Stress, τ') สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนี้

$$\tau' = (\tau - u_a) + \alpha(u_a - u_w) \quad (2.14)$$

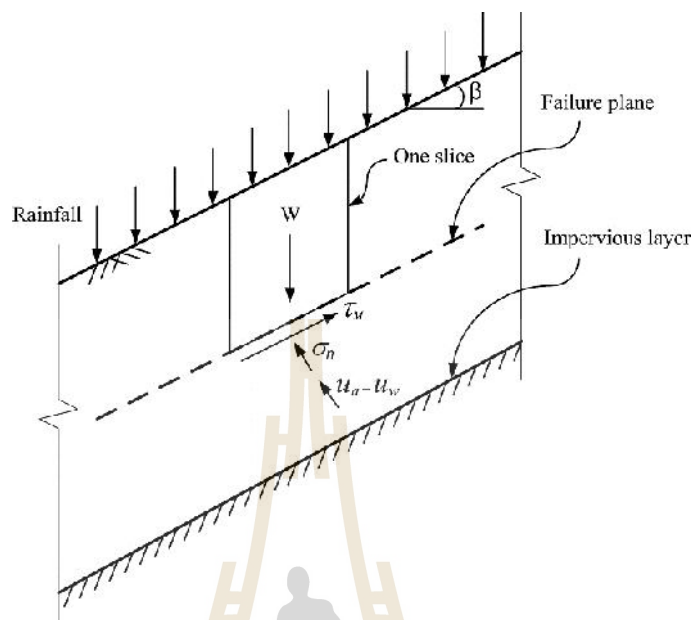
เมื่อ τ คือ หน่วยแรงรวม (Total stress)

u_a คือ แรงดันอากาศในช่องว่างเม็ดดิน (Air pressure)

u_w คือ แรงดันน้ำในช่องว่างเม็ดดิน (Water pressure)

α คือ ค่าคงตัวของ Bishop จะสัมพันธ์กับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation)

หรือความชื้น (Moisture content) ในมวลดิน



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์แบบลาดอนันต์ (Infinite slope)

ดังนั้นอัตราส่วนความปลอดภัยในลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะเป็นดังนี้

$$FS = \frac{c' + (\ddagger_n - u_a) \tan\{\}' + t(u_a - u_w) \tan\{\}'}{\ddagger_M} \quad (2.15)$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแบบลาดอนันต์ตามสมการ (2.15) นอกจากการใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกำลังของดินแล้ว จะเห็นได้ว่าในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์มากขึ้น เนื่องจากการรวมผลกระทบที่เป็นปัจจัยกระตุ้นทางอุทกวิทยา ประกอบด้วยความชื้นฝนและอัตราการระเหยเข้าร่วมด้วย กล่าวคือในเทอมของ $(u_a - u_w)$ ซึ่งเป็นเทอมที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำและความชื้นในลาดดิน จะเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการทางอุทกวิทยา อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินแต่ละชนิดและเวลาที่ตอบสนองด้วย เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำวิธีอื่นๆ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาถึงกระบวนการทางอุทกวิทยาที่ตอบสนองต่อลาดดิน เพื่อให้มี

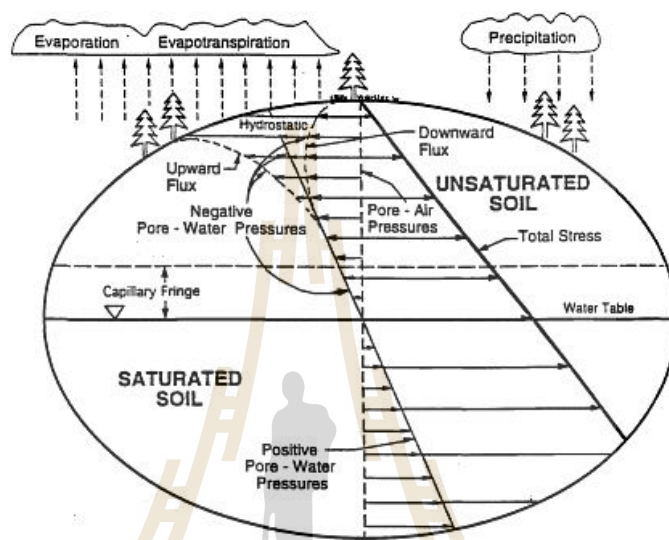
ความชัดเจนในการทำนายเหตุการณ์ดินโคลนถล่มได้อย่างแม่นยำ และนำไปสู่ระบบการเตือนภัยดินโคลนถล่มที่ช่วยลดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินได้มากยิ่งขึ้น

2.3.2 การตอบสนองของลาดดินต่อกระบวนการทางอุทกวิทยา

กระบวนการทางอุทกวิทยาที่มีความสำคัญต่อเสถียรภาพของลาดดิน ได้แก่ การเกิดเหตุการณ์ฝนตก การซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดดิน และการระเหยของน้ำที่ผิวดิน เมื่อฝนตกน้ำฝนจะซึมลงสู่ชั้นดินถือเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและสำคัญอย่างยิ่งต่อการเกิดดินโคลนถล่ม เนื่องจากน้ำฝนที่ซึมลงสู่ชั้นดินจะทำให้ความชื้นในดินมีค่าสูงขึ้น ผลที่ตามมาคือมวลดินเกิดการสูญเสียหน่วยแรงที่เรียกว่า แรงดึงน้ำ (Suction) ซึ่งเป็นหน่วยแรงที่เกิดจากปรากฏการณ์คาพิลลารี (Capillary) และทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินจากแรงดึงผิวของน้ำ

Fredlund (1996) ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำตามความลึกของชั้นดินที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอัตราการน้ำเข้า-ออก (Water flux) บริเวณผิวดินที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพทางอุทกวิทยา ดังรูปที่ 2.6 เมื่อชั้นดินถูกแบ่งออกเป็นสองโซน คือ ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) จะอยู่เหนือจากระดับน้ำใต้ดิน และชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) ที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (Equilibrium) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการน้ำเข้า-ออกบริเวณผิวดิน แรงดันน้ำตลอดชั้นดินจะเป็นแรงดันน้ำสถิตย (Hydrostatic pressure) ซึ่งเป็นสภาวะเริ่มต้น (Initial condition) ของแรงดันน้ำในชั้นดิน ภายใต้สภาวะนี้ในโซนอิ่มตัวด้วยน้ำแรงดันน้ำจะมีค่าเป็นบวก ในขณะที่โซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีค่าเป็นลบ หลังจากนั้นเมื่อมีการไหลจากน้ำฝนซึมลงสู่ชั้นดิน ในโซนดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในชั้นดิน ในทางกลับกันหากอัตราการน้ำเข้า-ออกบริเวณผิวดินเท่ากับอัตราการระเหยจะทำให้ชั้นดินในโซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น จากการเปลี่ยนแรงดันน้ำดังกล่าว จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการน้ำเข้า-ออกที่ผิวดิน ภายในชั้นดินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำจากสภาวะเริ่มต้นซึ่งเป็นสภาวะสมดุล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดินตามไปด้วย โดยเฉพาะในช่วงที่เกิดฝนเพราะทำให้แรงดันน้ำเพิ่มขึ้นในโซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และเป็นการเปลี่ยนแปลงภายใต้ระยะเวลาอันสั้น ดังนั้นจึงเรียกได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำภายใต้สภาวะการซึมแบบไม่คงที่ขึ้นกับเวลา (Transient seepage) สอดคล้องกับเหตุการณ์ดินโคลนถล่มที่จะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างพายุฝน หรือหลังจากพายุฝนไม่นาน การวิเคราะห์การซึมแบบไม่คงที่ขึ้นกับเวลา ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน และแรงดันน้ำที่สัมพันธ์กับทั้งการเปลี่ยนแปลงเวลาและความหนาชั้นดินด้วย ซึ่งสามารถนำไปรวม

วิเคราะห์กับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินวิธีต่างๆ และจะทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัยกับเวลาและชั้นดินด้วยเช่นเดียวกัน ตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่สอดคล้องกับการไหลแบบไม่คงที่ ถูกศึกษาโดย Ma et al., (2011), Santoso et al., (2011) และ Xie et al., (2004)



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำกับชั้นดินภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราน้ำเข้า-ออก บริเวณผิวดิน โดย Fredlund (1996)

2.3.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการณ์การซึมน้ำภายในลาดดิน

แม้ว่าการวิเคราะห์การซึมแบบไม่คงที่ขึ้นกับเวลาจะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของดินกับเวลาและความลึกของดินได้ แต่เนื่องจากกระบวนการทางชลศาสตร์มีความซับซ้อนจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างง่าย จากการศึกษางานวิจัย Green and Ampt (1911), Horton (1933), Ng and Shi (1998), Ng et al. (2001), Kim (2004), Zhan and Ng (2004), Cho (2009), Shama and Nakaraki (2010), Rahardjo et al. (2010), Ma et al. (2011), Rahardjo et al. (2011), Kassim et al., (2012) และ Kim et al., (2012) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การซึมน้ำของดิน ทั้งวิธีคำนวณเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) และวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical method) ทำให้สามารถสรุปปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการซึมของน้ำภายในลาดดินได้ดังนี้

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการณ์การซึมน้ำในลาดดินสามารถแบ่งได้เป็น 4 ปัจจัยหลัก คือ 1) ปัจจัยทางด้านรูปร่างของลาดดิน (Geometry), 2) ปัจจัยที่เกิดจากคุณสมบัติของ

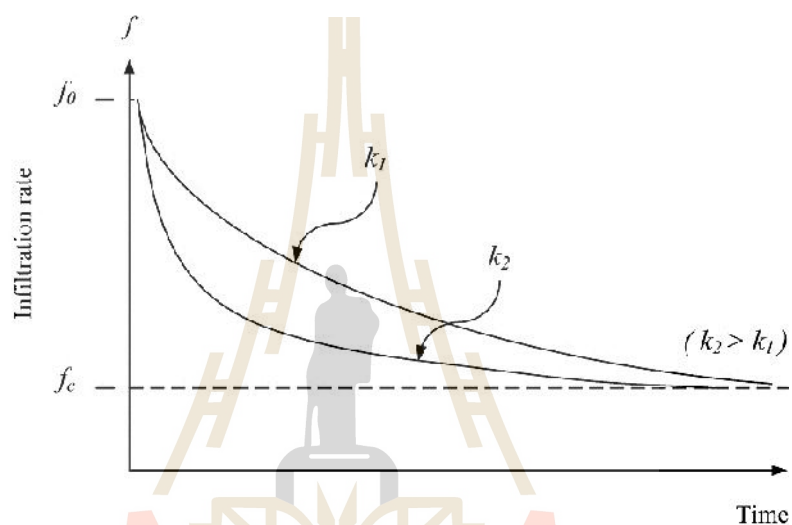
ดินแต่ละชนิดภายในลาดดิน (Internal factors), 3) ปัจจัยกระตุ้นภายนอก (External factors), และ 4) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต (Initial and boundary conditions) จากการศึกษาทั้ง 4 ปัจจัย พบว่า ปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดคือปัจจัยกระตุ้นภายนอกที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางอุทกวิทยาคือ ความเข้มของปริมาณฝนในพื้นที่ (Rainfall intensity) ช่วงเวลาในการเกิดพายุฝนตก (Rainfall duration) อัตราการระเหย (Evaporation rate) เป็นต้น ถ้าหากปราศจากปัจจัยเหล่านี้ ปัญหาที่มีความรุนแรงอย่างดินโคลนถล่มและน้ำหลากคงไม่มีทางเกิดขึ้นได้อีกทั้งงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้ทำการศึกษามานั้นยังไม่ค่อยพบงานวิจัยใดที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยเหล่านี้อย่างแน่ชัด เป็นเพียงการนำเอาปัจจัยมาแสดงให้เห็นถึงผลกระทบ ผ่านผลที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและวิธีคำนวณเชิงวิเคราะห์เท่านั้น

2.3.4 ปัจจัยกระตุ้นภายนอกที่ส่งผลต่อการวิบัติในลาดดินธรรมชาติ

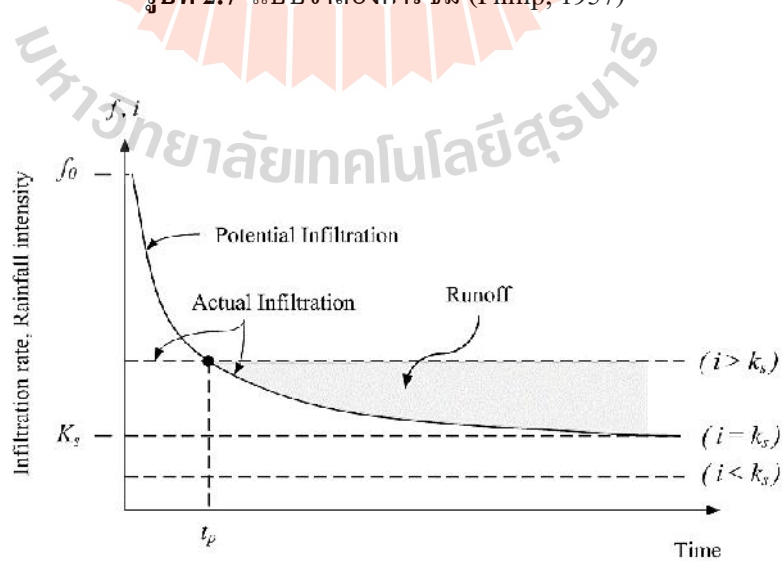
ปัจจัยกระตุ้นภายนอกที่ส่งผลต่อการวิบัติของลาดดินธรรมชาติ ได้แก่ ความเข้มของฝนในพื้นที่ที่พิจารณา ช่วงเวลาในการเกิดฝน (Rainfall duration) รูปแบบฝน (Rainfall pattern) อัตราการระเหย (Evaporation rate) เป็นต้น ในทางอุทกวิทยาเหตุการณ์ที่เกิดฝนตกลงสู่พื้นดินสามารถแยกย่อยได้หลายกระบวนการตามหลักการสมดุลน้ำ (Water runoff) ภายในปริมาตรควบคุม (Control volume) ได้แก่ การไหลออกที่ผิวดิน (Surface runoff) การไหลออกใต้ผิวดิน (Subsurface runoff) และการระเหย ซึ่งกระบวนการย่อยเหล่านี้ถือเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก การที่จะศึกษาปัจจัยกระตุ้นภายนอกจึงควรจะคำนึงถึงปัจจัยย่อยเหล่านี้ด้วยเช่นกัน

Horton (1933) ทำการศึกษาวิจัยและได้เสนอแบบจำลองอย่างง่ายในการอธิบายความสามารถในการซึมน้ำของดินกับเวลา ดังรูปที่ 2.7 โดยความสามารถในการซึม (f) ของดินจะลดลงตามระยะเวลาที่เกิดฝนจากความสามารถในการซึมเริ่มต้น (f_0) จนกระทั่งมีค่าคงที่ เมื่อความสามารถในการซึมมีค่าใกล้เคียงกับความสามารถในการซึมสุดท้ายของดิน (f_c) สามารถประมาณให้มีค่าเท่ากับค่าการนำทางชลศาสตร์ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Hydraulic Conductivity, K_s) โดย Green and Ampt (1911) และ Philip (1957) จากแบบจำลองการซึมข้างต้น สามารถใช้แยกฝนที่ตกลงสู่พื้นดินออกเป็นการซึมและการไหลบนผิวดิน ดังรูปที่ 2.8 สมมุติให้ความเข้มฝน (i) มีค่าคงที่ เมื่อฝนตกที่เวลาต่ำกว่า t_p ความสามารถในการซึมของดินจะมีค่าเท่ากับความเร็วซึม ในขณะที่เมื่อเวลาในการตกของฝนมีค่ามากกว่า t_p ความเข้มฝนจะสูงกว่าความสามารถในการซึม

ของดิน จึงทำให้เกิดการไหลบนผิวดินขึ้น ซึ่งจุดที่เวลาฝนตกมีค่าเท่ากับ t_p จะเรียกว่าเวลาที่เกิดน้ำขัง (Ponding time) ในขณะเดียวกันหากความเข้มฝนมีค่าต่ำกว่าความสามารถในการซึมสุดท้ายของดิน จะไม่มีการไหลบนผิวดินเกิดขึ้น



รูปที่ 2.7 แบบจำลองการซึม (Philip, 1957)

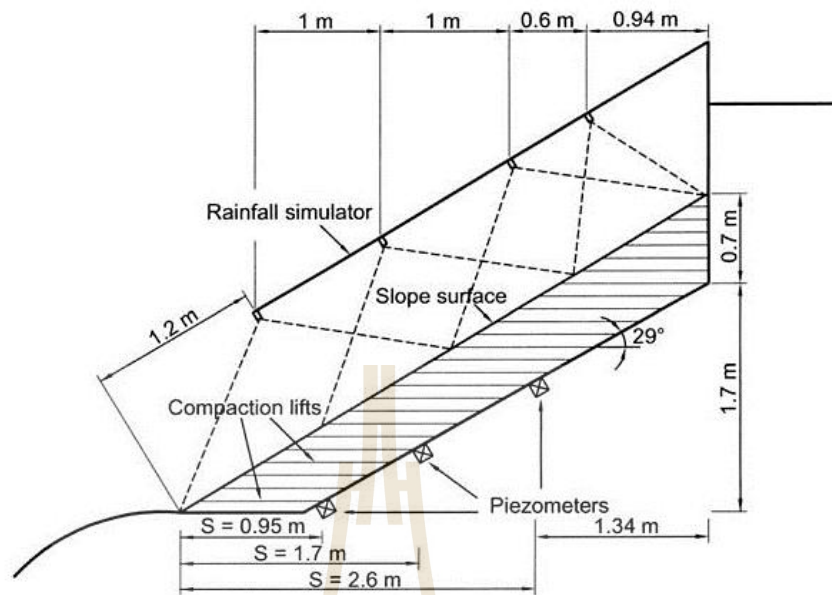


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมและการไหลผิวดิน

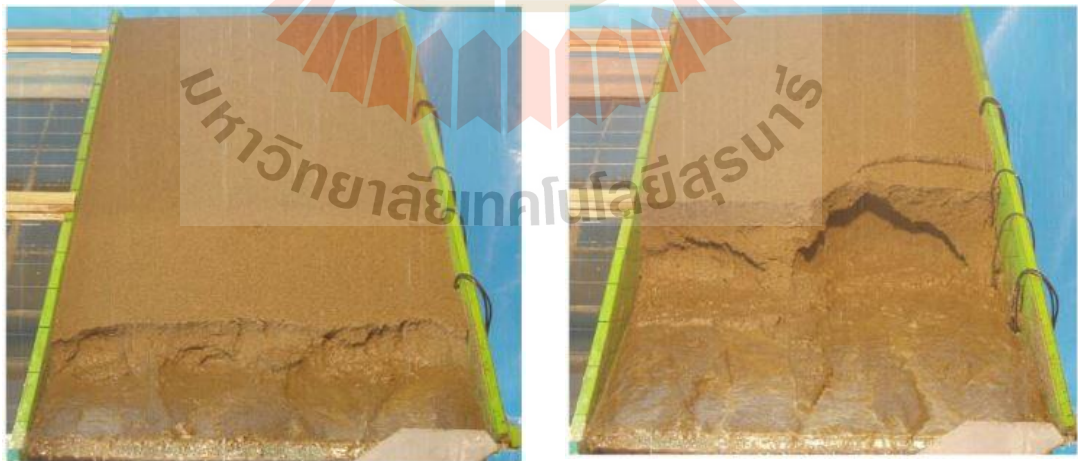
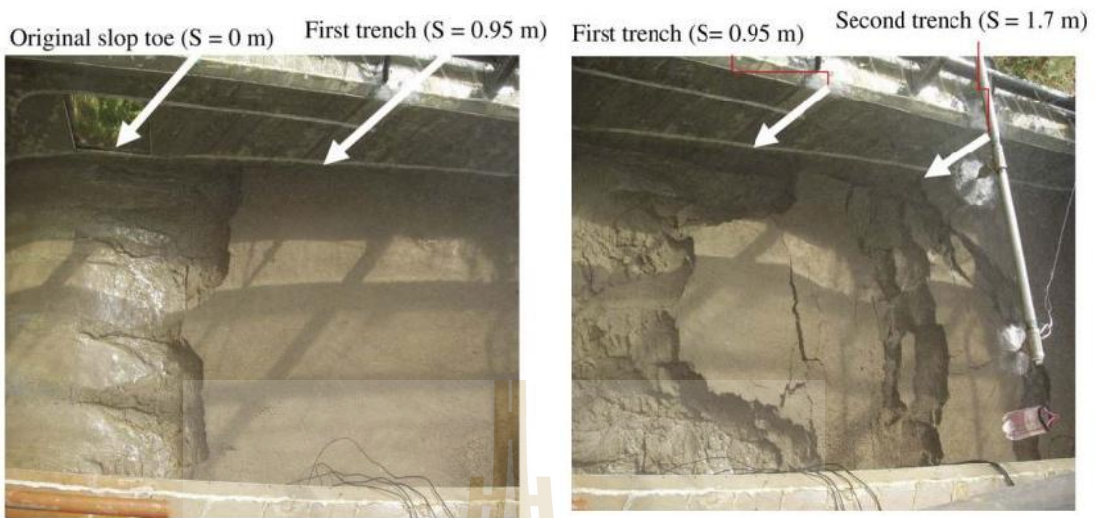
จากหลักการแยกความสามารถในการซึมและการไหลบนผิวดิน งานวิจัยนี้จะใช้ในการกำหนดความเข้มข้นเบื้องต้นในการศึกษาผลกระทบจากการตอบสนองของลาดดินต่อปริมาณน้ำฝนด้วยแบบจำลองการซึมในระบบหนึ่งมิติ โดยจะมีการเปลี่ยนความเข้มข้นคือ ความเข้มข้นต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ($i < k_s$) ความเข้มข้นประมาณเท่ากับหรือใกล้เคียงสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ($i = k_s$) และความเข้มข้นสูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ($i > k_s$) การศึกษานี้จะทำให้ทราบอิทธิพลของความเข้มข้นในช่วงเวลาการเกิดฝน ทั้งการซึมและการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน

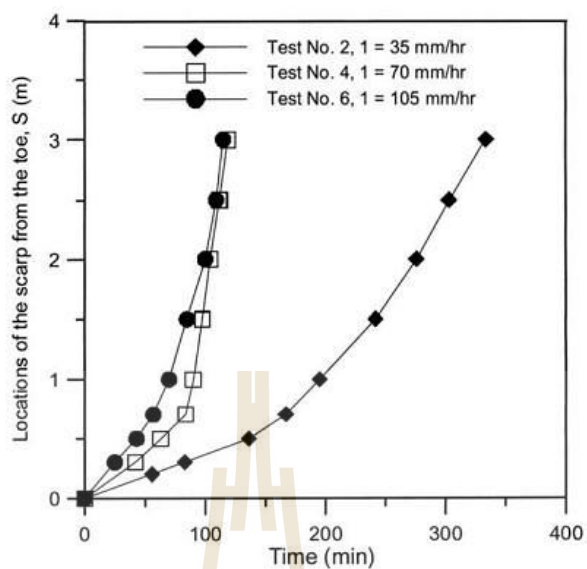
2.3.5 แบบจำลองกายภาพของลาดดิน

Huang et al., (2008, 2009, and 2010) ได้ทำการศึกษาและวิจัยการวิบัติของลาดดินดินแบบเลื่อนไหล โดยมีการจำลองลาดดินขนาดใหญ่ ลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.9 ทำการทดสอบลาดดินในสภาวะรับน้ำฝนและมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้น ผลการทดสอบพบว่า การวิบัติของลาดดินเกิดขึ้นในสองช่วงคือ เกิดขึ้นในช่วงปลายของลาดดิน และเกิดขึ้นที่ตอนกลางของลาดดินในเวลาต่อมา ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 อีกทั้งยังได้ศึกษาผลของความเข้มข้นกับเวลาที่เกิดการวิบัติของลาดดิน โดยค่าความเข้มข้นสูงจะส่งผลให้เกิดการวิบัติของลาดดินเร็วกว่าค่าความเข้มข้นต่ำ ดังรูปที่ 2.12

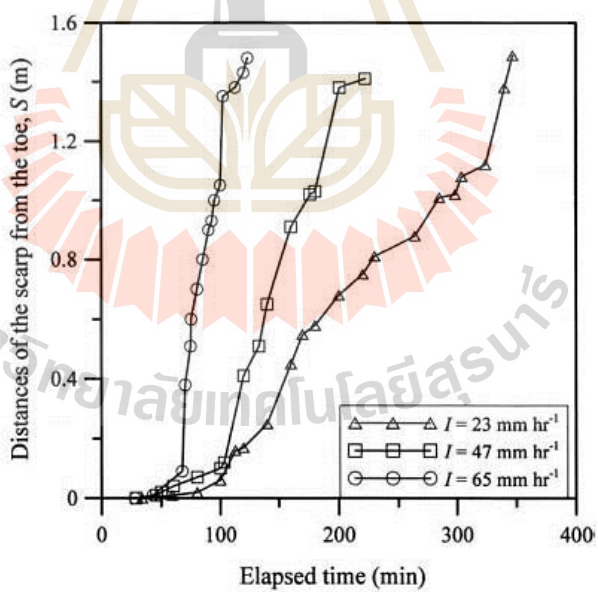


รูปที่ 2.9 แบบจำลองลาดดินและแบบจำลองน้ำฝน (Huang et al., 2009)





(a)

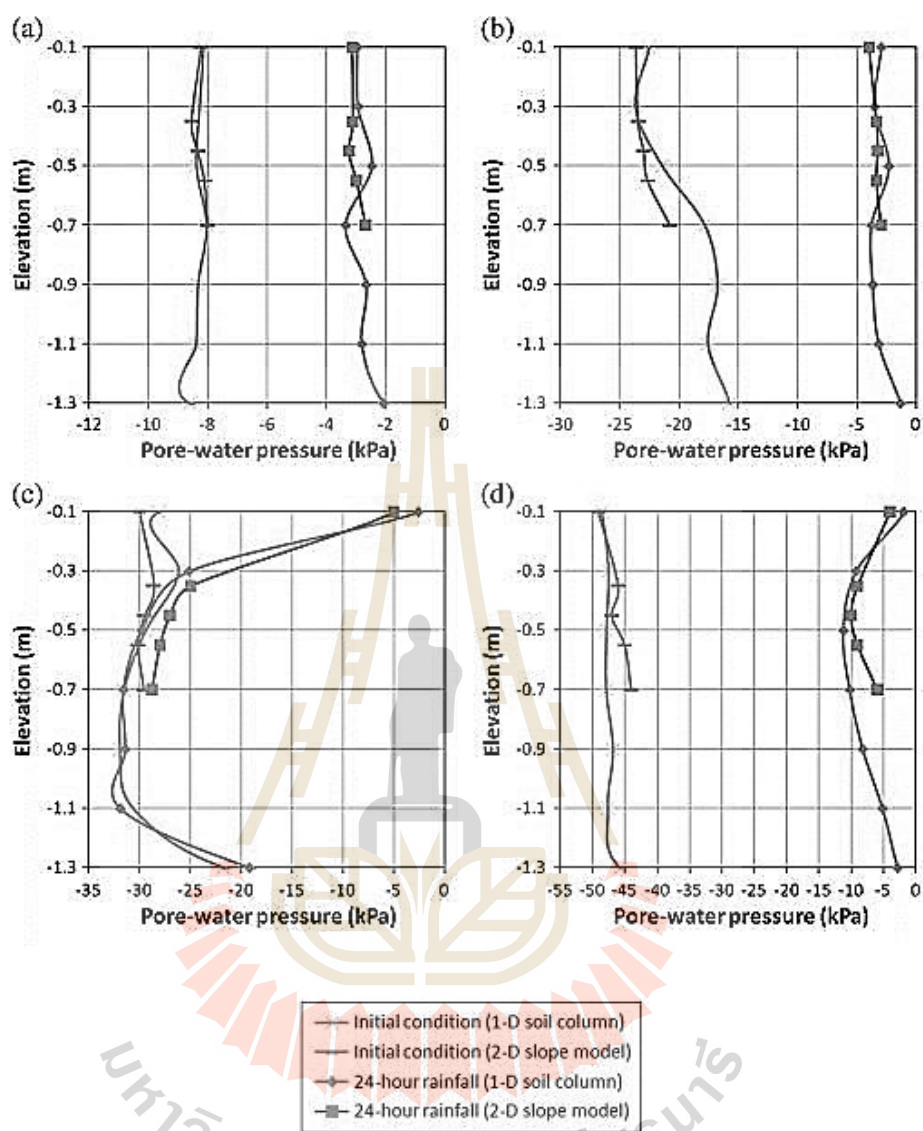


(b)

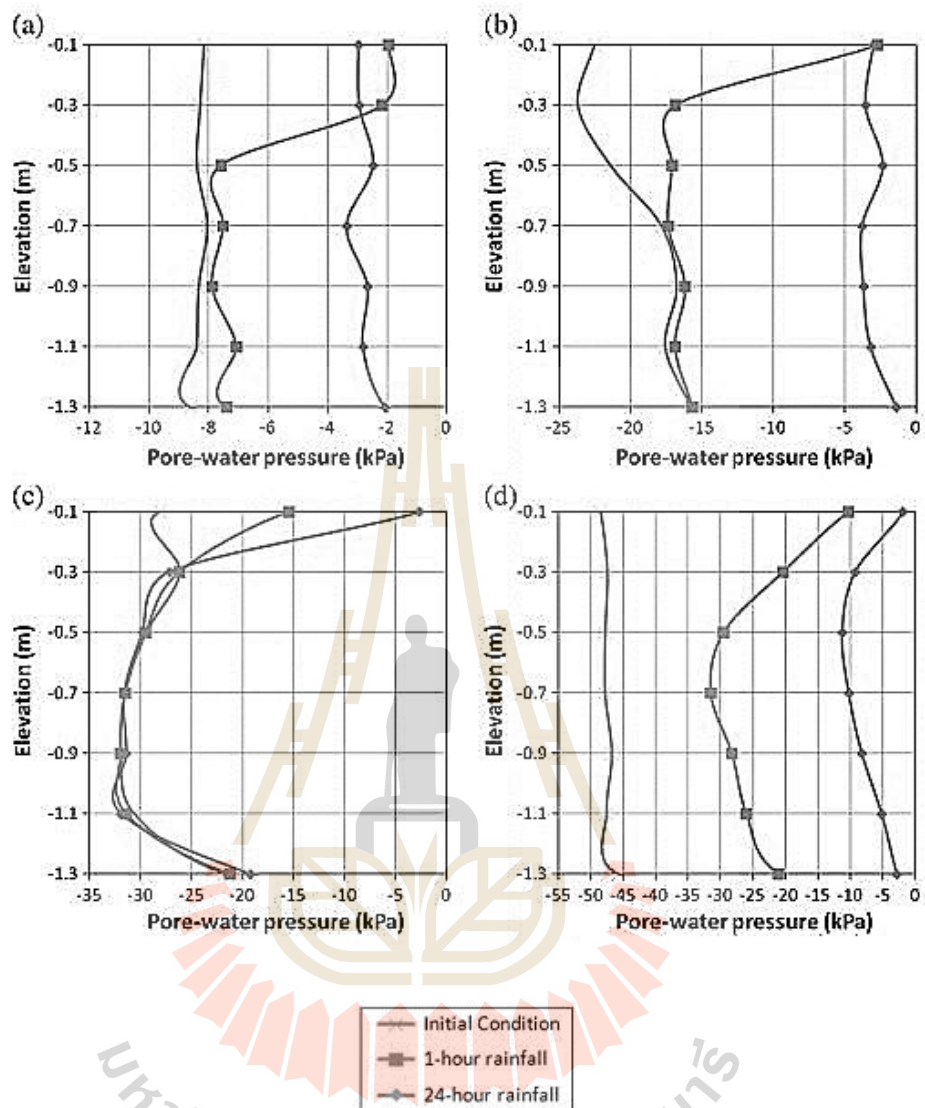
รูปที่ 2.12 (a) แสดงช่วงเวลาการวิบัติของลาดดินตะกอนปนทราย (Huang et al., 2009)

(b) แสดงช่วงเวลาการวิบัติของลาดดินทราย (Huang et al., 2010)



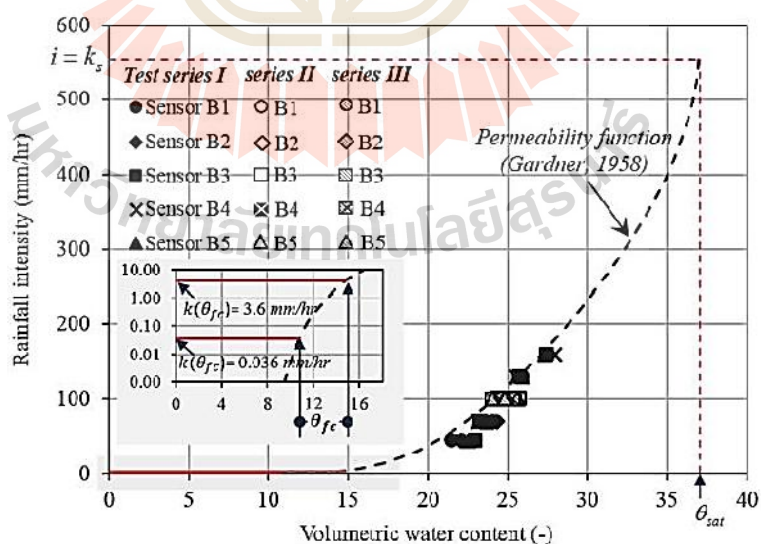


รูปที่ 2.14 กราฟแสดงค่าแรงดันน้ำตามความลึกของดิน ในแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติ (Lee, 2011)



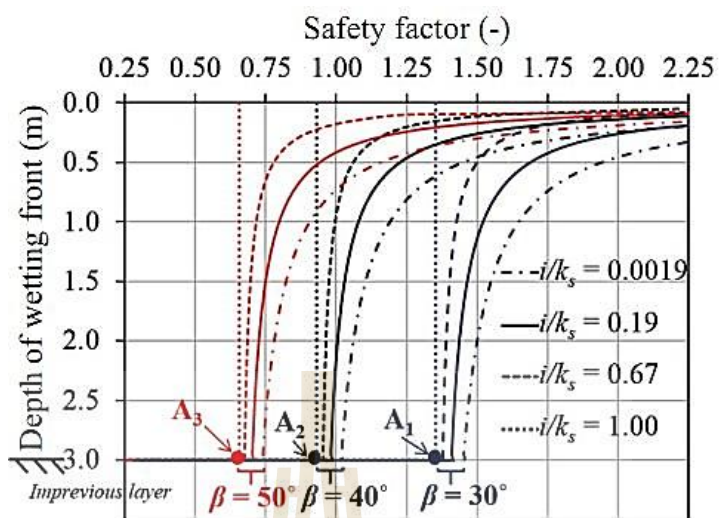
รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำกับความลึกของดิน ระยะเวลาของน้ำฝนที่ 1 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ของดินแต่ละชนิด (Lee, 2011)

Chinkulkijniwat et al., (2016) ทำการวิจัยและศึกษาการตอบสนองทางกายภาพและอุทกวิทยาของลาดดินต้นด้วยแบบจำลองทางกายภาพการซึมในสองมิติ ภายใต้สภาวะรับน้ำฝนในรูปแบบต่างๆซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบเตือนภัย ในงานวิจัยได้ใช้ดินทรายในการทดสอบ จากการศึกษพบว่า การตอบสนองของลาดดินแบ่งออกเป็นสองเฟส คือ เฟสการซึม และเฟสการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ในระหว่างช่วงเฟสการซึมช่วงเวลาที่เท่ากันปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของความเข้มฝน ดังแสดงในภาพที่ 2.16 แต่จะไม่ขึ้นกับค่าความชันของลาดดินและปริมาณความชื้นเริ่มต้น อิทธิพลของความเข้มฝนมีผลต่อปริมาณความชื้นทั้งสองเฟส ซึ่งการวิบัติของลาดดินต้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน คือ 1) วิบัติตามแนวชั้นที่บ้น้ำ 2) วิบัติใกล้ๆผิวลาดดิน และ 3) วิบัติที่ความลึกใดๆระหว่างชั้นที่บ้น้ำจนถึงผิวลาดดิน การวิบัติของลาดดินต้นที่มีความชันสูงอาจเกิดขึ้นในช่วงเฟสการซึม ขณะที่ลาดดินที่มีความชันต่ำอาจเกิดการวิบัติที่เฟสการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ลาดดินที่มีความชันสูงตำแหน่งของระนาบวิบัติสามารถเกิดขึ้นที่ความลึกใดๆจากชั้นที่บ้น้ำถึงผิวลาดดินจะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพและดัชนีการซึม (i/k_s) ซึ่งผลกระทบของความเข้มฝนบนค่าสัดส่วนความปลอดภัยใดๆแสดงได้ในเทอมของดัชนีการซึม ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยเสถียรภาพของลาดดินจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความลึกของแผ่นความชื้นที่เคลื่อนตัวลงในดิน สำหรับดัชนีการซึมที่มีค่าน้อยกว่า 1.0

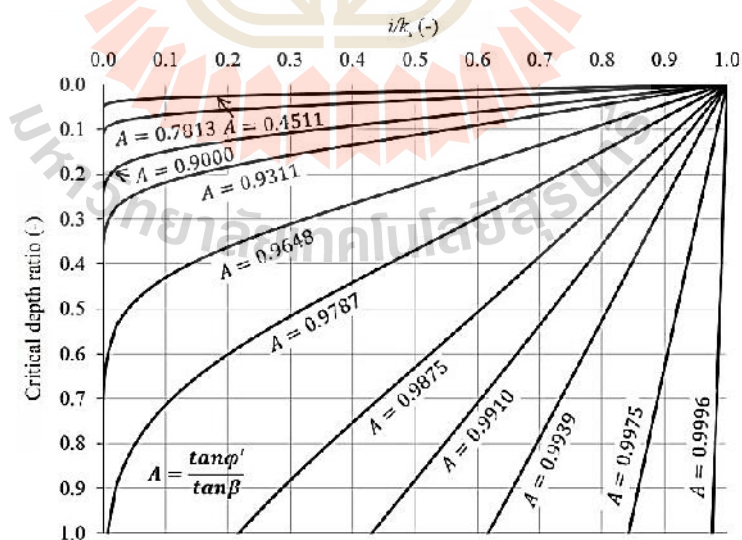


รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มฝนกับความชื้นกับปริมาณความชื้น

(Chinkulkijniwat et al., 2016)



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความปลอดภัยกับความลึก (Chinkulkijniwat et al., 2016)



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกวิกฤตกับดัชนีการซึม (i/k_s) (Chinkulkijniwat et al., 2016)

และจากรูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกวิกฤติกับดัชนีการซึม ซึ่งตำแหน่งของระนาบวิบัติมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประเมินการวิบัติของลาดดินและการระบุตำแหน่งของเครื่องมือเตือนภัย โดยกราฟนี้ใช้ประมาณความลึกของลาดดินที่มีโอกาสเกิดระนาบวิบัติในช่วงเฟสการไหลซึมของน้ำฝน แต่การใช้มีข้อจำกัดอยู่แค่ในกรณีที่ลาดดินเป็นดินทราย ($c' = 0$ kPa) เท่านั้น โดยในธรรมชาติแล้วเป็นเรื่องยากที่จะพบลาดดินทรายเพียงอย่างเดียว

งานวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นงานวิจัยที่เป็นต้นแบบที่ดีในการศึกษาผลกระทบและการตอบสนองของลาดดินต่อน้ำฝน รวมไปถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งการวิบัติส่วนใหญ่เป็นแบบการลื่นไหลลงมาตามระนาบการวิบัติ (Translational slides) โดยการประมาณความลึกของระนาบวิบัติเป็นเรื่องที่สำคัญมากต่อการระบุตำแหน่งของเครื่องมือเตือนภัย และเรื่องของระยะเวลาที่ลาดดินจะเกิดการวิบัติก็มีความสำคัญต่อระบบเตือนภัยเช่นกัน ซึ่งจะสามารถทำให้ประชาชนในพื้นที่เสี่ยงภัยประมาณเวลาการเตรียมการรับมือต่อภัยพิบัติที่จะเกิดขึ้นได้อย่างทันท่วงที งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาในเรื่องของระยะเวลาของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่มีผลต่อการเกิดการวิบัติของลาดดินร่วมด้วย โดยจากการศึกษาของ Lee et al., (2011) และ Chinkulkijniwat et al., (2016) ที่พบว่าค่าความชื้นของลาดดินไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นสูงสุด (w_{wb}) ในช่วงการไหลซึม ประกอบกับ Lee Min Lee ที่ทำการทดสอบการซึมของน้ำฝนในแบบจำลองหนึ่งมิติและสองมิติ พบว่าผลของค่าแรงดึงน้ำที่ได้เหมือนกันทั้งสองแบบ จึงเป็นเหตุผลให้งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองการทดสอบแบบหนึ่งมิติ เพื่อทำการศึกษาระยะเวลาการซึมของน้ำฝนผ่านผิวดินภายใต้พื้นฐานของ Green-Ampt model

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

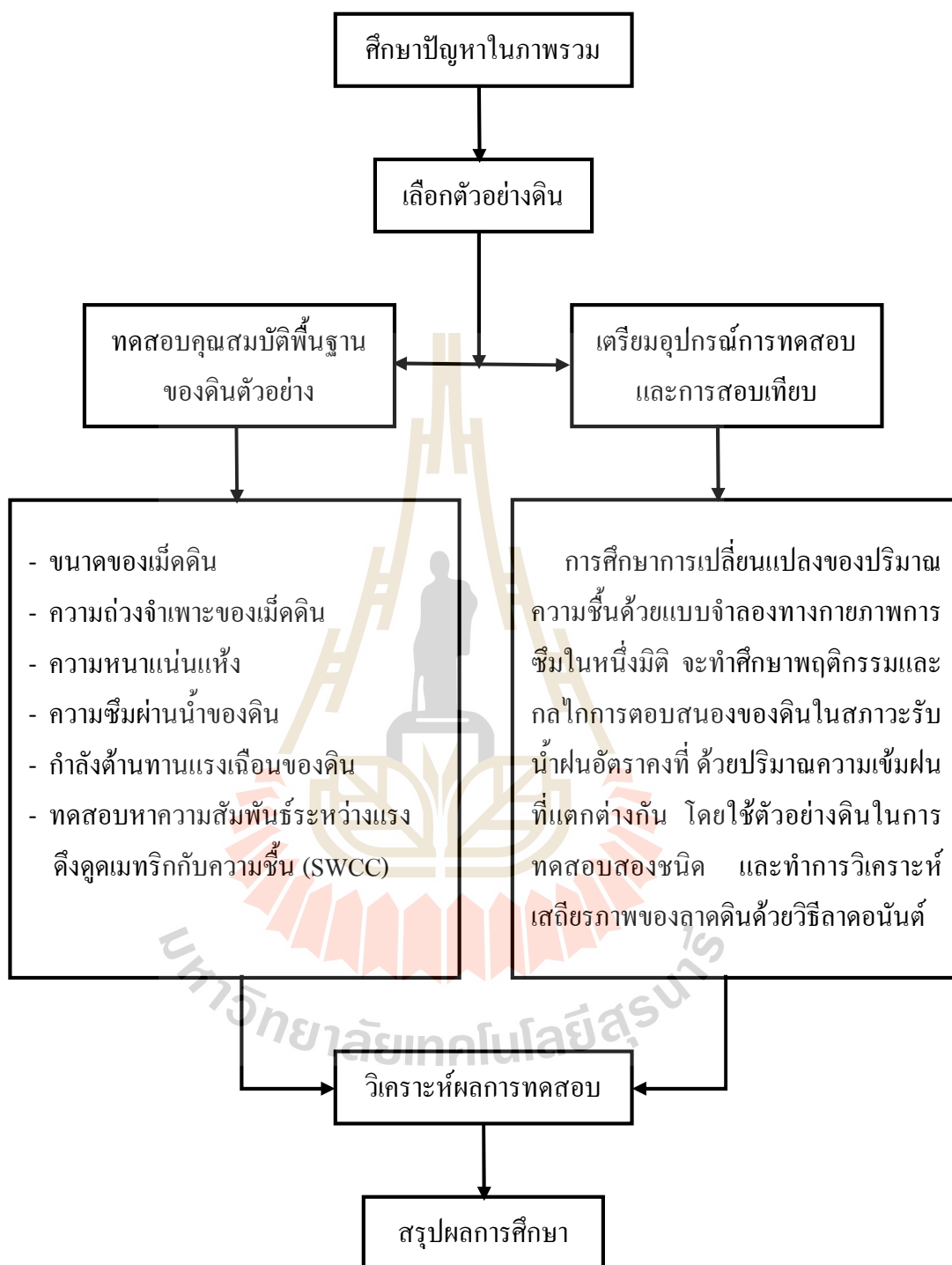
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นต่อการตอบสนองทางชลศาสตร์และกลไกทางกายภาพของดินเม็ดหยาบที่มีหน่วยแรงยึดเกาะ ประกอบด้วย กระบวนการไหลซึมของน้ำฝนและการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน โดยการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินขึ้นภายใต้สภาวะรับน้ำฝน ซึ่งได้ทำการศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ และสร้างแบบจำลองน้ำฝนในห้องปฏิบัติการวิธีการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1

3.2 การเลือกและเตรียมตัวอย่างดิน

ดินที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ประเภท คือ

1) ดินร่วนปนทราย (Silty sand) เป็นดินตัวอย่างที่เก็บมาจากบ้านคลองสะทอน ตำบลวังหมี่ อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นพื้นที่ตั้งสถานีเตือนภัย ระบบเตือนภัยน้ำหลาก ดินถล่ม ระดับเฟืองระวัง โดยทำการเก็บตัวอย่างดินแบบมีการรบกวนตัวอย่างขณะเก็บ (Disturbed) ที่ความลึกช่วงผิวดินถึง 1 เมตร รูปที่ 3.2(a) เป็นสภาพผิวดินของพื้นที่บ้านคลองสะทอนที่ถูกนำมาทดสอบ

2) ดินสังเคราะห์ (Synthetic soil) เป็นดินตัวอย่างที่ได้จากการผสมดินขึ้นมาใหม่ระหว่างดินร่วนปนทราย จากอำเภอวังน้ำเขียว กับดินทราย (Chinkulkijniwat et al., 2016) เพื่อให้ได้ค่าการซึมผ่านน้ำของดินอยู่ในช่วง 50-100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ทดสอบด้วยการใช้อัตราส่วนผสมต่างๆและนำไปหาค่าความซึมผ่านน้ำ อัตราส่วนระหว่างดินร่วนปนทรายต่อดินทรายที่ทดสอบคือ 50 : 50 , 40 : 60 , และ 30 : 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนผสมที่ให้ค่าการซึมผ่านน้ำอยู่ในช่วงดังกล่าวประกอบด้วยดินร่วนปนทราย 30% และดินทราย 70% โดยน้ำหนัก รูปที่ 3.2(b) เป็นสภาพตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ

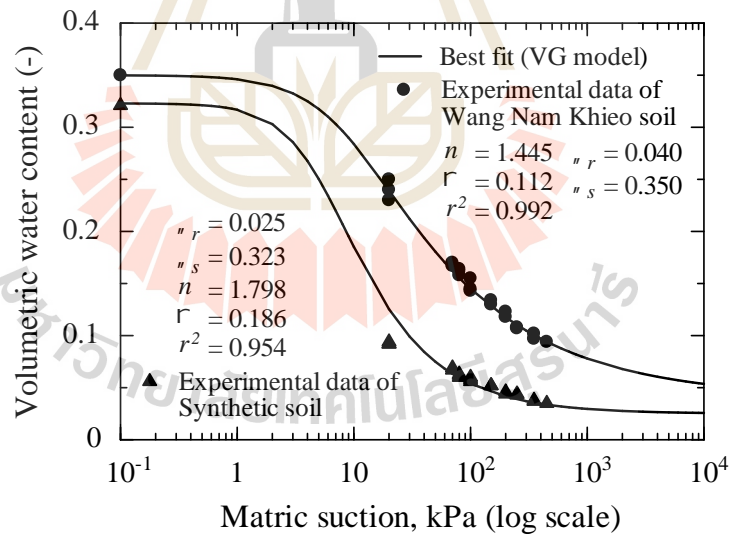
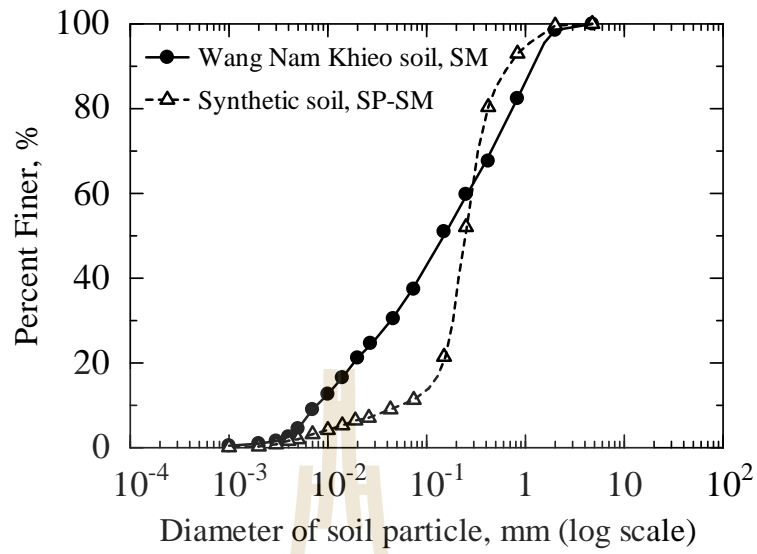


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

คุณสมบัติพื้นฐานของดินเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมในการศึกษาและวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ดินในการทดสอบสองชนิด คือ ดินร่วนปนทราย (ดินวังน้ำเขียว) และ ดินทรายปนดินตะกอน (ดินสังเคราะห์) ดินทั้งสองจะถูกทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินตามมาตรฐาน ASTM ดังนี้ โดยทำการวิเคราะห์การกระจายของอนุภาค (Particle size distribution) ด้วยการทดสอบร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) และการทดสอบไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ตามมาตรฐาน ASTM D 422-63 และจำแนกด้วยระบบ Unified Soil Classification ตามมาตรฐาน ASTM D 2487-69 โดยการคำนวณร้อยละของอนุภาคดินเป็นกลุ่มต่างๆ ดังนี้ ทราย (Sand) ขนาดอนุภาค 0.05-2.0 มิลลิเมตร ทรายแป้ง (Silt) ขนาดอนุภาค 0.002-0.05 มิลลิเมตร และ ดินเหนียว (Clay) ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 หาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of soil) ตามมาตรฐาน ASTM D 854 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน (Permeability) ตามมาตรฐาน ASTM D 2434-68 หาค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry density) ตามมาตรฐาน ASTM D 698-70 หากำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test) แบบเฉือนแห้ง คือ ดินที่ใช้ทดสอบมีค่าความชื้นเป็นศูนย์ ตามมาตรฐาน ASTM D 3080 และทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงคูคเมทริกกับความชื้น (SWCC) โดยวิธีห่มมือแรงดัน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 6836-02 โดยผลการทดสอบของตัวอย่างดินที่เก็บจาก อ.วังน้ำเขียว จ.นครราชสีมา ให้ค่าใกล้เคียงกับการศึกษาที่ผ่านมาของ หลุทัย มาศไค้ง (2533) ซึ่งพบว่าเป็นดินประเภทเดียวกัน จึงนำผลการทดสอบของงานวิจัยดังกล่าวมาปรับปรุงใช้กับผลการทดสอบที่ได้ในงานวิจัยนี้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงคูคเมทริกกับความชื้นดิน แสดงดังรูปที่ 3.4 และแสดงคุณสมบัติทั้งหมดของดินตัวอย่างตามตารางที่ 3.1



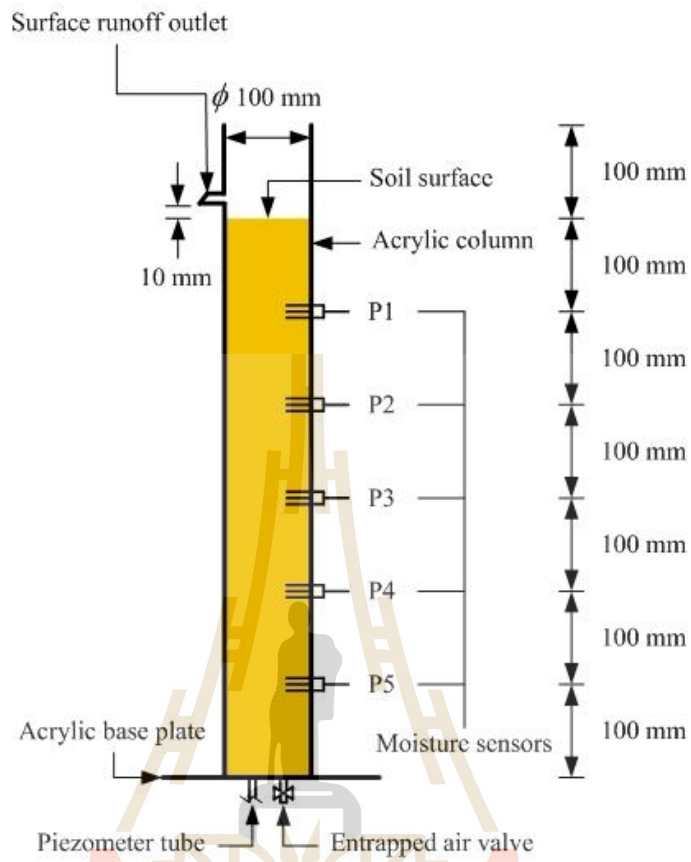
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติ	หน่วย	ค่า
ดินวังน้ำเขียว		
ต.วังหมี่ อ.วังน้ำเขียว จ.นครราชสีมา		
● USCS	-	SM
● ดินเหนียว	%	2
● ดินตะกอน	%	36
● ดินทราย	%	62
● ความถ่วงจำเพาะ, G_s	-	2.59
● ความหนาแน่นแห้ง, \dots_d	กรัม/ลบ.ซม.	1.64
● ความพรุน, p	-	0.350
● ความซึมผ่านน้ำของดิน, k_s	มม./ชม.	15
● ค่ามุมเสียดทานภายใน, $\{'$	($^{\circ}$)	30
● ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน, c'	กิโลปาสคาล	5
ดินสังเคราะห์ (Synthetic soil)		
● USCS	-	SP-SM
● ดินเหนียว	%	1
● ดินตะกอน	%	10
● ดินทราย	%	89
● ความถ่วงจำเพาะ, G_s	-	2.62
● ความหนาแน่นแห้ง, \dots_d	กรัม/ลบ.ซม.	1.75
● ความพรุน, p	-	0.323
● ความซึมผ่านน้ำของดิน, k_s	มม./ชม.	65
● ค่ามุมเสียดทานภายใน, $\{'$	($^{\circ}$)	36
● ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน, c'	กิโลปาสคาล	0

3.4 การสร้างแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ และแบบจำลองน้ำฝน

3.4.1 รายละเอียดของแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ

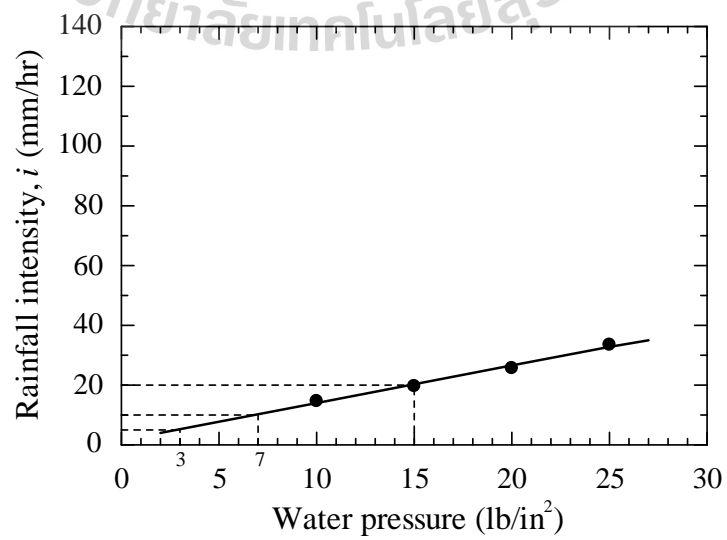
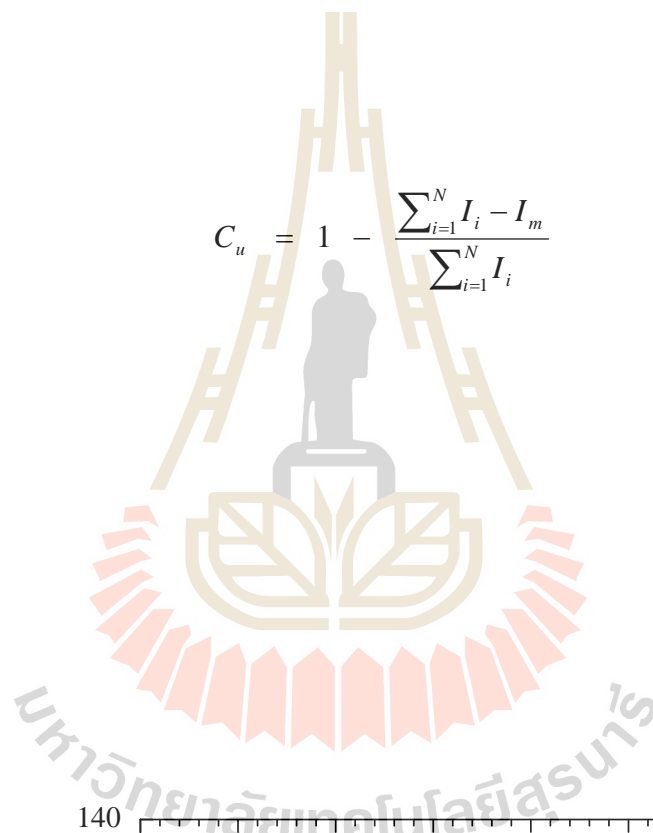
แบบจำลองมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกเพื่อใช้บรรจุดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ทำด้วยอะคริลิกใสเพื่อให้ง่ายต่อมองเห็นและสังเกตพฤติกรรมการซึมของน้ำฝน มีความหนา 5 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และสูง 700 มิลลิเมตร ฐานของแบบจำลองทำจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 10 มิลลิเมตร ขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร ด้านข้างด้านหนึ่งของท่ออะคริลิกเจาะรูขนาดกว้าง 3 มิลลิเมตร สูง 30 มิลลิเมตร จำนวน 5 รู มีระยะห่างจากฐาน 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อใช้ในการติดตั้งตัววัดความชื้น (Moisture Sensors) และอีกด้านหนึ่งของท่อถูกเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เพื่อติดตั้งท่อระบายน้ำขังที่ผิวดิน (Surface runoff outlet) ที่ระดับเหนือผิวดิน 10 มิลลิเมตร ที่ฐานด้านล่างเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู เพื่อติดตั้งตัววัดระดับน้ำใต้ดิน (Piezometer) ด้วยท่อวางใสปลายเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เพื่อใช้สังเกตการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำเมื่อน้ำฝนซึมผ่านดินจากผิวดินจนถึงชั้นที่บ่อน้ำที่จำลองขึ้น หลังจากนั้นคือระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นอีก 1 รู ทำการติดตั้งวาล์วระบายอากาศเพื่อไล่อากาศที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินขณะที่น้ำกำลังซึมผ่านดิน ที่อาจจะมีผลต่อการวัดปริมาณความชื้น ที่พื้นล่างภายในแบบจำลองได้ใช้แผ่นจีไอเทคไทล์วางไว้เพื่อให้หน้าไหลผ่านออกเมื่อน้ำฝนซึมถึงชั้นที่บ่อน้ำ และทำหน้าที่กันไม่ให้ดินที่ใช้ในการทดสอบเข้าไปอุดตันอยู่ภายในท่อสังเกตระดับน้ำและท่อระบายอากาศ ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแบบจำลองท่ออะคริลิกหนึ่งมิติ ไว้ในรูปที่ 3.5

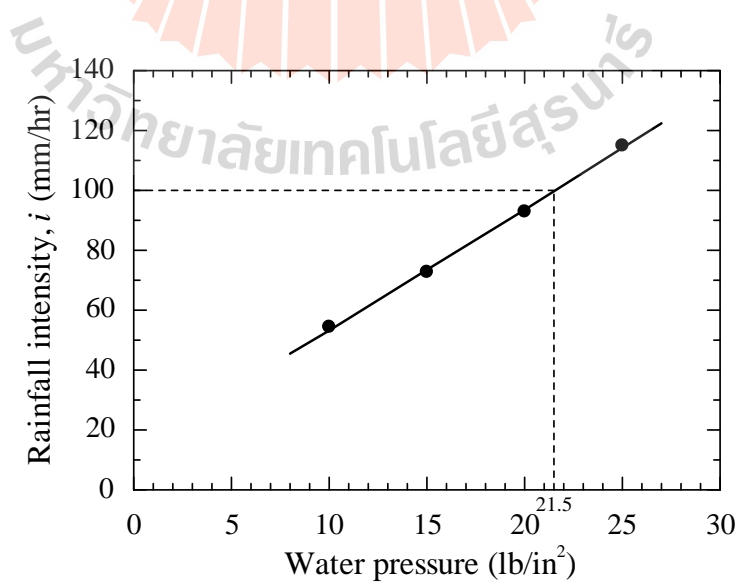
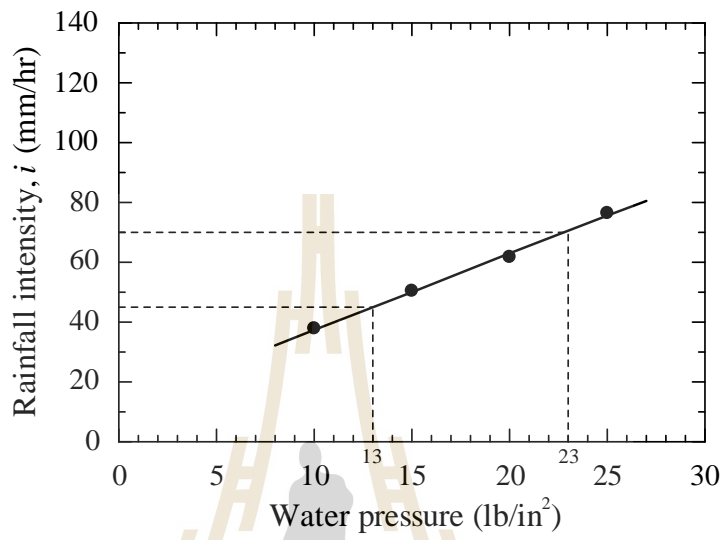


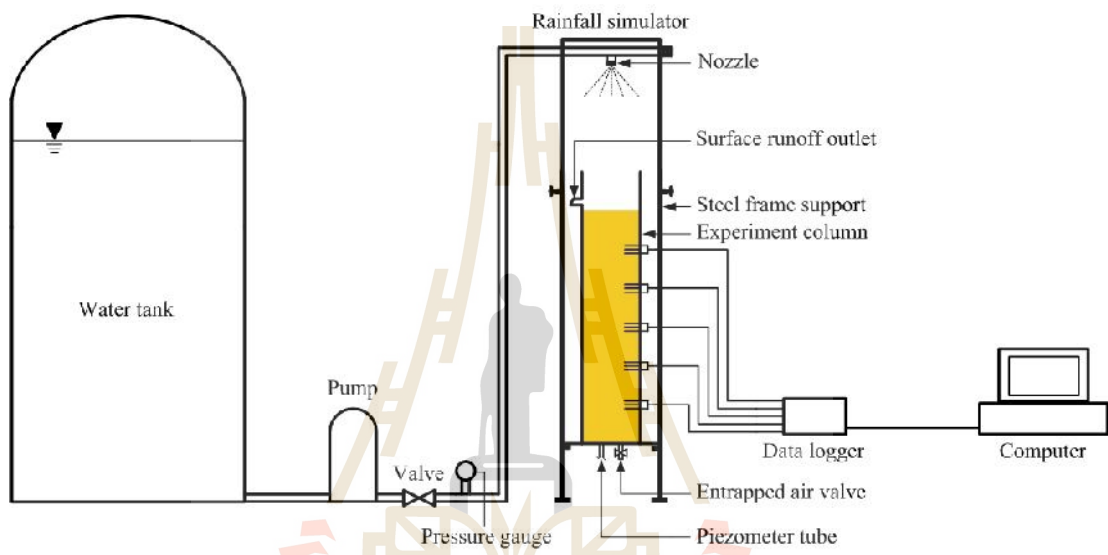
C_u

$$C_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N I_i - I_m}{\sum_{i=1}^N I_i}$$

N
 I_i
 I_m







มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6) ทำซ้ำข้อที่ 1 ถึง 5 โดยมีการเพิ่มน้ำลงในดินเพื่อแปรผันความชื้น

เมื่อทำการสอบเทียบหัววัดแล้วนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเชิงปริมาตรที่ได้จากหัววัดความชื้น (w_v) ความชื้นโดยน้ำหนักในมวลดิน (w) และความชื้นเชิงปริมาตรที่ถูกต้อง (w_c) เพื่อปรับแก้ค่าความชื้น รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่ได้จากการคำนวณกับค่าความชื้นที่อ่านได้จากหัววัดความชื้น พบว่าค่าความชื้นที่ได้จากสมการกับค่าที่อ่านได้จากหัววัดความชื้นมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ค่าความชื้นที่ได้จากหัววัดความชื้น เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการ โดยดินวังน้ำเขียว (SM) ปรับแก้จากสมการที่ 3.2 สำหรับหัววัดความชื้นแบบสองขารุ่น EC-5 และสมการที่ 3.3 สำหรับหัววัดความชื้นแบบสามขารุ่น SET สำหรับดินสังเคราะห์ (SP-SM) ปรับแก้จากสมการที่ 3.4 สำหรับหัววัดความชื้นแบบสองขารุ่น EC-5 และสมการที่ 3.5 สำหรับหัววัดความชื้นแบบสามขารุ่น SET

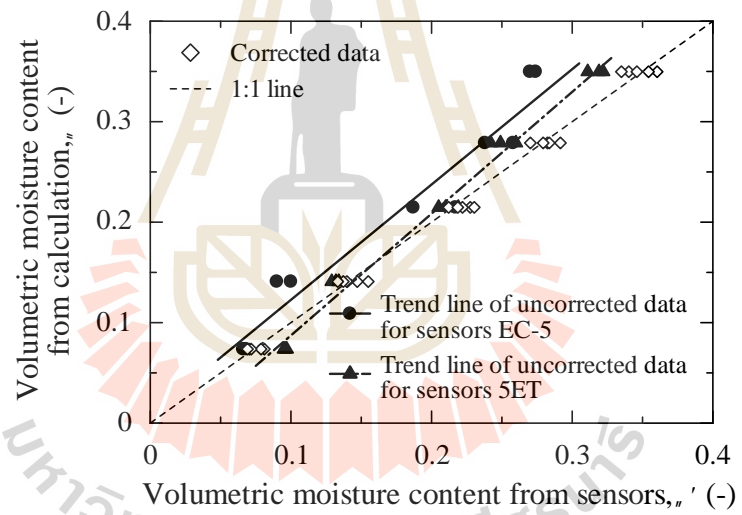
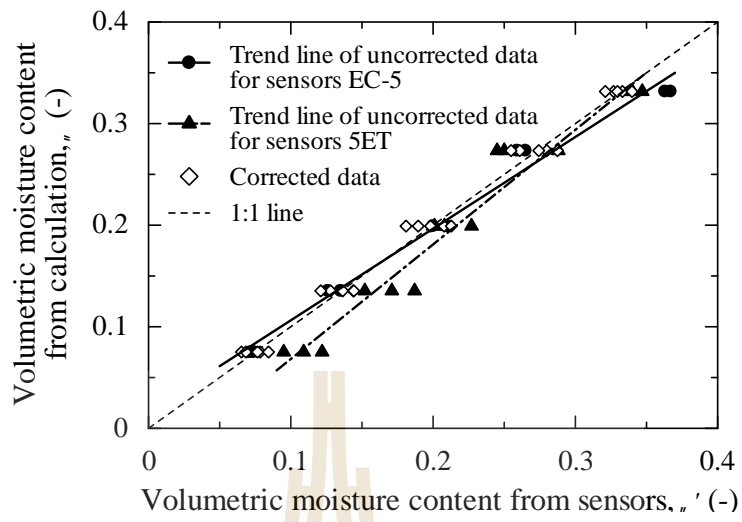
$$w_c = 0.9500 w_v + 0.0082 \quad (3.2)$$

$$w_c = 1.2233 w_v - 0.0649 \quad (3.3)$$

$$w_c = 1.1838 w_v + 0.0006 \quad (3.4)$$

$$w_c = 1.3002 w_v - 0.0544 \quad (3.5)$$

เมื่อ w_v คือ ค่าความชื้นเชิงปริมาตรที่ได้จากหัววัดความชื้น



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เริ่มต้นด้วยการนำดินตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบทั้งหมดตากทิ้งไว้ที่อากาศแห้งเป็นเวลา 20 วัน จนดินมีลักษณะแห้งหรือมีความชื้นค่าหนึ่ง หลังจากนั้นทำการบดอัดดินลงในท่ออะคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 700 มิลลิเมตร ให้ดินมีความสูง 600 มิลลิเมตร ซึ่งการเตรียมดินภายในท่อทรงกระบอกทดสอบนั้นจำเป็นที่จะต้องทำให้ดินทดสอบเป็นเนื้อเดียวกัน การบดอัดดินจะแบ่งออกเป็น 12 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นจะมีความหนา 50 มิลลิเมตร ดินที่ถูกควบคุมในแต่ละชั้นจะมีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 1.64 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (สำหรับดินวงน้ำเขียว, SM) และ 1.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (สำหรับดินสังเคราะห์, SP-SM) ในขั้นตอนการบดอัดดินนั้นต้องทำการติดตั้งตัววัดความชื้น (Sensors) ที่ผ่านการสอบเทียบเรียบร้อยแล้วกับรูที่อยู่ทางด้านข้างของท่ออะคริลิกที่ระดับ 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตร จากฐานของแบบจำลอง และทำการติดตั้งระบบทำน้ำฝนไว้เหนือท่ออะคริลิก ซึ่งต่อท่อมาจากแทงค์น้ำ โดยมีวาล์วและมาตรวัดแรงดันน้ำเป็นตัวควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลออกเป็นน้ำฝน ดังรูปที่ 3.7 เมื่อพร้อม

ทดสอบแล้วทำการเปิดวาล์วน้ำให้ระดับแรงดันน้ำได้ตามที่ต้องการ (ที่อ่านได้จากกราฟการสอบเทียบปริมาณน้ำฝน) และปล่อยให้ น้ำซึมลงสู่แท่งดินทดสอบ ตัววัดความชื้นจะเริ่มเก็บข้อมูลความชื้นเชิงปริมาตรและอุณหภูมิของดิน ทุกๆ 2 นาที ข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกไว้ในเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) จนดินในแบบจำลองอิ่มตัวด้วยน้ำ และระดับน้ำที่ไหลออกทางท่อวัดระดับน้ำได้ดินขึ้นสูงเท่ากับระดับผิวดินทดสอบ เป็นอันเสร็จสิ้นการทดสอบ

ตารางที่ 3.2 โปรแกรมการทดสอบ

การทดสอบที่	ดินที่ใช้	หน่วยน้ำหนักแห้ง, d (กรัม/ลบ.ซม.)	ความชื้นฝน, i (มม./ซม.)	ความชื้นฝน / ความชื้นผ่านน้ำ i/k_s
1	SM	1.64	5	0.333
2	SM	1.64	10	0.667
3	SM	1.64	20	1.333
4	SM	1.64	45	3.000
5	SM	1.64	70	4.667
6	SP-SM	1.75	10	0.154
7	SP-SM	1.75	20	0.308
8	SP-SM	1.75	45	0.692
9	SP-SM	1.75	70	1.077
10	SP-SM	1.75	100	1.538

3.6.2 เงื่อนไขการทดสอบ

แบบจำลองแท่งดินหนึ่งมิติได้รับการออกแบบมาเพื่อที่จะศึกษาการตอบสนองต่อความชื้นของดิน ระยะเวลาการซึมของปริมาณน้ำฝน และการเกิดน้ำขังบนผิวดิน ดินที่ใช้ในการทดสอบใช้ดินสองประเภท ดินแต่ละประเภทจะทำการทดสอบ 5 การทดสอบ โดยแต่ละการทดสอบใช้ค่าปริมาณความชื้นฝนที่แตกต่างกัน การทดสอบแต่ละครั้งถูกกำหนดปริมาณความชื้นฝนในช่วงที่ต่ำกว่า ใกล้เคียง และสูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ความชื้นฝนสำหรับดินวังน้ำเขียว คือ 5, 10, 20, 45 และ 70 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และความชื้นฝนสำหรับดินสังเคราะห์คือ 10, 20, 45, 70 และ 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โปรแกรมการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

ความเข้าใจในพฤติกรรมของน้ำในดินมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพิจารณาเสถียรภาพของลาดดิน งานวิจัยนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของ Green-Ampt model ซึ่งเป็นแนวคิดที่พัฒนามาจากกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า (1) พิจารณาการซึมของน้ำผ่านดินได้สภาวะน้ำขังบนผิวดิน, $i/k_s > 1$ (2) การเคลื่อนที่ของระนาบความชื้น (wetting front) จะต้องสม่ำเสมอ (3) เมื่อดินเปียกน้ำแล้ว ภายในโซนของดินเปียกจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของความชื้นในดิน และ (4) เขตดินเปียกจะต้องมี negative pressure ที่คงที่ แต่มีหลายกรณีที่เกิดเมื่อฝนตกแล้วไม่เกิดน้ำขังที่ผิวดิน ($i/k_s < 1$) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงดัชนีการซึม (Infiltration index, i/k_s) หรืออัตราส่วนระหว่างความเข้มฝนต่อความสามารถซึมผ่านได้ของดินที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ จะส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการวิบัติของลาดดิน

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์อิทธิพลของความเข้มฝนต่อพฤติกรรมของน้ำผ่านผิวดินลงสู่ชั้นดิน และกลไกการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในชั้นดินที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ ภายใต้เงื่อนไขของความเข้มฝนที่แตกต่างกันและตกด้วยอัตราคงที่ และไม่มีการระบายน้ำใต้ดิน ตลอดจนการประเมินเสถียรภาพลาดดินได้ถูกนำเสนอ ดังนี้

4.2 พฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน

การตอบสนองของความชื้นในดินที่ตรวจวัดได้ระหว่างทำการทดสอบปล่อยน้ำฝนแบบอัตราคงที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1, 4.2 สำหรับดินวังน้ำเขียว (SM) และรูปที่ 4.3, 4.4 สำหรับดินสังเคราะห์ (Synthetic soil, SP-SM) การทดสอบทั้งหมดใช้ตัววัดความชื้น (Sensors) ในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นที่ระดับความลึกต่างๆ ซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ

แบบจำลองแท่งดิน โดยตัววัดความชื้น P1, P2, P3, P4 และ P5 ตรวจวัดปริมาณความชื้นเชิงปริมาตรที่ระดับความลึก 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตร จากผิวดิน ตามลำดับ

สำหรับกรณี $i/k_s > 1$ รูปที่ 4.1(c) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเชิงปริมาตรต่อเวลา สำหรับปริมาณความชื้นฝน 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i = 20$ มม./ชม.) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงที่สูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ($i > k_s = 4.17 \times 10^{-6}$ ม./นาที่ หรือ 15 มม./ชม.) อัตราส่วนระหว่างค่าความชื้นฝนต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินเท่ากับ 1.333 ($i/k_s = 1.333$) ความชื้นเชิงปริมาตรเริ่มต้นของดินมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.081 ถึง 0.085 หลังจากเริ่มทำการทดสอบปล่อยน้ำฝนตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P1 (Sensor P1) ตอบสนองต่อความชื้นครั้งแรกเมื่อเวลาผ่านไป 50 นาที และมีค่าปริมาณความชื้นคงที่ที่ 0.350 ตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P2, P3, P4 และ P5 เริ่มตอบสนองต่อความชื้นเมื่อเวลาผ่านไป 160, 270, 405 และ 545 นาที ตามลำดับ โดยค่าความชื้นเชิงปริมาตรที่วัดได้จากตัววัดความชื้นทุกตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันและคงที่ตลอดการทดสอบที่ 0.350 หรือมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 100% จากการทดสอบพบว่าเมื่อเวลาทดสอบผ่านไป 58 นาที เกิดน้ำขัง (Ponding) ที่ผิวดิน หลังจากเกิดน้ำขังในช่วงเวลานี้ดินจะมีความชื้นผ่านน้ำที่สภาวะอิ่มตัว (Saturated state) จนสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ เป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียวคือช่วงการไหลซึม และจากผลการทดสอบยังพบอีกว่าระนาบความชื้นจะเคลื่อนที่ช้าลงในช่วงแรก และในเวลาถัดไปจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราคงที่ไปตลอดการทดสอบ เนื่องจากก่อนเริ่มการทดสอบดินมีลักษณะแห้งโดยทางกายภาพคือมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่ำ จัดเป็นดินที่อยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แรงดันน้ำจะมีค่าเป็นลบ เมื่อเริ่มการทดสอบปล่อยน้ำฝนในช่วงแรกผิวหน้าของดินจะดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากมีความต่างศักย์ของการซึมอยู่มาก ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำ ซึ่งถูกศึกษาโดย Fredlund, (2000) และเกิดแรงคาพิลลารี (Capillary) เป็นแรงดึงน้ำซึ่งเกิดเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำ ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างความเชื่อมแน่น (Cohesion) ของน้ำและการประสาน (Adhesion) ระหว่างน้ำกับผิวของอนุภาคเม็ดดินตรงผิวของน้ำ (Air - water interface) ประกอบกับมีแรงดันอากาศ (Pore - air pressure) อยู่ภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน จึงทำให้ความสามารถการไหลซึมของน้ำช้าลง ดังผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 จากหลักการความต่อเนื่องและกฎของดาร์ซีความสามารถการแทรกซึมของน้ำฝนภายใต้เงื่อนไขน้ำขังที่ผิวดินจะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลภายในดิน แสดงดังสมการต่อไปนี้ (Green and Ampt model, 1911)

$$i_c = k_w \frac{\Delta H}{\Delta Z} = k_w \frac{Z_w + S_f}{Z_w} \quad (4.1)$$

เมื่อ i_c คือ ความสามารถในการแทรกซึมของน้ำฝน (Infiltration capacity)

k_w คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินที่ wetting front

Z_w คือ ระดับความลึกของระนาบความชื้น

S_f คือ เสดแรงดึงคูดน้ำในดินที่ wetting front

ความลึกของระนาบความชื้นมีความสัมพันธ์กับการซึมสะสม ดังสมการต่อไปนี้

$$Z_w = \frac{I}{n_1 - n_0} ; I = i \times t \quad (4.2)$$

เมื่อ n_0 คือ ปริมาตรความชื้นที่สถานะเริ่มต้น

n_1 คือ ปริมาตรความชื้นหลังจากการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้น

i คือ ปริมาณความเข้มฝน

t คือ เวลา

เมื่อแทนสมการที่ 4.2 ลงในสมการที่ 4.1, สามารถเขียนสมการความสามารถแทรกซึมของน้ำฝนใหม่ได้ว่า

$$i_c = k_w \left[1 + \frac{S_f (n_1 - n_0)}{I} \right] \quad (4.3)$$

การซึมสะสมภายใต้สถานะน้ำขัง สามารถคำนวณได้จาก

$$I_p = \frac{S_f k_w (n_1 - n_0)}{i - k_w} \quad (i > k_w)$$

(4.4)

ดังนั้นเวลาที่จะเกิดน้ำขังสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$t_p = \frac{I_p}{i} = \frac{S_f k_w (n_1 - n_0)}{i(i - k_w)} \quad (i > k_w) \quad (4.5)$$

รูปที่ 4.2(c) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรตามความลึกของแท่งดิน ในช่วงเวลาที่ปล่อยน้ำฝนสำหรับความเข้มฝนเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง สังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นเกิดขึ้นเพียงช่วงแรกหรือช่วงการไหลซึมเท่านั้น และคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดสอบ เนื่องจากชั้นผิวดินอยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำตั้งแต่เริ่มเกิดน้ำขังที่ผิวดิน ค่าความชื้นเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้น คือ 0.083 ไปสู่ 0.350 หรือมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 100%

สำหรับกรณี $i/k_s < 1$ รูปที่ 4.1(a) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเชิงปริมาตรต่อเวลา สำหรับปริมาณความเข้มฝน 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินทดสอบ ($i < k_s = 4.17 \times 10^{-6}$ ม./นาที่ หรือ 15 มม./ชม.) โดยอัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มฝนต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินเท่ากับ 0.333 ($i/k_s = 0.333$) ค่าความชื้นเชิงปริมาตรเริ่มต้นของดินที่ตรวจวัดได้มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.081 ถึง 0.085 เมื่อแปลงแล้วมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 2.3% ถึง 2.4% หลังจากเริ่มทำการทดสอบปล่อยน้ำฝนตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P1 ที่ความลึก 100 มิลลิเมตร ตอบสนองต่อความชื้นครั้งแรกเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที จากน้ำฝนที่ตกลงสู่ผิวดินทำให้ระนาบความชื้นเคลื่อนตัวลงสู่ด้านล่างของชั้นดิน การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเกิดขึ้นอย่างช้าๆจากปริมาณความชื้นเริ่มต้นจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ 0.270 หรือมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 77% เมื่อระนาบความชื้นเคลื่อนที่ลงถึงความลึก 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 ระนาบความชื้นจะเคลื่อนที่ไปตามความลึกของชั้นดินด้วยอัตราเร็วคงที่ (มีค่าเท่ากับค่าความเข้มฝนที่ใช้ทดสอบ) ไปถึงความชื้นที่เรียกว่าความชื้นหลังระนาบความชื้น ($_{,wb}$) ระยะเวลาที่ตัววัดความชื้นแต่ละตำแหน่งตรวจวัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีพื้นฐานการซึมของ Green and Ampt (1911) ระดับความลึกของระนาบความชื้น ณ ตำแหน่งใดๆ คือ ปริมาณน้ำที่ดินได้รับในหนึ่งหน่วยเวลาต่อความสามารถการรับน้ำของดิน หรือกล่าวได้ว่าปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงในหนึ่งหน่วยเวลาสามารถ

เคลื่อนที่ไปได้หนึ่งหน่วยระยะทาง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 4.2 และเมื่อพิจารณาในทอมของระยะเวลาที่ระนาบความชื้นสามารถเคลื่อนที่ไปได้ ณ ความลึกใดๆ สามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

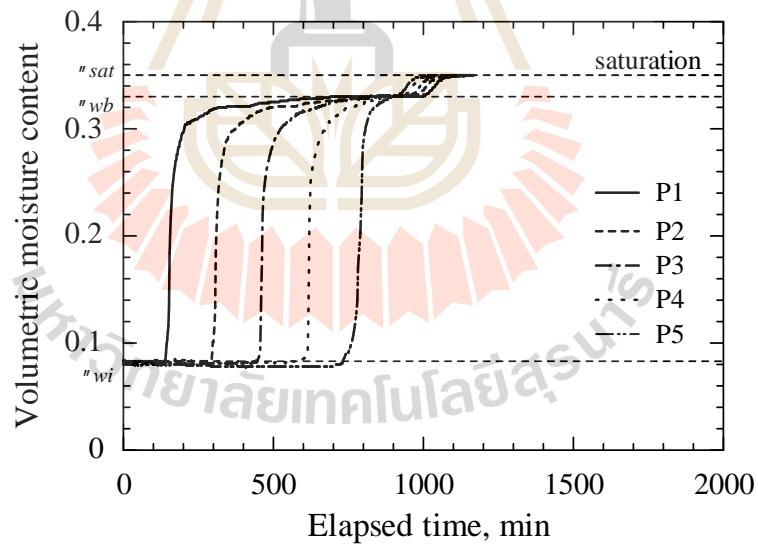
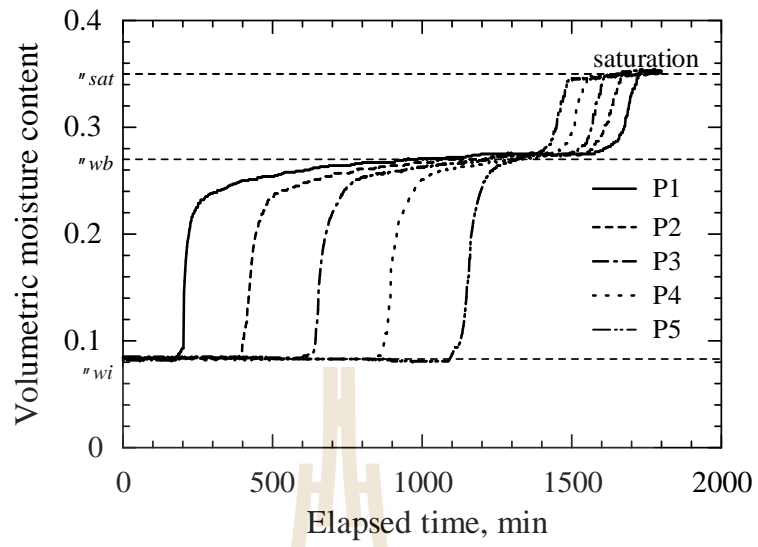
$$t = \frac{Z_w(n_1 - n_0)}{i} \quad (4.6)$$

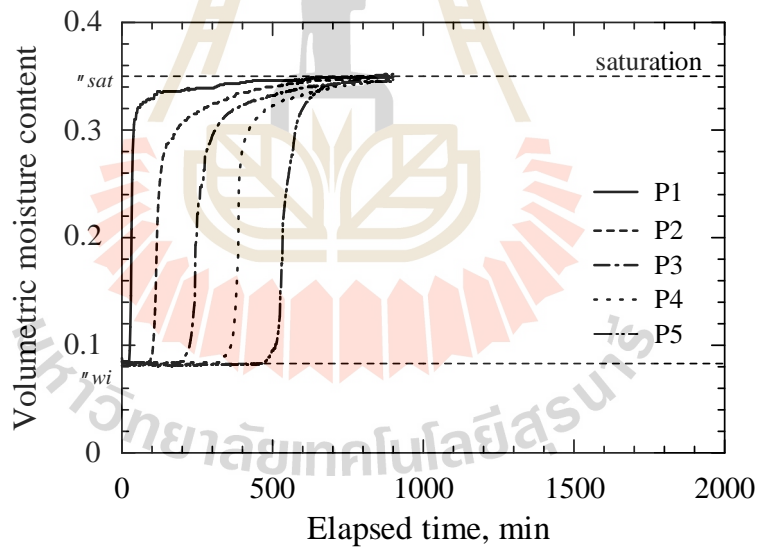
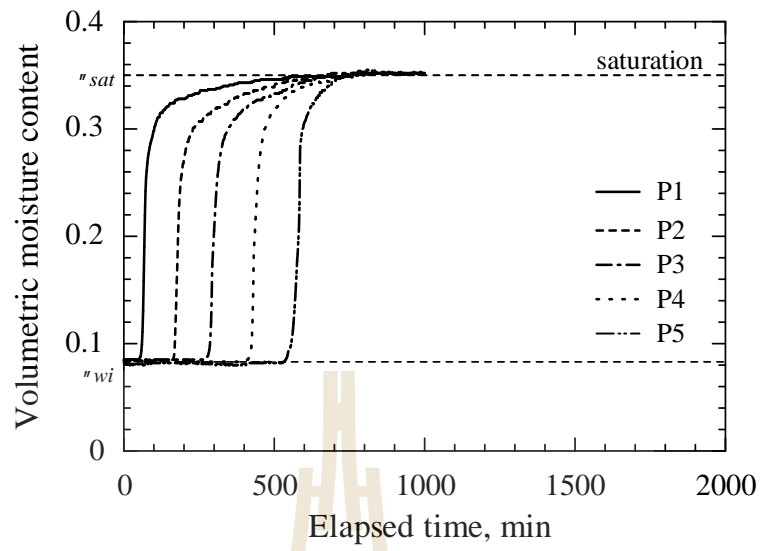
หลังจากนั้นพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นขึ้นอีกครั้งหนึ่งจากการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้น เนื่องจากพื้นของแบบจำลองไม่สามารถระบายน้ำได้ ทำให้ดินอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained state) ดังนั้นน้ำที่ซึมลงสู่ด้านล่างของชั้นดินจะเกิดการสะสมและเพิ่มระดับขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นสาเหตุทำให้เกิดการตอบสนองของตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P5 อีกครั้งเมื่อเวลาผ่านไป 1350 นาที ทำให้ค่าความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก n_{wb} ไปถึงความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (n_{sat}) คือ 0.272 ไปถึง 0.350 หรือมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 100% เมื่อระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นเกินระดับตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P5 จากนั้นตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P4, P3, P2 และ P1 ตอบสนองอีกครั้งที่เวลาประมาณ 1430, 1500, 1560 และ 1600 นาที ตามลำดับ มีการเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นเชิงปริมาตรจาก 0.272 ไปถึง 0.350 ซึ่งมีค่าเท่ากับที่ตำแหน่ง P5

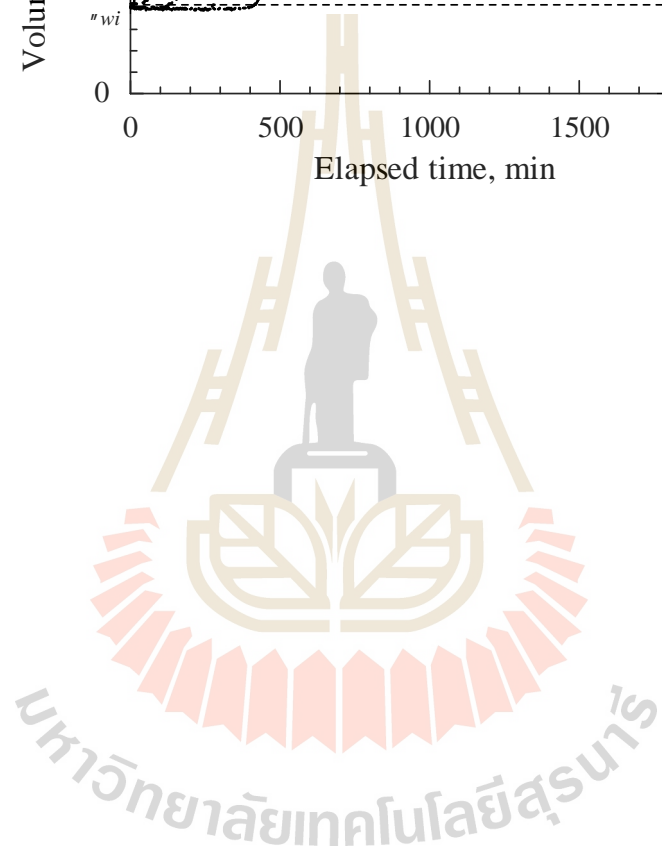
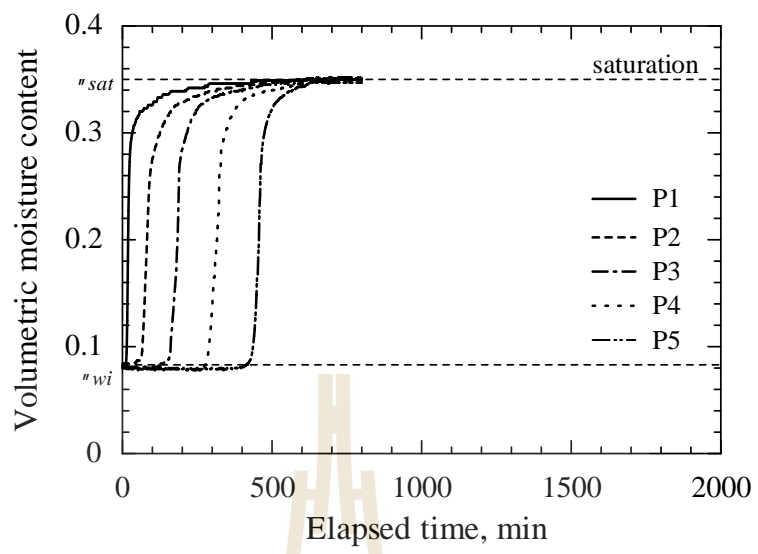
รูปที่ 4.2(a) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรตามความลึกของแท่งดินในช่วงเวลาที่ปล่อยน้ำฝนสำหรับความเข้มฝนเท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้นเกิดจากขบวนการสองขั้นตอน คือ 1) การซึมของน้ำฝนผ่านผิวดิน และ 2) การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในช่วงแรกได้จากค่าความชื้นเชิงปริมาตรเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นจาก 0.083 ไปถึง 0.270 เป็นปริมาณความชื้นที่เกิดหลังจากการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นจากผิวดิน แสดงให้เห็นว่าในขั้นตอนนี้ดินยังอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ขณะที่ช่วงที่สองจะเกิดหลังจากการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นมาถึงชั้นที่บ้น้ำของแบบจำลอง จนกระทั่งเริ่มเกิดการสะสมของปริมาณความชื้นอย่างต่อเนื่องและเกิดการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ทำให้มีค่าความชื้นเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นจนถึง 0.350 ซึ่งเท่ากับค่าปริมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัว (n_{sat}) สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยที่คล้ายคลึงกันที่มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ (Tohari et al., 2007; Huang et al., 2008; Lee et al., 2009; Huang and Yuin, 2010; Phi et al., 2013; Chinkulkijniwat et al., 2016)

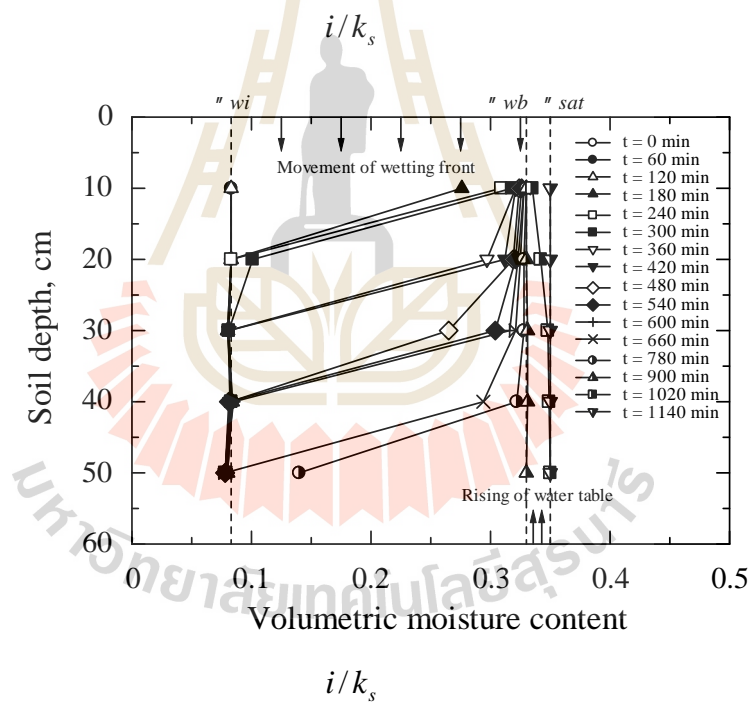
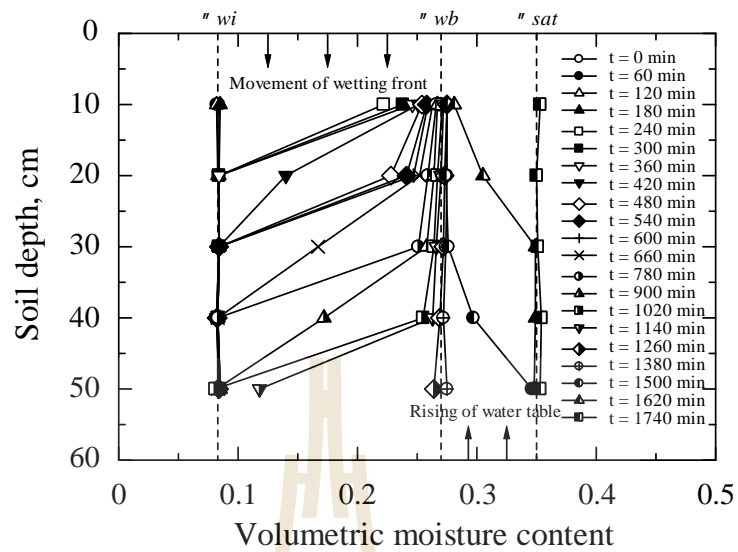
เปรียบเทียบระหว่างการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเชิงปริมาตรต่อเวลาแสดงไว้ในรูปที่ 4.1(b) และการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรกับความลึกดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2(b) สำหรับการทดสอบที่ความชื้นผืนเท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน สังเกตเห็นได้ว่าขนาดของปริมาณความชื้น (w_b) ที่เพิ่มขึ้นในช่วงการซึมมีค่าใกล้เคียงปริมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัว และสังเกตเห็นได้ว่าเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นจะเร็วกว่าที่ความชื้น 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และช้ากว่าที่ความชื้น 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยกล่าวได้ว่าปริมาณความชื้นผืนมีผลต่อเวลาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของทั้งสองช่วง ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่ถูกศึกษาโดย Chinkulkijniwat et al., (2016) ที่ได้ทำการทดสอบการตอบสนองทางชลศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินดินด้วยแบบจำลองลาดดินทรายสองมิติ

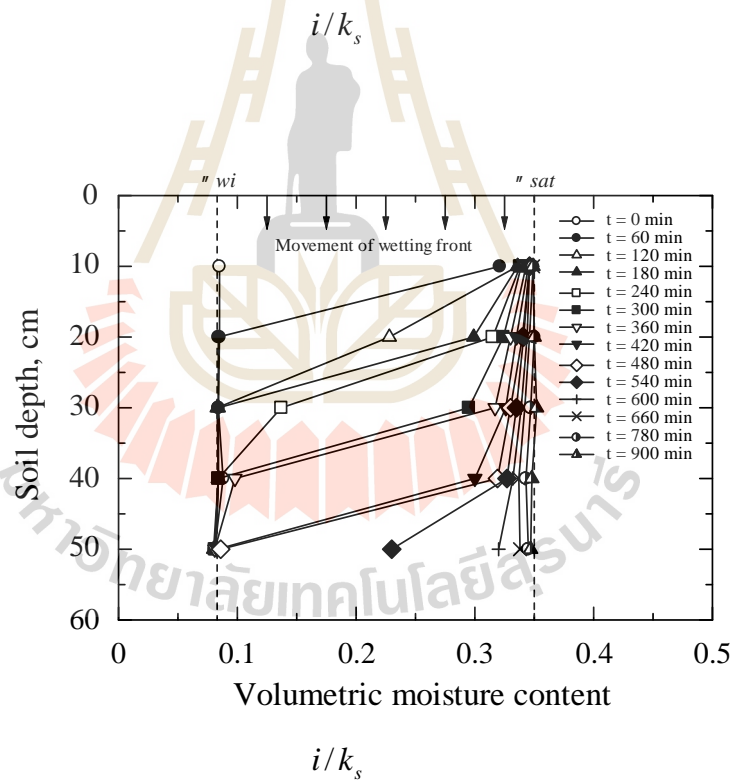
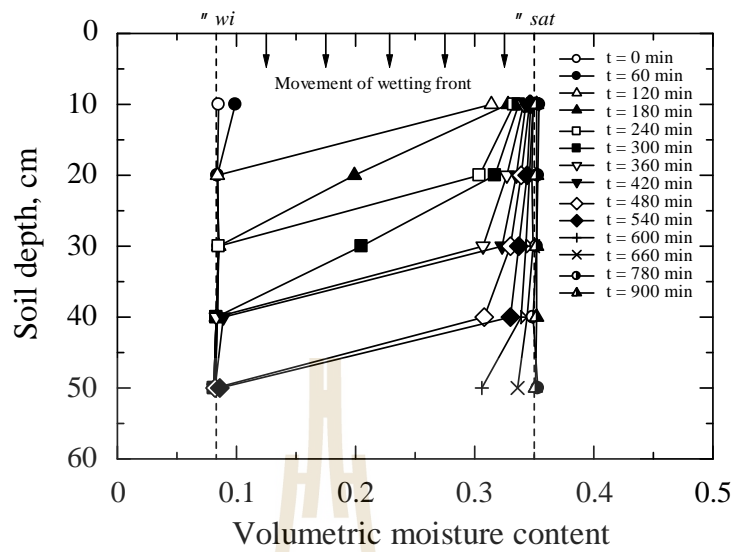


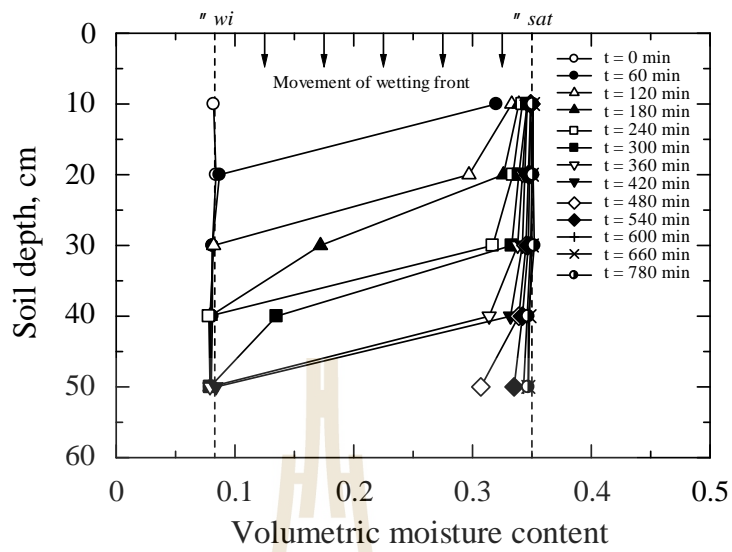












k_s

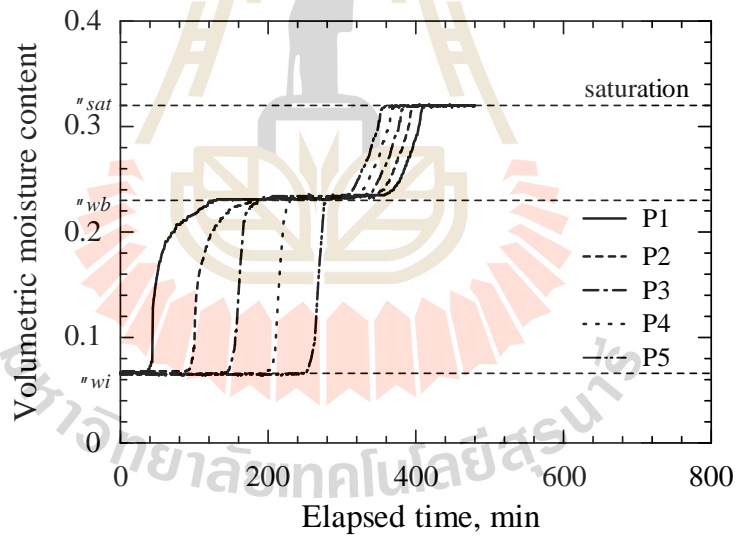
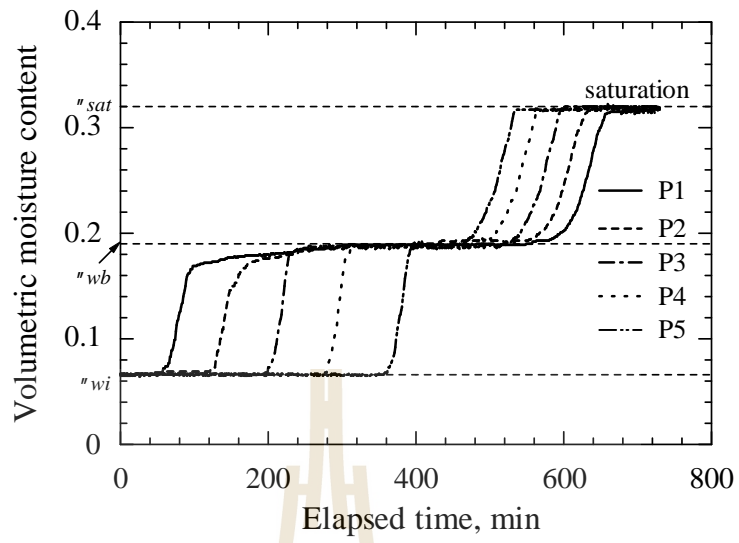
$i < k_s$

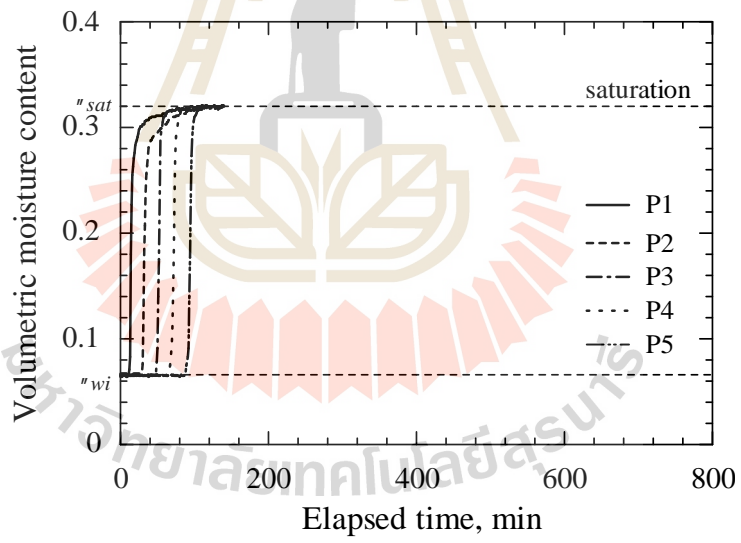
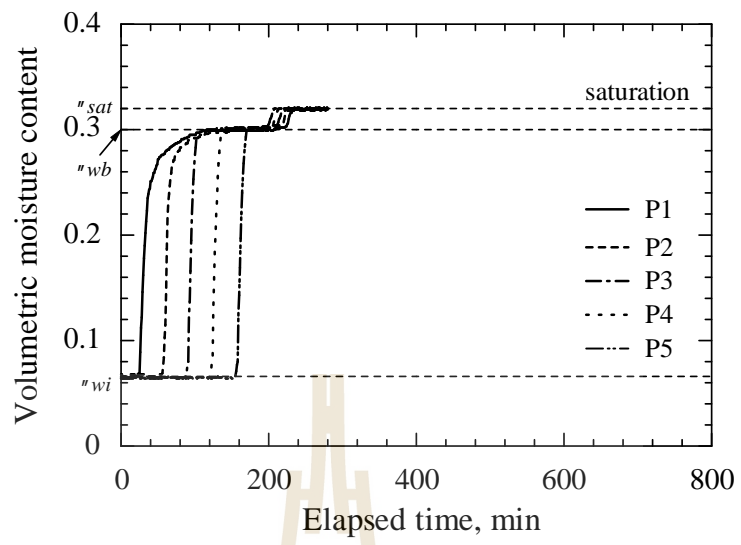
i/k_s

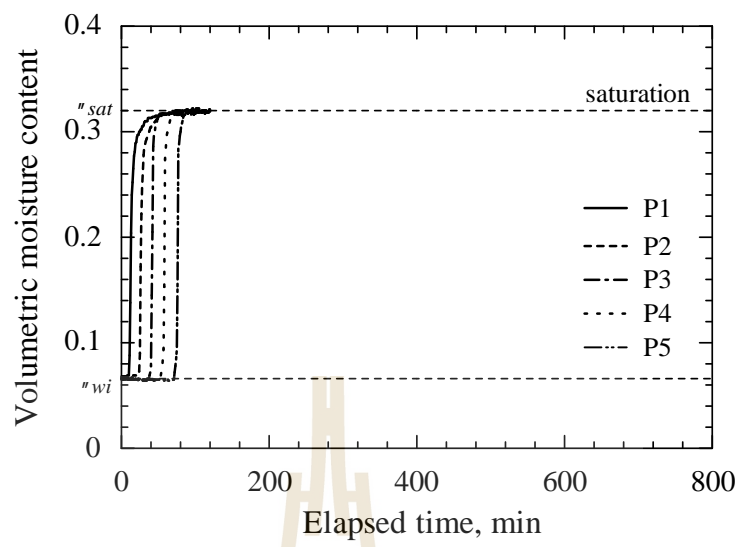
i/k_s

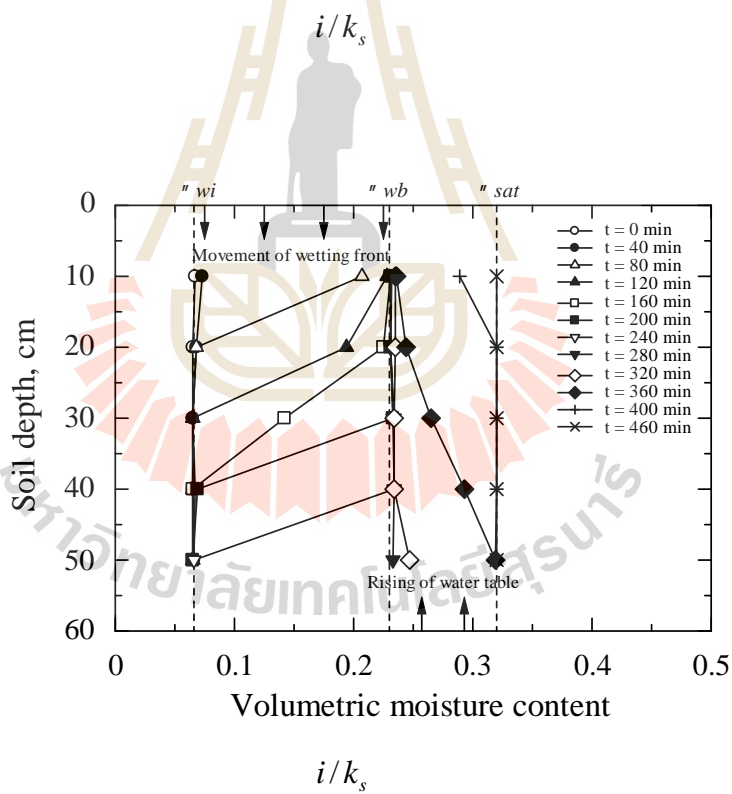
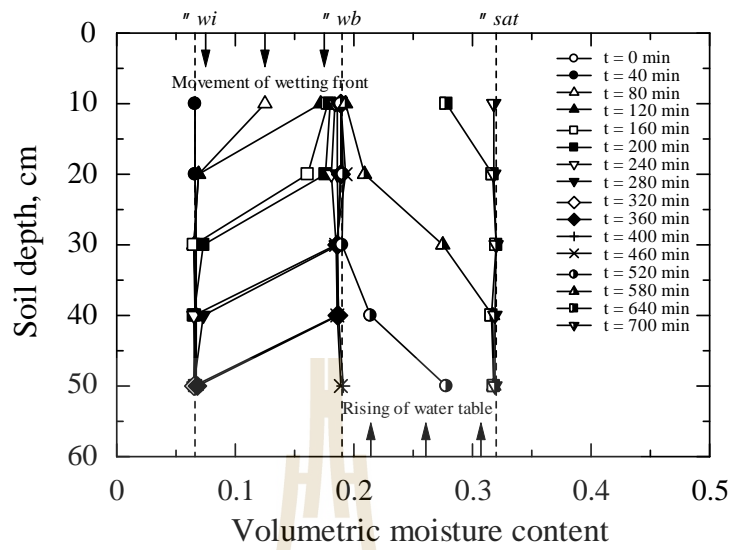
w_b

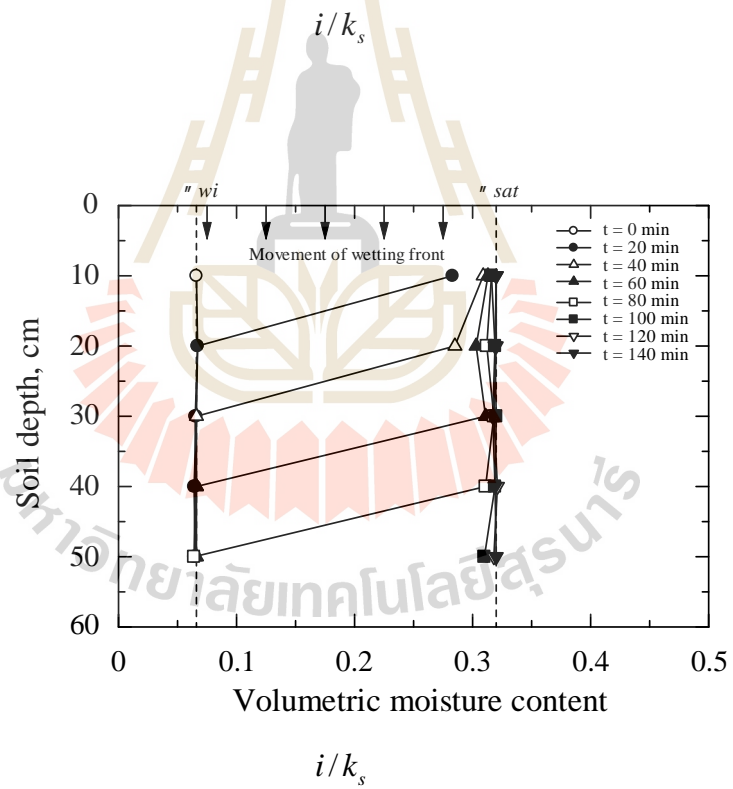
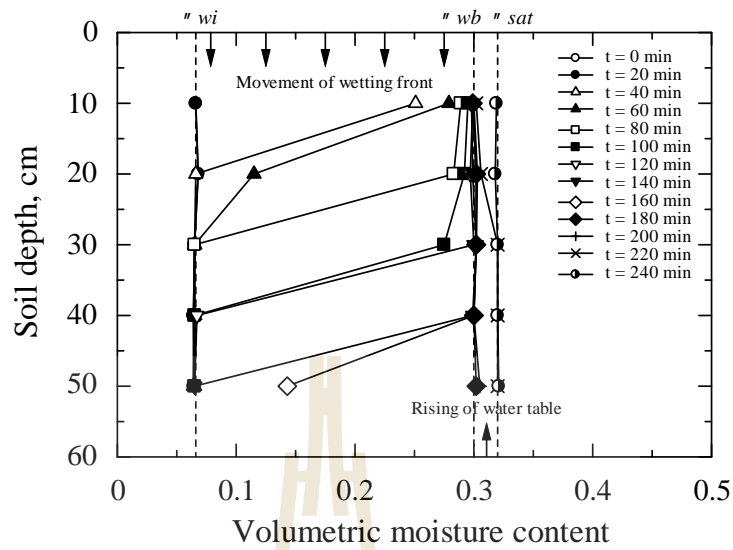
i/k_s

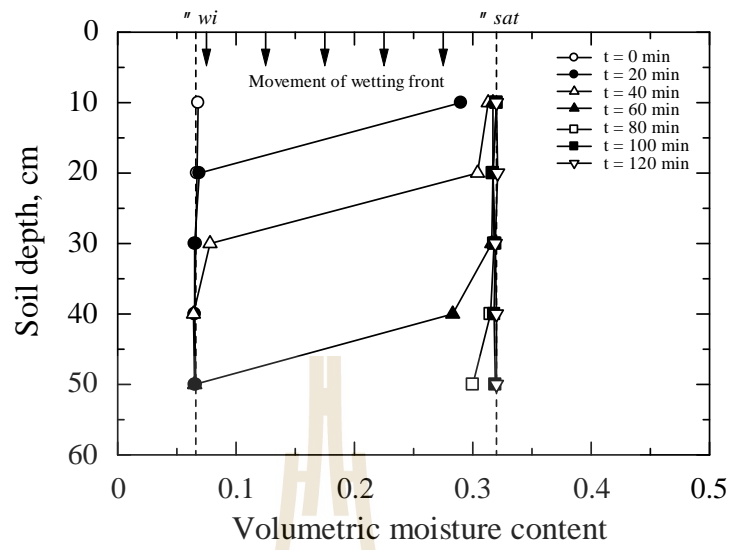


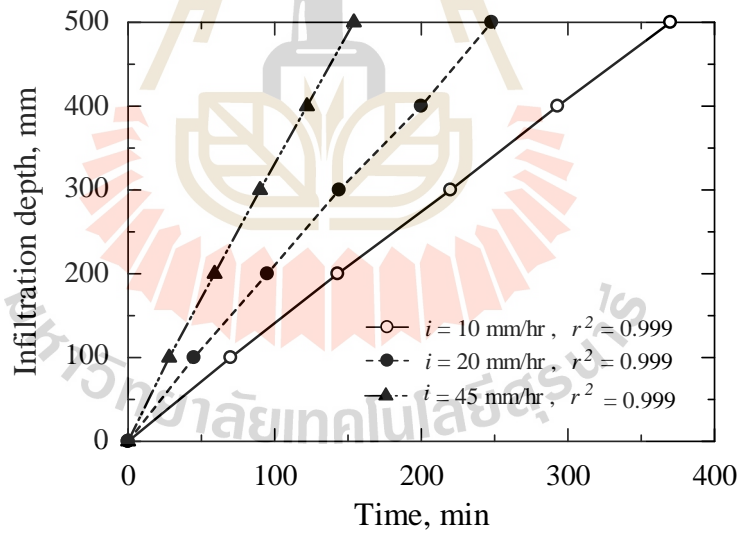
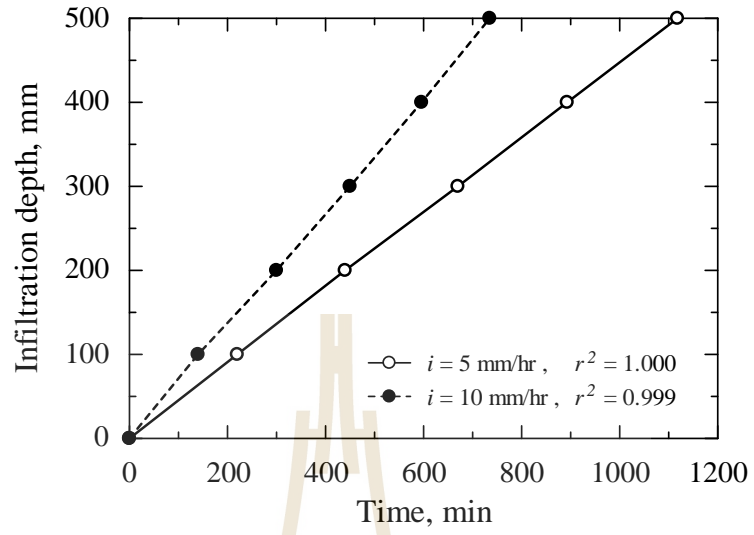






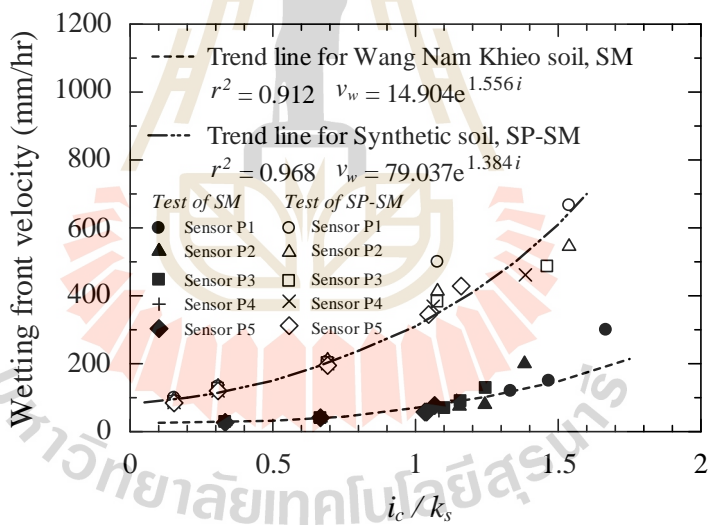
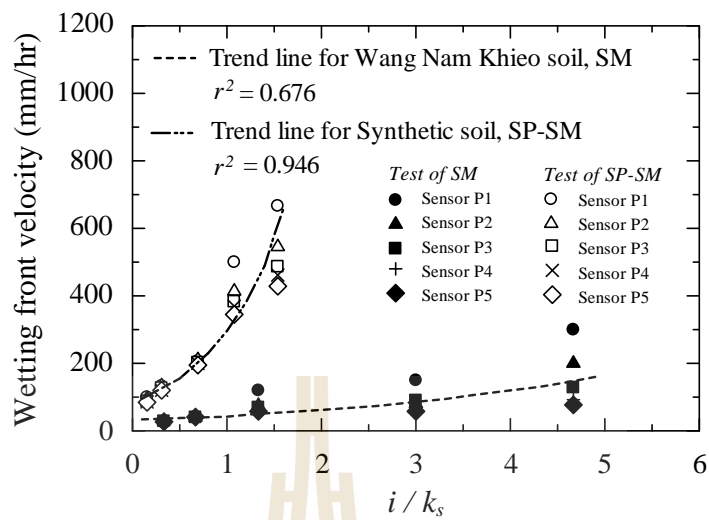


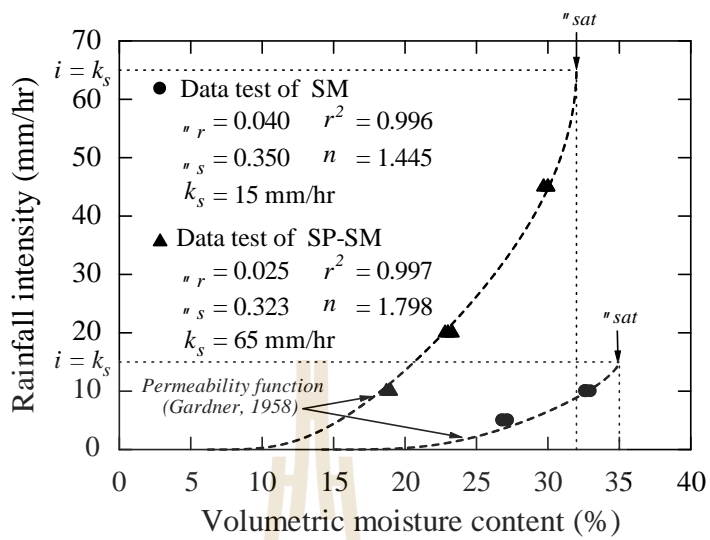




$i < k_s$

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเวลาในการเปลี่ยนแปลงปริมาตรความชื้นได้รับอิทธิพลอย่างมากจากปริมาณความชื้นฝน ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นจากผิวหน้าดินจะเร็วขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นฝน ดังแสดงในรูปที่ 4.6(a) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นภายในดินในแต่ละการทดสอบ โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความลึกของตำแหน่งตัววัดความชื้นกับเวลาที่ตัววัดความชื้นเริ่มตอบสนอง ($\Delta h / \Delta t$) ซึ่งกรณีของ $i < k_s$ หรือ i/k_s น้อยกว่า 1.0 ความเร็วในการเคลื่อนตัวจะคงที่ตลอดช่วงระยะการซึม ส่วนกรณีของ $i > k_s$ หรือ i/k_s มากกว่า 1.0 พบว่าจะเคลื่อนตัวเร็วในช่วงแรกเป็นเวลาการซึมน้อยกว่าเวลาที่เกิดน้ำขัง หลังจากเกิดน้ำขังที่ผิวดิน ระนาบความชื้นจะเคลื่อนที่ช้าลงในเวลาถัดไปดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นความเร็วการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลในดินกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน จึงหาความเร็วของการเคลื่อนตัวได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยแสดงไว้ดังรูปที่ 4.6(b) ซึ่งผลของความเร็วที่ได้ยังไม่สามารถนำไปสู่ข้อสรุปได้แน่ชัดที่จะนำไปใช้งานได้จริง เนื่องจากการทดสอบยังมีช่วงการกระจายตัวสูง อันเป็นผลมาจากการตั้งค่าเงื่อนไขการทดสอบ ที่ให้รูระบายน้ำฝนส่วนเกินอยู่เหนือผิวดิน 100 มิลลิเมตร เป็นผลทำให้ช่วงเวลาที่เริ่มเกิดน้ำขังจนถึงสถานะที่เกิดน้ำขังคงที่ เกิดเสดแรงดันน้ำที่ผิวดินไม่คงที่ ส่งผลให้ค่าแรงดึงดูดเมทริก (Matrix suction) ไม่คงที่ การแก้ปัญหาสำหรับการศึกษารั้งถัดไปสามารถทำได้โดยกำหนดให้รูระบายน้ำอยู่ตรงตำแหน่งของผิวดินพอดี เพื่อให้เสดแรงดันน้ำที่ผิวดินมีค่าคงที่สม่ำเสมอ และรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรความชื้นที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นจากกระบวนการซึมของน้ำฝนผ่านผิวดินกับปริมาณความชื้นฝน เนื่องจากความเร็วของการซึมมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นฝนที่เพิ่มสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ น้ำฝนจึงแทรกซึมลงสู่ดินด้วยความเร็วที่สูงขึ้นตามความชื้นฝนที่เพิ่มขึ้น เมื่อดินชนิดเดียวกันในแต่ละการทดสอบมีคุณสมบัติในการซึมผ่านเท่ากัน จึงทำให้เกิดการสะสมของน้ำฝนที่ซึมลงสู่ดินเพิ่มสูงขึ้น





" wb

" wb

" wb

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

" wi

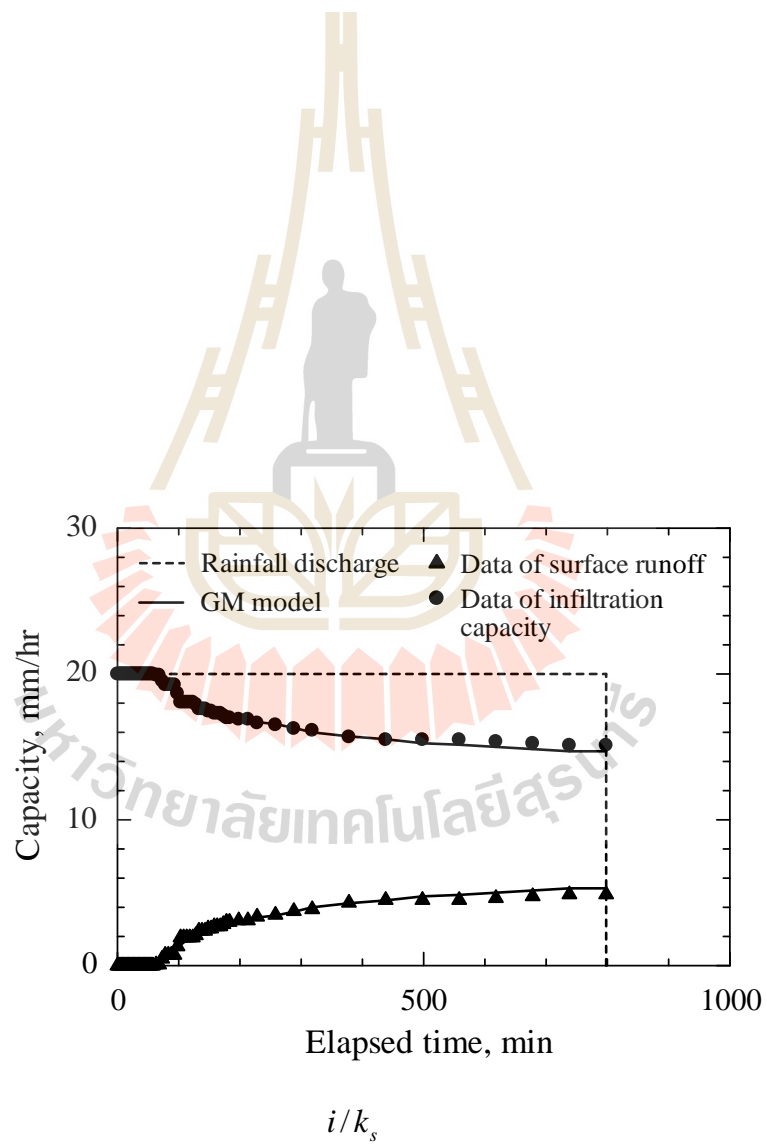
" wb

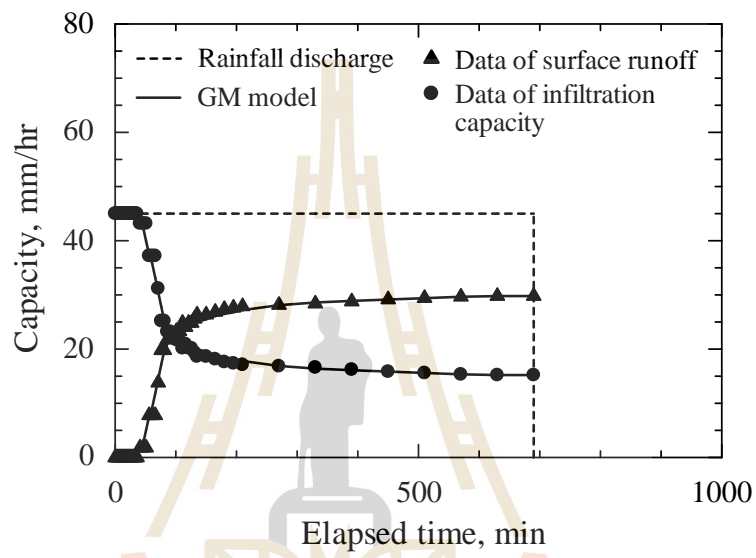
4.3 ความสามารถในการไหลซึมของน้ำฝนผ่านผิวดิน

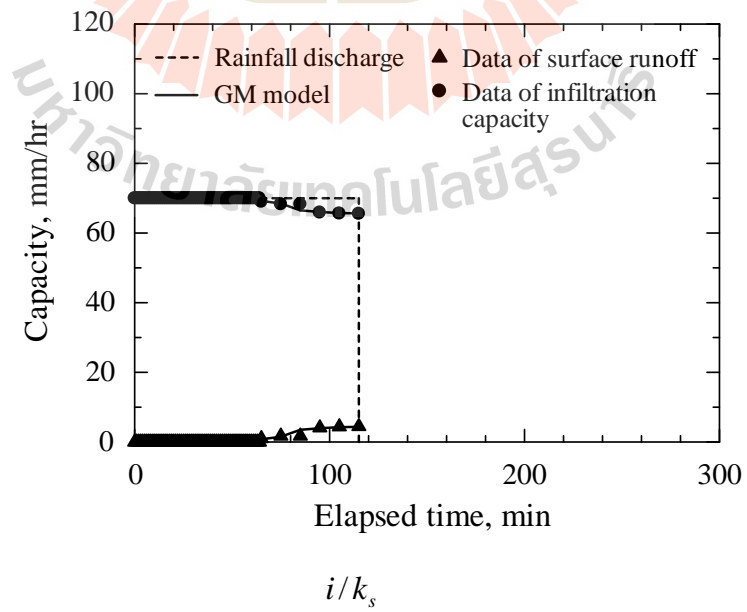
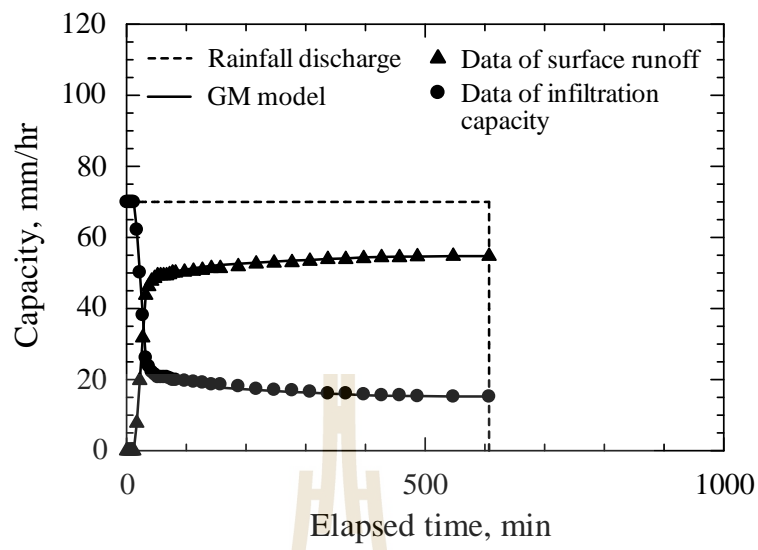
การซึมผ่านผิวดินเป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านผิวดินลงไปในชั้นดินภายใต้แรงดึงดูดของโลก (Gravity) และแรงดูดน้ำ (Capillary) จากการทดสอบการไหลซึมของน้ำฝนผ่านผิวดินสำหรับกรณีความเข้มฝนที่มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ($i > k_s$) การระบายออกของน้ำที่ผิวดิน (Surface runoff) จะถูกบันทึกค่าทุก 5 นาทีในช่วงแรกหลังจากที่เริ่มเกิดน้ำขัง (Ponding) ที่ผิวดิน จนกระทั่งน้ำที่ไหลออกมีปริมาตรคงที่ โดยมีระยะเวลาที่ระดับ 10 มิลลิเมตรเหนือผิวดิน ซึ่งการไหลที่ผิวดินอาจเกิดขึ้นได้จากน้ำส่วนเกินที่เกิดจากการซึมและส่วนเกินที่เกิดจากสภาวะอิ่มตัวในชั้นดิน Satterlund (1972) กล่าวว่ามียังมีเพียง 2 ปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมกระบวนการซึมผ่านผิวดิน คือ (1) ปัจจัยที่เป็นตัวจำกัดความสามารถของดินในการดูดซับน้ำ (Infiltration capacity) ที่สำคัญที่สุดคือ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาด ปริมาณ และการเกาะกลุ่มกันของช่องว่างภายในมวลดิน (Pore space) โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของเนื้อดิน โครงสร้างของดิน ธรรมชาติและสมบัติของ Soil colloids หรืออนุภาคดินขนาดเล็กของดิน และความชื้นที่มีอยู่ก่อนภายในมวลดิน (2) อัตราของน้ำที่เอื้ออำนวยให้กับกระบวนการ เช่น อัตราเร็วในการตกลงสู่พื้นดินของน้ำฝน เป็นต้น โดยที่การไหลในลาดดินในระดับต้นเป็นกระบวนการที่สำคัญเนื่องจากทำให้เกิดการวิบัติของลาดดินในระดับต้น

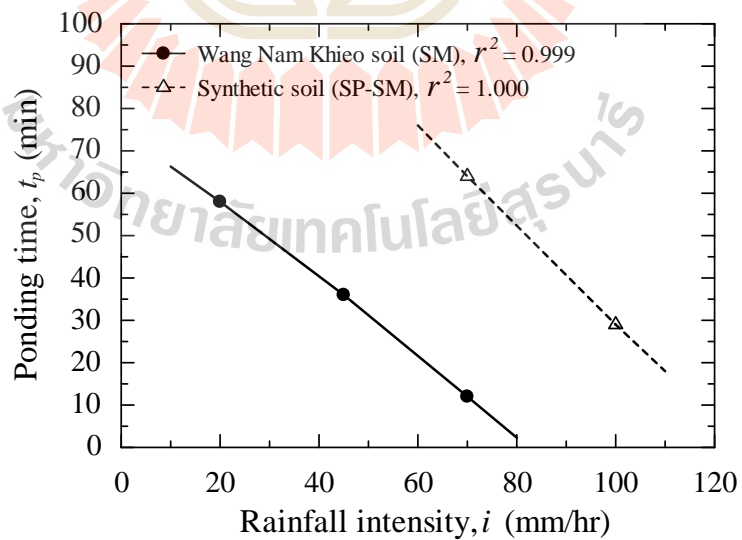
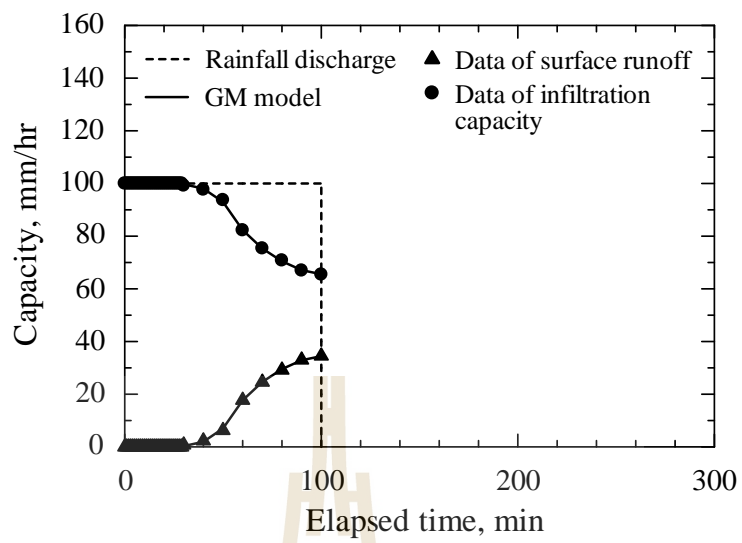
ในรูปที่ 4.8 เมื่อเริ่มการทดสอบปล่อยน้ำฝนสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของน้ำที่ระบายออกมาทางผิวดินคือปริมาณน้ำฝนสะสม พิจารณารูปที่ 4.8(a) สำหรับความเข้มฝน 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i = 20$ มม./ชม.) โดยในช่วง 0 ถึง 58 นาทีแรกน้ำฝนสามารถซึมผ่านผิวดินได้ทั้งหมด นั่นหมายความว่าดินมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอัตราเร็วของการซึมผ่านมีค่าเท่ากับปริมาณความเข้มฝนที่ใช้ในการทดสอบ โดยการไหลซึมของน้ำฝนผ่านผิวดินไปตามความลึกของชั้นดินจะเป็นไปตามกฎของคาร์ซี น้ำฝนที่ปล่อยออกจากแบบจำลองน้ำฝนสามารถคำนวณเป็นปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่พื้นผิวดินมีค่าคงที่ 261.80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที หลังจากนั้นเมื่อบริเวณชั้นผิวดินเริ่มอิ่มตัวด้วยน้ำ คืออัตราเร็วของน้ำฝนสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ก่อให้เกิดน้ำขังที่ผิวดินหรือเรียกว่าปริมาณน้ำฝนส่วนเกิน (Rainfall excess rate) ในสภาวะนี้ดินจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ช้าลง จนถึงนาที่ที่ 400 น้ำระบายออกที่ผิวดินจะมีอัตราการไหลออกคงที่ไปตลอดการทดสอบ และมีอัตราการซึมผ่านดินที่น้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าระบบได้เข้าสู่สภาวะการไหลแบบคงตัว (Steady state) ค่าแรงดันอากาศ ณ สภาวะนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของความเข้มฝนและความลึกของน้ำที่ขังบนผิวดิน โดยค่าอัตราการซึมผ่านสุดท้าย

k_s









$i > k_s$

4.4 การประเมินเสถียรภาพลาดดินชันภายใต้สภาวะรับน้ำฝน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินอนันต์ (Infinite slope) เป็นวิธีประเมินโอกาสการเกิดดินโคลนถล่มในลาดดินชัน จะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำที่สุด เหมาะสมกับการนำมาวิเคราะห์ความปลอดภัยของลาดดินธรรมชาติ แนวคิดนี้ใช้ได้ในกรณีของแผ่นดินถล่มที่มีความลึกเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความยาวและความกว้างของพื้นที่ลาดเอียง รูปแบบของการจำลองเสถียรภาพของลาดดินจะคิดในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ในระดับที่ต่ำมาก เนื่องจากในสภาวะธรรมชาติดินจะอยู่ในสภาวะที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) ดังนั้นในการวิเคราะห์จะทำการตั้งสมมุติฐานว่าไม่มีระดับน้ำอยู่ในลาดดินที่ทำการพิจารณา โดยที่ระนาบวิบัติถูกสมมุติให้ขนานกับผิวของลาดดิน ค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, FS) ของลาดดินสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินกับหน่วยแรงเฉือนที่เกิดตลอดระนาบการวิบัติสมมุติดินในธรรมชาติอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ การคำนวณหน่วยแรงเฉือน ณ สภาวะนี้จะขึ้นอยู่กับ Mohr-Coulomb failure criteria สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\tau_R = c' + [(\tau - u_a) - \tau^s] \tan \phi' \quad (4.7)$$

เมื่อ c' คือ หน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิผลของดิน, ϕ' คือ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน, τ คือ หน่วยแรงรวม, u_a คือ แรงดันอากาศในช่องว่างเม็ดดิน, τ^s คือ หน่วยแรงดึงดูดเมทริก ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\tau^s = -\frac{n_w - n_r}{n_{sat} - n_r} (u_a - u_w) = -S_e (u_a - u_w) \quad (4.8)$$

เมื่อ n_w คือ ปริมาตรความชื้น, n_r คือ ปริมาตรความชื้นคงเหลือ, n_{sat} คือ ปริมาตรความชื้นที่สภาวะอิ่มตัว, $(u_a - u_w)$ คือ แรงดึงดูดเมทริก หรือ แรงคาพิลลารี เป็นความแตกต่างระหว่างแรงดันอากาศในช่องว่างเม็ดดินกับแรงดันน้ำในช่องว่างเม็ดดิน, และ S_e คือ ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล ดังนั้นอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดอนันต์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$FS = \frac{t_R}{t_M} = \frac{c' + [(t - u_a) - t^s] \tan \{ '}{W \sin S \cos S} \quad (4.9)$$

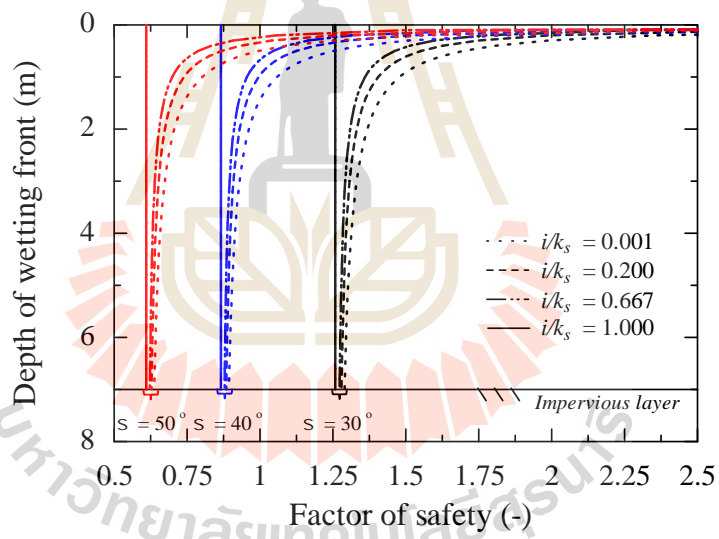
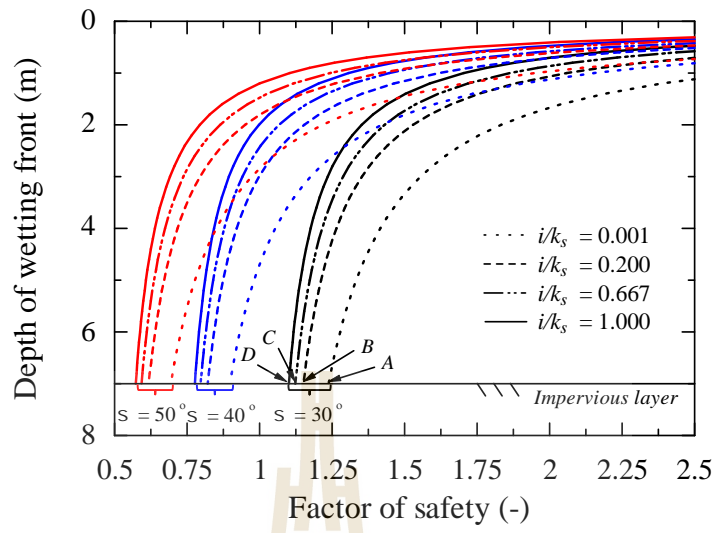
เมื่อ s คือ มุมลาดชันของดิน และ W คือ น้ำหนักของดินที่พิจารณา เพราะฉะนั้น $W = \alpha Z_w$, $t = \alpha Z_w \cos^2 S$, และ $u_a = 0$ สำหรับความดันบรรยากาศ สามารถเขียนสมการอัตราส่วนความปลอดภัยได้ใหม่ ดังนี้

$$FS = \frac{c' + [\alpha Z_w \cos^2 S - t^s] \tan \{ '}{\alpha Z_w \sin S \cos S} = \frac{c' - t^s \tan \{ '}{\alpha Z_w \sin S \cos S} + \frac{\tan \{ '}{\tan S} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ 4.10 ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน มีสามส่วนหลักที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน ประกอบด้วยหน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิผลของดิน (c'), หน่วยแรงดึงคูลอมเบตริก (t^s), และมุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน ($\{ '$) อัตราส่วนความปลอดภัยในช่วงของเฟสการไหลซึมถูกคำนวณที่ระดับความลึกต่างๆของระนาบความชื้น (Wetting front) เมื่อระนาบความชื้นเคลื่อนที่ถึงชั้นที่น้ำการวิเคราะห์เสถียรภาพของเฟสอิ่มตัวด้วยน้ำจึงจะเกิดขึ้น อัตราส่วนความปลอดภัยของเฟสอิ่มตัวด้วยน้ำจะถูกคำนวณตลอดแนวรอยต่อระหว่างมวลดินกับชั้นที่น้ำ สิ่งที่น่าสนใจในการประเมินเสถียรภาพลาดดินต้นขณะเกิดเหตุการณ์ฝนตก คือ อิทธิพลของความชื้นฝน (i), มุมลาดชันของดิน (s), หน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิผลของดิน (c'), และมุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน ($\{ '$)

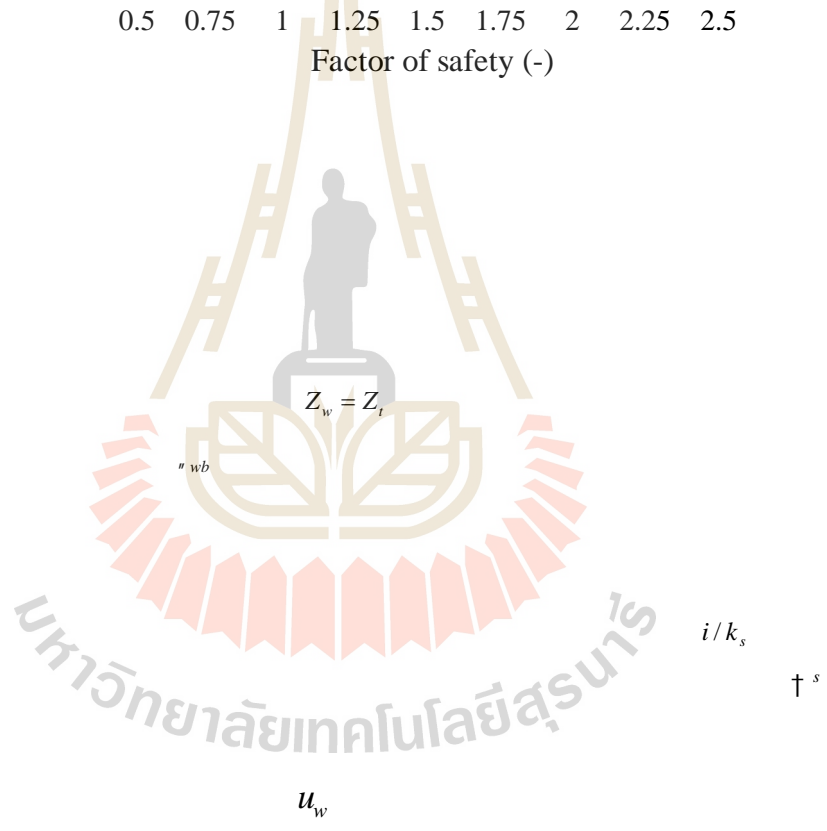
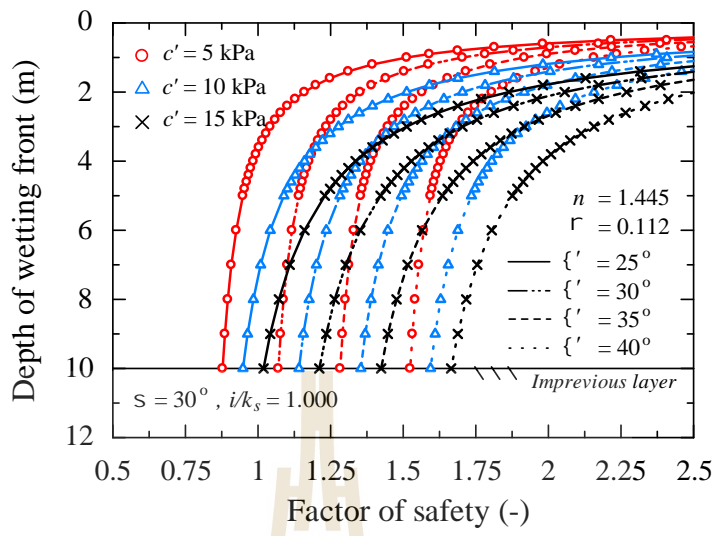
รูปที่ 4.11 แสดงอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกของการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้น (Z_w) ที่ค่าความชื้นฝน (i) และมุมลาดชันของดิน (s) ต่างๆ ตามงานวิจัยของ Lu and Griffiths (2004) และ Lu and Likos (2006) สภาวะทางชลศาสตร์ภายใต้เงื่อนไขคงที่เป็นฟังก์ชันของดัชนีการซึม (Infiltration index, i/k_s) ดังนั้นอิทธิพลของความชื้นฝนบนอัตราส่วนความปลอดภัยจะแสดงในเทอมของดัชนีการซึม ดินที่ใช้ในการวิเคราะห์มีสองประเภท ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวต่างกัน ส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยมีความแตกต่างกัน สังเกตเห็นได้ว่าดินวงน้ำเขียว, SM (รูปที่ 4.11(a)) สำหรับทุกๆความชื้นฝนที่ i/k_s มีค่าน้อยกว่า 1.0 อัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความลึกของระนาบความชื้น เนื่องจากหน่วยแรงดึงคูลอมเบตริก (t^s) ลดลงทันทีหลังจากเริ่มขั้นตอนการแทรกซึมของน้ำฝนสู่ดิน โดยการเพิ่มขึ้นของความลึกที่ละ

น้อยในช่วงแรก ค่า FS จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น ค่า FS จะค่อยๆ มีการเปลี่ยนแปลงที่ละน้อย จนกระทั่งความลึกมากพอ ค่า FS จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไปหรือมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ส่วนดินสังเคราะห์, SP-SM (รูปที่ 4.11(b)) อัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามการเพิ่มขึ้นที่ละน้อยของความลึก ขณะที่ระนาบความชื้นแทรกซึมลงไปลึกมากพอ ค่าของอัตราส่วนความปลอดภัยจะค่อยๆ ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความลึกของระนาบความชื้น ซึ่งการสูญเสียอัตราส่วนความปลอดภัยจะเร็วขึ้นตามค่าดัชนีการซึมและมุมของลาดดินที่เพิ่มมากขึ้น ดินทั้งสองประเภทมีความไวต่อเสถียรภาพและความโค้งงอของเส้นกราฟต่างกัน ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดิน ประกอบด้วยค่าหน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิผล (c') และค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน (ϕ') ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยค่า c' จะมีอิทธิพลต่อลักษณะความโค้งงอของเส้นกราฟ และมีผลต่อขนาดของเสถียรภาพน้อยมาก เมื่อค่า c' เพิ่มขึ้นเป็นช่วงที่เท่ากัน ขนาดของเสถียรภาพก็จะเพิ่มขึ้นในแนวโน้มที่เท่าๆกัน ที่ค่า c' ต่ำ ลักษณะความโค้งงอของเส้นกราฟจะเป็น L-shape อย่างชัดเจน ซึ่งในระดับความลึกตื้นๆ ค่าเสถียรภาพจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อถึง ณ จุดหนึ่งค่าเสถียรภาพจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนักไม่ว่าความลึกเพิ่มขึ้นเท่าใดก็ตาม เมื่อค่า c' มากขึ้นลักษณะของ L-shape จะเปลี่ยนไปเล็กน้อย โดยที่ค่าเสถียรภาพจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปตามความลึกที่เพิ่มขึ้น จากสมการเสถียรภาพ c' เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลึก z_w เมื่อค่า c' มากขึ้น ค่า FS จะมากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของค่า ϕ' พบว่าค่า ϕ' มีผลน้อยมากต่อลักษณะความโค้งงอของเส้นกราฟ ไม่ว่าจะค่า ϕ' จะเปลี่ยนแปลงไปเท่าใด ลักษณะความโค้งงอของเส้นกราฟก็ยังคงมีลักษณะความโค้งงอเท่าเดิม แต่จะมีผลอย่างมากต่อขนาดของเสถียรภาพ เมื่อค่า ϕ' มากขึ้น ค่าเสถียรภาพก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะขึ้นอยู่กับการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ ชนิดแร่ประกอบในมวลดิน และความหนาแน่นของมวลดิน การสูญเสียเสถียรภาพของลาดดินมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดินซึ่งเกี่ยวข้องกับสภาวะที่ฝนตก ปริมาณความชื้นหรือน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้การยึดเกาะกันในดินลดลง เพราะน้ำเข้าไปทำลายแรงดึงดูดของอากาศในดิน ทำให้กำลังรับแรงเฉือนลดลง โดยกำลังรับแรงเฉือนที่ลดลงจะกลับมาเพิ่มขึ้นอีกเมื่อความชื้นในดินลดน้อยลงตามลำดับ



i

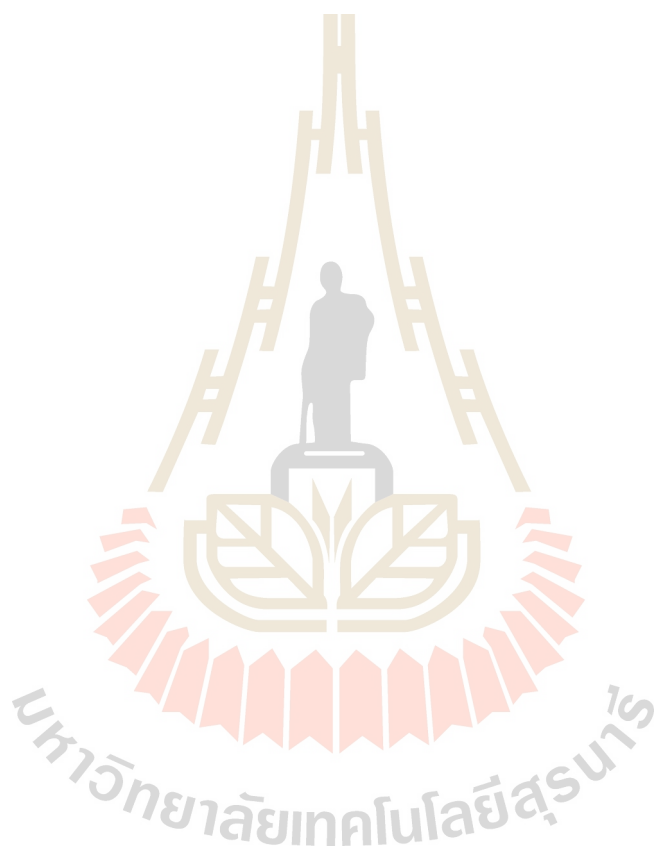
s



c

$$s > \phi'$$

สถานะการวิบัติของลาดดินที่มีมุมลาดชันต่ำๆ ($s \leq \phi'$) อาจเกิดขึ้นในช่วงของระยะอิ่มตัวด้วยน้ำเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองการซึมในหนึ่งมิติที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อการตอบสนองทางชลศาสตร์และกลไกทางกายภาพของดิน ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน และการเกิดน้ำขังที่ผิวดิน ภายใต้สภาวะรับน้ำฝนอัตราคงที่และไม่มีการระบายน้ำภายใต้ดิน รวมทั้งการวิเคราะห์เพื่อให้เห็นถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดินขึ้น โดยทำการศึกษากับดินที่มีหน่วยแรงยึดเกาะ มีความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำ และดินเป็นเนื้อเดียวกัน ผลการทดสอบและการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ทฤษฎีการซึมของ Green and Ampt (1911) สามารถใช้ได้ทั้งกรณีที่เกิดน้ำขังบนผิวดิน ($i/k_s > 1$) และไม่เกิดน้ำขังที่ผิวดิน ($i/k_s < 1$) และยังสามารถใช้ได้ดินเม็ดหยาบที่มีดินเม็ดละเอียดปน
2. การตอบสนองต่อความชื้นภายในดินต่อน้ำฝน แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่แบ่งเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกที่เกิดการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นจากการไหลซึมของน้ำฝน (Infiltration phase) และช่วงที่สองที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน (Saturation phase)
3. การตอบสนองต่อความชื้นในช่วงแรก พบว่า ความเร็วในการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นผืน โดยเคลื่อนตัวเร็วขึ้นตามความชื้นผืนที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าความชื้นหลังระนาบความชื้น (n_{wb}) จะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความชื้นผืน
4. ผลการทดสอบชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ณ สภาวะหนึ่งเมื่ออัตราเร็วของน้ำฝนสูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน จะเกิดปริมาณน้ำฝนส่วนเกินเกิดเป็นน้ำขังที่ผิวดิน โดยอัตราการไหลซึมผ่านผิวดินจะช้าลงในช่วงเวลาแรกตามความลึกของชั้นดิน เนื่องจากที่ชั้นผิวดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและเกิดแรงคาพิลลารีภายใน

ช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และจะมีอัตราการซึมผ่านคงที่ไปตลอดการทดสอบในเวลาถัดไป

5. อิทธิพลของความชื้นฝนที่แสดงโดยอัตราส่วนระหว่างค่าความชื้นฝนต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน (i/k_s) จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อ $i/k_s \leq 1$ การเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสองช่วง คือช่วงการไหลซึม และช่วงการอิ่มตัวเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำเมื่อระนาบความชื้นเคลื่อนตัวถึงชั้นที่บ้น้ำ และอัตราการซึมของน้ำฝนผ่านผิวดินจะมีค่าเท่ากับค่าความชื้นฝน ในขณะที่ $i/k_s > 1$ การเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นจะเกิดขึ้นในช่วงของการไหลซึมเท่านั้น จากความชื้นเริ่มต้น (w_i) ไปสู่ความชื้น ณ สภาวะอิ่มตัว (w_{sat})
6. จากการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีลาดอนันต์ พบว่า อิทธิพลของความชื้นฝนในช่วงของการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้น ส่งผลทำให้เสถียรภาพของดินลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น หน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิผล (c') และมุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน (ϕ') ต่างก็มีมีผลต่อเสถียรภาพของดินเช่นเดียวกัน เมื่อหน่วยแรงยึดเกาะและมุมเสียดทานภายในของดินมีค่าลดลง จะทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลงตามไปด้วย

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองเชิงกลศาสตร์และเสถียรภาพของลาดดินต้นจะได้รับอิทธิพลมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นฝน มุมลาดชันของดิน หน่วยแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน และมุมเสียดทานภายในของดิน อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการซึ่งอยู่ในสภาวะที่ควบคุมได้ โดยในธรรมชาติเป็นเรื่องยากที่ฝนจะตกด้วยความชื้นฝนคงที่ ในอนาคตควรมีการศึกษาในเชิงลึกให้ครอบคลุมถึงปัจจัยดังกล่าวต่อไป และการศึกษานี้ยังไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินต้นที่สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินได้ เนื่องจากเป็นกลไกที่ซับซ้อนและมีข้อจำกัดทางด้านสมมุติฐานของวิธีวิเคราะห์แบบลาดอนันต์ ดังนั้นจึงต้องอาศัยหลักทางวิชาการและเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพที่สอดคล้องกับกลไกของการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังเป็นการศึกษาปัจจัยต่อเสถียรภาพของลาดดินเพียงสองปัจจัย คือ ความชื้นฝนและพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดิน ซึ่งยังมีปัจจัยกระตุ้นอื่นๆ เช่น ความชื้นเริ่มต้นของดิน ปริมาณรากพืชในดินตามธรรมชาติ รวมถึงชั้นของดินที่อาจจะส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินต้นได้เช่นเดียวกัน จากข้อที่กล่าวมานี้จึงเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาปัญหาการวิบัติของลาดดินต้นในอนาคตเพื่อให้ได้องค์ความรู้ที่ครบถ้วนสำหรับการพัฒนาระบบเตือนภัยให้มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำในการแจ้งเตือนมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552. การพัฒนาวิธีการวัดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำและมวลสารในดินเค็มที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สันติ ไทยยืนวงษ์, 2553. การวิเคราะห์โอกาสเกิดดินถล่มโดยวิธีทางธรณีวิศวกรรมโดยพิจารณาจากปัจจัยที่ไม่คงที่ในภาคใต้ของประเทศไทยพื้นที่ฝั่งทะเลอันดามัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- หฤทัย มาศโค้ง, 2553. การควบคุมความเค็มของดินร่วนปนทรายโดยการตัดกระบวนการคาพิวลาจี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Ali, A., Huang, J., Lyamin, A.V., Sloan, S.W., and Cassidy, M.J. 2014a. **Boundary effects of rainfall-induced landslides.** Computers and Geotechnics, 61: 341-354.
- Ali, A., Huang, J., Lyamin, A.V., Sloan, S.W., Griffiths, D.V., Cassidy, M.J., and Li, J.H. 2014b. **Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modelled by infinite slopes.** Engineering Geology, 179: 102–116.
- Bishop, A.W., 1955. **The use of slip circle in the stability analysis of slopes.** Geotechnique 5 (1), 7-17.
- Bishop, A.W., 1959. **The principle of effective stress.** Teknisk Ukeblad 106(39), 859-863.
- Buckingham, E. 1907. **Studies on the movement of soil moisture.** Bulletin 38. USDA Bureau of Soils, Washington, DC.
- Cascini, L., Cuomo, S., Guida, D., 2008. **Typical source areas of May 1998 flow-like mass movements in the Campania region, Southern Italy.** Engineering Geology 96, 107-125.
- Chinkulkijniwat, A., Yubonchit, S., Horpibulsuk, S., Jothityangkoon, C., Jeebtaku, C., and Arulrajah, A. (2016). **Hydrological responses and stability analysis of shallow slopes with cohesionless soil subjected to continuous rainfall.** Canadian Geotechnical Journal. Vol.53 No.12 : 2001–2013.

- Cho, S.E. 2009. **Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics**. Engineering Geology, 105(1-2): 32-43.
- Corps of Engineers, 1982. **Slope stability manual EM-1110-2-1902**, Washington, DC : Department of the Army, Office of the Chief of Engineers.
- Ducan, J.M., Buchignani, A.L., Marius, D.W., 1987. **An engineering manual for slope stability studies**. Virginia : Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, March.
- Eichenberger, J., Ferrari, A., and Laloui, L. 2013. **Early warning thresholds for partially saturated slopes in volcanic ashes**. Computers and Geotechnics, 49: 79–89.
- Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1993). **Soil mechanics for unsaturated soils**. Wiley, New York.
- Fredlund, D.G., 2000. **The emergence of unsaturated soil mechanic**. The Fourth Spencer J. Buchanan lecturer, College Station, Texas, A&M University Press, p.39.
- Gardner, W. 1958. **Steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table**. Soil Science, 85: 228-232.
- Greco, R., Guida, A., Damiano, E., and Olivares, L. 2010. **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, 35(3–5): 127–136.
- Green, W.H., Ampt, G.A., 1911. **Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils**. J. Agric. Sci., vol. 4, no. 1, pp. 1-24.
- Hall, M.J., Johnston, P.M., and Wheather, H.S. 1989. **Evaluation of overland flow models using laboratory catchment data. I. An apparatus for laboratory catchment studies**. Hydrological Sciences Journal, 34: 277-288.
- Horton, R.E., 1933. **The role of infiltration in the hydrological cycle**. Transactions of the American Geophysical Union 14, 446-460.
- Huang, C.-C., Lo, C.-L., Jang, J.-S., Hwu, L.K., 2008. **Internal soil moisture response to rainfall-induced slope failures and debris discharge**. Engineering Geology 101, 134-145.

- Huang, C.-C., Ju, Y.J., Lee, J.L., Hwu, L.K., 2009. **Internal soil moisture and piezometric responses to rainfall-induced shallow slope failures.** *Journal of Hydrology* 370, 39-51.
- Huang, C.-C., Yuin, S.C., 2010. **Experimental investigation of rainfall criteria for shallow slope failures.** *Geomorphology* 120, 326-338.
- Inoue, M., Ould Ahmed, B.A., Saito, T., and Irshad, M. (2008). **Comparison of Twelve Dielectric Moisture Probes for Soil Water Measurement under Saline Conditions,** *American Journal of Environmental Sciences* 4 (4): 367-372.
- Janbu, N. 1968. **Slope stability computations.** Soil Mechanics and Foundation Engineering Report, The Technical University of Norway, Trondheim, Norway.
- Kassim, A., Gofar, N., Lee, L.M., Rahardjo, H., 2012. **Modeling of suction distributions in an unsaturated heterogeneous residual soil slope.** *Engineering Geology* 131-132, 70-82.
- Kim, J., Jeong, S., Park, S., Sharma, J., 2004. **Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils.** *Engineering Geology* 75, 251-262.
- Kim, J., Jeong, S., Regueiro, R.A., 2012. **Instability of partially saturated soil slopes due to alteration of rainfall pattern.** *Engineering Geology* 147-148, 28-36.
- Lee, L.M., Gofar, N., and Rahardjo, H. 2009. **A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability.** *Engineering Geology*, 108(3-4):272-285.
- Lee, L.M., Kassim, A., and Gofar, N. 2011. **Performances of two instrumented laboratory models for the study of rainfall infiltration into unsaturated soils.** *Engineering Geology*, 117(1-2): 78-89.
- Li, W.C., Lee, L.M., Cai, H., Li, H.J., Dai, F.C., and Wang, M.L. 2013. **Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope.** *Engineering Geology*, 153: 105-113.
- Lowe, J., Karafiath, L., 1955. **Stability of earth dams upon drawdown.** *Proceedings of the 1st Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,* Mexico City, 537-552.
- Lu, N., and Godt, J. 2008. **Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions.** *Water Resources Research*, 44(11): 1-13.

- Lu, N., and Griffiths, D.V. 2004. **Profiles of Steady-State Suction Stress in Unsaturated Soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Geology, 130(10): 106301076.
- Ma, K.-C., Tan, Y.-C., and Chen, C.-H. 2011. **The influence of water retention curve hysteresis on the stability of unsaturated soil slopes.** Hydrological Processes, 25(23): 3563-3574.
- Morgenstern, N.R., Price, V.E., 1965. **The analysis of the stability of general slip surfaces.** Geotechnique 15 (1), 79-93.
- Mualem Y. 1976. **A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.** Water Resources Research 12:513-522.
- Ng, C.W.W., Shi, Q., 1998b. **A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage.** Computer and Geotechnics 22 (1), 1-28
- Ng, C.W.W., Wang, B., Tung Y.K., 2001. **Three-dimensional numerical investigation of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns.** Canadian Geotechnical Journal 38, 1049-1062.
- Phi, S., Clarke, W., and Li, L. 2013. **Laboratory and numerical investigations of hillslope soil saturation development and runoff generation over rainfall events.** Journal of Hydrology, 493:1-15.
- Philip, J.R., 1957. **The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution,** Soil Sci., vol. 83, no. 5, pp. 345-357.
- Pradel, D., and Raad, G. 1993. **Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes.** Journal of Geotechnical Engineering, 119(2): 315-332.
- Rahardjo, H., Li, X.W., Toll, D.G., Leong, E.C., 2001. **The effect of antecedent rainfall on slope stability.** Journal of Geotechnical and Geological Engineering. Special Issue on Unsaturated and Collapsible Soils G19, 371-399 (3-4 Sep.).
- Rahardjo, H., Satyanaga, A., Leong, E.C., Ng, Y.S., 2010. **Effects of groundwater table position and soil properties on stability of slope during rainfall.** ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 136 (11), 1555-1564.

- Santoso, A.M., Phoon, K.K., Quek, S.T., 2011. **Effect of soil spatial variability on rainfall-induced landslides**. *Computers and Structures* 89, 893-900.
- Scott, H.D. (2000). **Soil physics : agricultural and environmental applications**. Ames : Iowa State University Press.
- Shama, R.H., Nakaraki, H., 2010. **Numerical model and flume experiments of single- and two-layered hillslope flow related to slope failure** 7, 425-432.
- Skempton, A.W., DeLory, F.A., 1957. **Stability of natural slopes in London clay**. In: *Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering*, vol. 4. London II; p. 378-81
- Sorbino, G., Nicotera, M.V., 2012. **Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides**. *Engineering Geology* (Article in press)
- Tohari, A., Nishigaki, M., and Komatsu, M. 2007. **Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(5): 575–587.
- Topp, G.L., Davis, J.L., and Annan, A.P. (1980). **Electromagnetic determination of soil water content : Measurement in coaxial transmission lines**, *Water resource. Res.* 16:574-582.
- Van Genuchten, M.T. 1980. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil**. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
- Xie, M., Esaki, T., Cai, M., 2004. **A time-space based approach for mapping rainfall-induced shallow landslide hazard**. *Environmental Geology* 46, 840-850.
- Zhan, T.L.T., Ng, C.W.W., 2004. **Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in saturated soils**, *Int. J. Geomech.*, 4(1), 273-284.



ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ชนาธิป ศุภโกทยาน อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ และ สมใจ ยุบลชิต, 2562 การไหลของน้ำในดิน
เนื่องจากอิทธิพลของน้ำฝน (Seepage Responses in Soil Subjected to Rainfall).
วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ. วารสารปีที่ 10
ฉบับที่ 2





วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Technical Education Journal King Mongkut's University of Technology North Bangkok

แบบตอบรับบทความเพื่อตีพิมพ์

วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2562

ที่ 157 /2560

วันที่ 31 ตุลาคม 2560

เรื่อง การรับบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรียน คุณชนาธิป ศุภโกทยาน

ตามที่ท่านได้จัดส่งบทความวิจัย เรื่อง การไหลของน้ำในดินเนื่องจากอิทธิพลของน้ำฝน (Seepage Responses in Soil Subjected to Rainfall) มาเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ นั้น ในการนี้ขอเรียนให้ท่านทราบว่ากองบรรณาธิการได้รับบทความของท่านเพื่อดำเนินการในส่วนที่เกี่ยวข้อง และสามารถตีพิมพ์ในวารสารปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2562

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และขอขอบคุณที่ท่านส่งบทความมาเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือในครั้งนี้

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วิภาวิวัฒน์)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การไหลของน้ำในดินเนื่องจากอิทธิพลของน้ำฝน

ชนาธิป ศุภททยาน¹ อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์² และ สมใจ ยูบลชิต³

บทคัดย่อ

ปัญหาดินถล่มเนื่องจากฝนเป็นที่ทราบกันอยู่แล้วหลายว่าเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางอุทกวิทยาและการเปลี่ยนแปลงกำลังของดินในลาดดิน การซึมของฝนลงสู่ลาดดินทำให้ความชื้นในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนรวมทั้งเสถียรภาพของลาดดิน ดังนั้นความเข้าใจในปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวจึงมีส่วนสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อบูรณาการระบบการเตือนภัยพิบัติดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพที่สามารถช่วยบรรเทาความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่เสี่ยงภัย งานวิจัยนี้ศึกษาการตอบสนองทางอุทกวิทยาในลาดดินจากแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติภายใต้สภาวะฝนที่เป็นไปได้ 3 สภาวะ ประกอบด้วย 1) สภาวะฝนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน 2) ความเข้มข้นใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน และ 3) ความเข้มข้นสูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษานี้ถูกเก็บมาจากสถานีเคื่อนกัยดินถล่ม บ้านคลองสะท้อน ตำบลวังหมี่ อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา จากการทดสอบพบว่า ภายใต้สภาวะฝนที่ 1 การตอบสนองความชื้นในดินจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอย่างชัดเจนประกอบด้วยช่วงการซึมและช่วงการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ในช่วงแรกความชื้นในดินจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ลงของแผ่นความชื้น (Wetting front) จากความชื้นเริ่มต้น (θ_{wi}) ไปถึงความชื้นที่เรียกว่าความชื้นพื้นหลัง (θ_{wb}) เมื่อแผ่นความชื้นดังกล่าวเคลื่อนไปถึงชั้นที่น้ำที่ถูกจำลองขึ้น ความชื้นในดินจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินจาก θ_{wb} ไปถึงความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (θ_{sat}) เมื่อเปรียบเทียบสภาวะฝนที่ 2 และ 3 พบว่าขนาดของ θ_{wb} จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเข้มข้น จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ θ_{sat} เมื่อความเข้มข้นมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน นอกจากนี้ผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า การเคลื่อนตัวของแผ่นความชื้นจะเร็วขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น ดังนั้นการตอบสนองความชื้น ณ สภาวะฝนที่แตกต่างดังกล่าวมาข้างต้นอาจจะส่งผลต่อระยะเวลาในการวิบัติรวมทั้งความลึกของระนาบวิบัติของลาดดิน

คำสำคัญ: แบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ, การเปลี่ยนแปลงความชื้น, การไหลซึม

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ นักวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้พิมพ์ประสานงาน โทร. 09-5456-9908 อีเมล: ch.suptayan@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_{wt}). 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_{wt} 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. 09-5456-9908 e-mail: ch.supotayan@gmail.com

1. บทนำ

ธรณีพิบัติภัยจากการเกิดดินโคลนถล่มถือเป็นภัยทางธรรมชาติที่พบได้บ่อยในทางภาคเหนือและภาคใต้ของประเทศไทยเนื่องจากภูมิประเทศเป็นลาดภูเขาสูงชัน และพบในบางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นหลังจากที่มวลดินและหินที่ไหลมาตามลาดเขาได้เกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก ถือเป็นภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสามารถป้องกันได้ค่อนข้างยาก ซึ่งดินถล่มมักเกิดตามมาหลังจากเกิดน้ำป่าไหลหลากในขณะที่เกิดพายุฝนตกหนักรุนแรงต่อเนื่อง ดินถล่มในพื้นที่ประเทศไทยมีรูปแบบการวิบัติได้หลายรูปแบบ โดยส่วนมากจะเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นในระดับตื้น (Shallow landslides) ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบการวิบัติเป็นการสไลด์ลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่ของมวลดิน (Translational slide) และเป็นปัญหาทางด้านเสถียรภาพของลาดดินเอียงที่ไม่คงที่ ซึ่งจะแปรผันไปตามปัจจัยภายนอกที่มากกระตุ้น [1] โดยกำลังรับแรงเฉือนของดินเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำในดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำฝนที่ได้รับ ปริมาณน้ำในดินที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้แรงดึงน้ำในดิน (Soil suction) ลดลง [2] ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนลดลง ทำให้มีโอกาสเกิดดินถล่มสูงขึ้น รัฐบาลไทยเล็งเห็นความสำคัญของปัญหาน้ำท่วม ดินโคลนถล่ม จึงมีการจัดตั้งหน่วยงานเพื่อเฝ้าระวังและเตือนภัยล่วงหน้า (Early warning) ของภัยพิบัติที่รวมทั้งปัญหาน้ำหลากและการวิบัติของลาดดิน ระบบเตือนภัยล่วงหน้าเป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการจัดการภัยพิบัติแผ่นดินถล่ม น้ำท่วม และเศษขยะไหล โดยทั่วไปในปัจจุบันระบบเตือนภัยประเมินระดับของความเสี่ยงจากภัยพิบัติตามการสังเกตข้อมูลในเวลาจริง รวมถึงการวัดของระยะเวลาและความรุนแรงของปริมาณน้ำฝน และการเปรียบเทียบความชื้นผืนที่มีเกณฑ์ความเสี่ยงที่สอดคล้องกัน

ระบบเตือนภัยล่วงหน้าที่น่าสนใจคือวิธีทางกายภาพ [3-5] ในวิธีการนี้ระดับการแจ้งเตือนจะมีการประเมินผ่านการตอบสนองของความชื้นในช่วงเวลาจริง ซึ่งอ่านค่าจากชุดอุปกรณ์การตรวจสอบ โดยส่วนใหญ่จะเป็นตัววัดความชื้น (Moisture sensors), เครื่องมือวัดและสิ่งกดระดับน้ำ (Piezometers), และเครื่องวัดแรงดึงความชื้น (Tensiometers) ตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องมือวัดมีความสำคัญต่อระบบเตือนภัยล่วงหน้าที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ Tohari et al. [3] ดำเนินการทดสอบด้วยชุดการทดสอบขนาดใหญ่ในลาดดินที่เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อให้เข้าใจกลไกการวิบัติของลาดดินที่เกิดจากเหตุการณ์

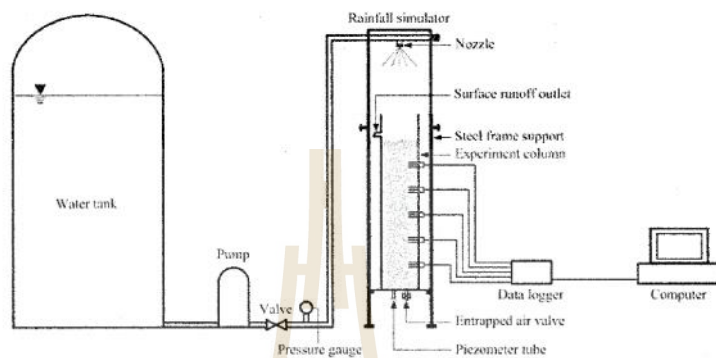
ฝนตก มีการรายงานว่าระนาบวิบัติส่วนใหญ่เกิดใกล้พื้นผิวของลาดดิน และถูกควบคุมด้วยการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ได้แนะนำว่าอุปกรณ์ตรวจสอบควรจะต้องอยู่ใกล้กับพื้นผิวลาดดิน และแนะนำระดับเตือนภัยไว้สองระดับ เรียกว่าเตือนภัยล่วงหน้าและเตือนภัยขั้นสุดท้าย การเตือนล่วงหน้าจะเริ่มขึ้นเมื่อฝนความชื้นเคลื่อนผ่านตัววัดความชื้น ส่วนการเตือนภัยขั้นสุดท้ายจะเริ่มขึ้นในไม่ช้าหลังจากที่ฝนความชื้นไปถึงชั้นหินน้ำและระดับน้ำใต้ดินเริ่มเพิ่มขึ้น มีงานวิจัยหลายบทความ [6-9] ได้รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันอากาศภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินขึ้นอยู่กับดัชนีการซึม Lee et al. [10] ทำการศึกษาพฤติกรรมของลาดดินต่อการตอบสนองต่อน้ำฝนของดิน 4 ชนิด โดยการจำลองลาดดินแบบหนึ่งมิติและสองมิติ ใช้ค่าความชื้นผืน 2 ค่า (3.35×10^{-6} และ 1.85×10^{-5} เมตร/วินาที) และระยะเวลาฝนตก 1 และ 24 ชั่วโมง เพื่อสังเกตการณ์การซึมของน้ำฝนสู่ลาดดิน แล้ววัดค่าแรงดึงน้ำ (Suction) เปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองทั้งสองแบบ พบว่าการทดสอบทั้งสองแบบให้ผลการทดสอบที่เหมือนกัน และงานวิจัยในช่วงเวลาที่ผ่านมาก [10], [11] เกี่ยวกับเรื่องการเปลี่ยนแปลงความชื้นในลาดดินตื้น มีการทดลองวิจัยรวบรวมข้อมูล และรายงานผลการศึกษาว่าความชื้นของลาดดินไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในช่วงการไหลซึม

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปสู่การศึกษาอิทธิพลของความชื้นผืนต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่เพิ่มขึ้นในมวลดิน ในดินที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำค่า โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานตามแบบจำลองของ Green and Ampt [12] ดินตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นดินที่อยู่ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยดินโคลนถล่มในเขตจังหวัดนครราชสีมา แบบจำลองถูกสร้างขึ้นเพื่อทำความเข้าใจและประเมินการตอบสนองทางอุทกวิทยาในความชื้นผืนต่างๆเทียบกับระยะเวลาของการรับน้ำฝน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินโอกาสการเกิดดินถล่มในพื้นที่เสี่ยงภัยดังกล่าว

2. วัตถุประสงค์และวิธีการวิจัย

2.1 รายละเอียดของแบบจำลอง

แบบจำลองการซึมในหนึ่งมิติถูกใช้สำหรับการศึกษาครั้งนี้ แผนภาพและภาพถ่ายของแบบจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ รูปที่ 1 แสดงภาพรวมของแบบจำลองที่ประกอบด้วยสี่ส่วนหลัก ส่วนแรกคือชุดปั๊มน้ำแบบความดันคงที่ เพื่อควบคุมน้ำที่ไหลเข้าระบบให้มีอัตราคงที่



รูปที่ 1 แผนผังของแบบจำลองการทดสอบ

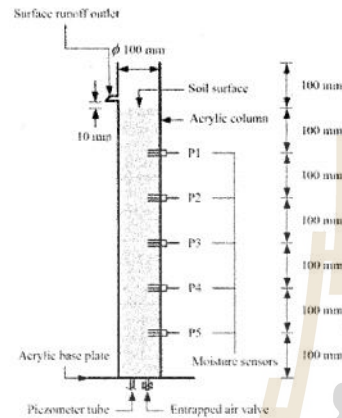


รูปที่ 2 ภาพถ่ายของแบบจำลองทางกายภาพการซึมน้ำในหนึ่งมิติ

ส่วนที่สองคือแบบจำลองน้ำฝนเทียม (Simulated rainfall simulator) เป็นท่อ PVC และติดหัวสเปรย์ขนาดเล็กเพื่อจำลองเป็นน้ำฝน ควบคุมปริมาณน้ำเข้าด้วยวาล์วและมาตรวัดแรงดันน้ำ ส่วนที่สามคือแบบจำลองท่ออะคริลิก ส่วนที่สี่คือเซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นและตาต้าลือกเกอร์เก็บข้อมูล รายละเอียดของแบบจำลองถูกอธิบายไว้ในส่วนต่อไปนี้

2.1.1 แบบจำลองท่ออะคริลิก

รายละเอียดของท่ออะคริลิกแสดงไว้ในรูปที่ 3 แบบจำลองมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกเพื่อใช้บรรจุดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ทำด้วยอะคริลิกใสเพื่อให้สามารถมองเห็นและสังเกตพฤติกรรมกรรมกรซึมของน้ำฝน มีความหนา 5 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 มิลลิเมตร และสูง 700 มิลลิเมตร ฐานของแบบจำลองทำจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 10 มิลลิเมตร ขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร ด้านข้างด้านหนึ่งของท่ออะคริลิกเจาะรูขนาดกว้าง 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 ที่ฐานด้านล่างเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู เพื่อติดตั้งตัววัดระดับน้ำใต้ดิน (Piezometer) ด้วยท่อพลาสติกใสปลายเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ใช้ในการสังเกตการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำเมื่อน้ำฝนซึมผ่านดินจากผิวดินจนถึงชั้นที่น้ำที่จำลองขึ้น หลังจากนั้นคือระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้น อีก 1 รูทำการติดตั้งวาล์วระบายอากาศเพื่อให้อากาศที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินขณะที่น้ำกำลังซึมผ่านดิน ที่อาจจะมีการวัดปริมาณความชื้น ที่พื้นล่างภายในแบบจำลองได้ใช้แผ่นจีโอบล็อกใสวางไว้เพื่อให้น้ำไหลผ่านออกเมื่อน้ำฝนซึมถึงชั้นที่น้ำ และทำหน้าที่กันไม่ให้ดินที่ใช้ในการทดสอบเข้าไปอุดตันอยู่ภายในท่อสังเกตระดับน้ำและท่อระบายอากาศ



รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของแบบจำลองที่อะคริลิก

2.1.2 ระบบแบบจำลองน้ำฝน

แบบจำลองน้ำฝนจะถูกติดตั้งไว้เหนือแบบจำลองแห่งดิน ประกอบไปด้วยถังเก็บน้ำที่มีความจุขนาด 2000 ลิตร ป้อนน้ำแบบความดันคงที่ วัสดุควบคุมการไหลของน้ำ มาตรฐานวัดความดันน้ำ ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร และหัวสเปรย์ขนาดเล็ก โดยที่น้ำจะถูกส่งจากถังเก็บน้ำซึ่งอาศัยแรงดันจากปั๊มความดันคงที่ ถูกควบคุมปริมาณน้ำเข้าด้วยวาล์วและมาตรวัดแรงดันน้ำก่อนส่งผ่านเข้าไปในท่อพลาสติกที่ติดหัวสเปรย์ที่ปล่อยน้ำออกให้คล้ายกับลักษณะการกระจายของน้ำฝนที่ตกลงมาสู่ผิวดิน โดยท่อพลาสติกที่ปล่อยน้ำฝนจะมีหัวสเปรย์เพียงหนึ่งหัวเท่านั้น ซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่กึ่งกลางท่อและมีตำแหน่งอยู่ตรงกลางของแบบจำลองที่อะคริลิก ระดับปลายหัวสเปรย์อยู่เหนือปลายขอบที่อะคริลิกที่ระยะ 400 และ 800 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าปริมาณความชื้นฝนอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 75 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งถูกควบคุมด้วยวาล์วระบายน้ำ ความชื้นฝนที่ต้องการถูกสอบเทียบความสม่ำเสมอของความชื้นฝน (Uniformity coefficients, CU) ได้อธิบายไว้โดย Hall et al. [13] ขอบเขตความชื้นฝนอยู่ระหว่าง 90% ถึง 99% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองน้ำฝนมีความน่าเชื่อถือที่จะนำมาใช้ในการทดสอบได้ เมื่อทำการทดสอบจะเลือกระยะห่างของหัวสเปรย์ถึงปลายขอบที่อะคริลิกที่สามารถให้ค่าปริมาณความชื้นฝนที่ต้องการ ได้จากการสอบเทียบความสม่ำเสมอ

เสมอของความชื้นฝนโดยใช้กระป๋อง 1 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร วางไว้ด้านบนของแบบจำลอง ขณะที่ปล่อยน้ำฝนเพื่อวัดปริมาณน้ำฝนกับเวลาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของความชื้นฝนถูกหาด้วยความสม่ำเสมอของการกระจายน้ำฝน 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

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับระยะเวลาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นโดยใช้ดินตัวอย่างหนึ่งชนิด การศึกษาครั้งนี้ใช้หัวรับข้อมูลชนิด Frequency Domain Reflectometry (FDR) รุ่น 5TE จำนวน 5 ตัว ซึ่งสามารถวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิของดิน ถูกติดตั้งเพื่อสังเกตการณ์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น (Volumetric water content, θ_v) ตลอดการทดสอบ ตัววัดความชื้นประเภทนี้จะมีความเล็กซึ่งมีขนาดเท่ากับ 145 มิลลิเมตร x 33 มิลลิเมตร x 7 มิลลิเมตร (ยาว x กว้าง x หนา) ตัววัดความชื้นถูกติดตั้งในตำแหน่งของท่ออะคริลิก แต่ละตัวมีระยะห่างกัน 100 มิลลิเมตร ตัววัดความชื้นวัดค่าความชื้นเชิงปริมาตร (θ') ของดิน โดยรวบรวมข้อมูลและบันทึกไว้ในตัวเก็บข้อมูล (Data logger, Em50)

ก่อนทำการทดสอบ, ผลของ θ' ที่ได้จากตัววัดความชื้นถูกสอบเทียบกับการคำนวณความชื้นในดินที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้การบดอัดดินมาตรฐานและเทียบตัววัดความชื้นลงในดินที่ใช้ในการทดสอบที่ทำการบดอัดไว้แล้ว 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.)

เมื่อทำการสอบเทียบอุปกรณ์แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเชิงปริมาตรที่ได้จากตัววัดความชื้น (θ') กับปริมาณความชื้นในดิน (w) และความ

ขึ้นเชิงปริมาตรที่ถูกต้อง (θ) พบว่าค่าความชื้นที่ได้จากสมการกับค่าที่อ่านได้จากตัววัดความชื้นมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ค่าความชื้นที่ได้จากตัววัดความชื้น เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการ ตัววัดความชื้นจะต้องปรับแก้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องโดยสมการที่ (3) ถือเป็นที่ยอมรับในการศึกษาครั้งนี้

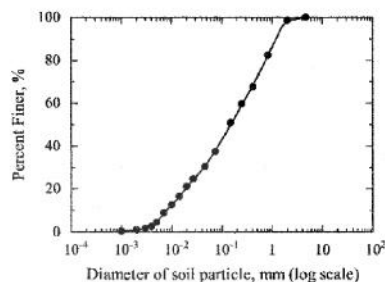
$$\theta = 1.2233\theta' - 0.0649 \quad (3)$$

3. คุณสมบัติดิน

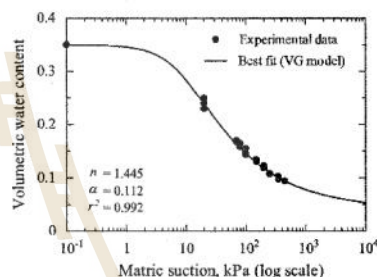
ดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินตัวอย่างที่ถูกรวบรวมจากบ้านคลองสะท้อน ตำบลวังหมี่ อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นพื้นที่ตั้งสถานีเตือนภัย ระบบเตือนภัยน้ำหลากดินถล่ม ระดับเฝ้าระวัง โดยทำการเก็บตัวอย่างดินแบบมีการรบกวนตัวอย่างขณะเก็บ (Disturbed) โดยเก็บที่ความลึกช่วงผิวดินถึง 1 เมตร ทำการจำแนกชนิดดินด้วยระบบ USCS (Unified Soil Classification System) ตามมาตรฐาน ASTM D 2487 ได้เป็นดินประเภท silty sand (SM) กราฟแสดงขนาดเม็ดดินดังรูปที่ 5 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 และทดสอบหาคความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดเมตริกกับความชื้น (SWCC) โดยวิธีห้อยแรงดันทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 6836-02 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดเมตริกกับความชื้น ดังรูปที่ 6 และแสดงคุณสมบัติทั้งหมดของดินตัวอย่างตามตารางที่ 1



รูปที่ 4 สภาพดินตัวอย่างที่เก็บจากบ้านคลองสะท้อน



รูปที่ 5 การกระจายขนาดของเม็ดดิน



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงคาพิวลาวิกับ ความชื้น (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/นาที)	4.17×10^{-5}
ความพรุน, n	0.350
พารามิเตอร์ความแข็งแรงของดิน	
ค่ามุมเสียดทานภายใน, ϕ ($^\circ$)	31
ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน, c (กิโลปาสกาล)	14

4. ขั้นตอนการทดสอบ

4.1 การเตรียมตัวอย่างดินทดสอบ

เริ่มต้นด้วยการนำดินตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบทั้งหมด ตากทิ้งไว้ที่อากาศแห้งเป็นเวลา 20 วัน จนดินมีลักษณะแห้งหรือมีความชื้นค่าหนึ่ง หลังจากนั้นทำการบดอัดดินลงในแบบจำลองท่ออะคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 700 มิลลิเมตร ให้ดินมีความสูง 600 มิลลิเมตร ซึ่งการบรรจุดินลงในแบบจำลองนั้นจำเป็นต้องทำให้ดินทดสอบเป็นเนื้อเดียวกัน การบดอัดดินจะแบ่งออกเป็น 12 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นจะมีความหนา 50 มิลลิเมตร ดินที่ถูกควบคุมในแต่ละชั้นจะมีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 1.64 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าอัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.549 ในระหว่างขั้นตอนการบดอัดดินนั้นต้องทำการติดตั้งตัววัดความชื้นที่ผ่านการสอบเทียบเรียบร้อยแล้วเข้ากับรูที่อยู่ทางด้านข้างของท่ออะคริลิกด้วย

4.2 เงื่อนไขการทดสอบ

แบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติได้รับการออกแบบมาเพื่อที่จะศึกษาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ระยะเวลาการซึมของปริมาณน้ำฝนและการเกิดน้ำซึ่งบนผิวดิน ดินที่ใช้ในการศึกษาจะทำการทดสอบ 3 การทดสอบ โดยแต่ละการทดสอบใช้ค่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน การทดสอบแต่ละครั้งถูกกำหนดปริมาณความชื้นฝนในช่วงที่ต่ำกว่า ไกล่เคียง และสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน คือ 5, 10 และ 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ข้อมูลจะถูกบันทึกตั้งแต่นั้นเริ่มทำการทดสอบจนถึงสภาวะที่ปริมาณความชื้นมีค่าคงที่ โดยโปรแกรมการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 2

5. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

การตอบสนองของความชื้นที่ตรวจวัดได้ระหว่างทำการทดสอบถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7 การทดสอบทั้งหมดใช้ตัววัดความชื้นในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นที่ระดับความลึกต่างๆ ตัววัดความชื้น P1, P2, P3, P4

และ P5 ตรวจวัดความชื้นที่ระดับความลึก 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตร จากผิวดิน ตามลำดับ

รูปที่ 7 (a) แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรขึ้นกับเวลา สำหรับปริมาณความชื้นฝน 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ($i < k_s = 4.17 \times 10^{-6}$ ม./นาที่ หรือ 15 มม./ชม.) โดยอัตราส่วนระหว่างค่าความชื้นฝนต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินเท่ากับ 0.333 ($i/k_s = 0.333$) ความชื้นเชิงปริมาตรเริ่มต้น (θ_{in}) ของดินที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.081 ถึง 0.085 เมื่อแปลงแล้วมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 2.3% ถึง 2.4% หลังจากเริ่มทำการทดสอบปล่อยน้ำฝนตัววัดความชื้น P1 ที่ความลึก 100 มิลลิเมตร ตอบสนองต่อความชื้นครั้งแรกเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที จากนั้นที่ตกลงสู่ผิวดินทำให้แผ่นความชื้น (Wetting front) เคลื่อนตัวลงสู่ด้านล่างของชั้นดิน การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จากปริมาณความชื้นเริ่มต้นจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ 0.270 หรือมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 77% เมื่อแผ่นความชื้นเคลื่อนที่ถึงความลึก 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 แผ่นความชื้นจะเคลื่อนที่ไปตามความลึกของชั้นดินด้วยอัตราเร็วคงที่มีค่าเท่ากับค่าความชื้นฝนที่ใช้ทดสอบ) ไปยังความชื้นที่เรียกว่าความชื้นพื้นหลัง (θ_{in}) ระยะเวลาที่ตัววัดความชื้นแต่ละตำแหน่งตรวจวัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีพื้นฐานการซึมของ Green and Ampt [12] ระดับความลึกของแผ่นความชื้น ณ ตำแหน่งใดๆ คือ ปริมาณน้ำที่ดิบได้รับในหนึ่งหน่วยเวลาต่อความสามารถการรับน้ำของดิน หรือกล่าวได้ว่าปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงในหนึ่งหน่วยเวลาสามารถเคลื่อนที่ไปได้หนึ่งหน่วยระยะทาง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

ตารางที่ 2 โปรแกรมการทดสอบ

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

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

เมื่อพิจารณาในเทอมของระยะเวลา t ความลึก z_w ใดๆ สามารถเขียนใหม่ได้ว่า :

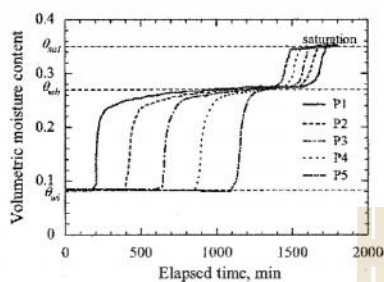
$$t = \frac{z_w(\theta_1 - \theta_0)}{i} \quad (5)$$

หลังจากนั้นพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นขึ้นอีกครั้งหนึ่งจากการเคลื่อนตัวของแผ่นความชื้นเนื่องจากพื้นของแบบจำลองไม่สามารถระบายน้ำได้ ทำให้ดินอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained state) ดังนั้นน้ำที่ซึมลงสู่ด้านล่างของชั้นดินจะเกิดการสะสมและเพิ่มระดับชั้นย่อยต่อเนื่อง เป็นสาเหตุทำให้เกิดการตอบสนองของตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P5 อีกครั้งเมื่อเวลาผ่านไป 1350 นาที ทำให้ค่าปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 0.272 ไปถึงความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (θ_{sat}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.350 หรือมีความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 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

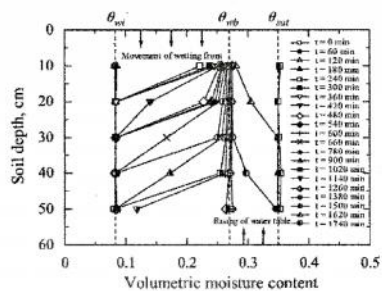
รูปที่ 7 (c) แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรต่อเวลา สำหรับปริมาณความชื้นผืน 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งอยู่ในช่วงที่สูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน โดยอัตราส่วนระหว่างค่าความชื้นผืนต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินเท่ากับ 1.333 ($i/k_s = 1.333$) ค่าความชื้นเชิงปริมาตรเริ่มต้นของดินมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.081 ถึง 0.085 หลังจากเริ่มทำการทดสอบปล่อยน้ำผืนตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P1 ตอบสนองต่อความชื้นครั้งแรกเมื่อเวลาผ่านไป 50 นาที และมีค่าปริมาณความชื้นคงที่ที่ 0.350 ตัววัดความชื้นที่ตำแหน่ง P2, P3, P4 และ P5 เริ่มตอบสนองต่อความชื้นเมื่อเวลาผ่านไป 160, 270, 405 และ 545 นาที ตามลำดับ โดยค่าความชื้นเชิงปริมาตรที่วัดได้จากตัววัดความชื้นทุกตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันและคงที่ตลอดการทดสอบที่ 0.350 หรือมีความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 100% จากการทดสอบพบว่าเมื่อเวลาทดสอบผ่านไป 58 นาที เกิดน้ำขัง (Ponding) ที่ผิวดิน น้ำผืนซึมผ่านผิวดินไปได้ 150 มิลลิเมตร ในช่วงเวลานี้ดินมีความชื้นผ่านน้ำที่สภาวะอิ่มตัว (Saturated state) จน

สิ้นสุดกระบวนการทดสอบ เป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียวคือช่วงการไหลซึม และจากผลการทดสอบยังพบอีกว่าแผ่นความชื้นจะเคลื่อนที่ช้าลงในช่วงแรก และในเวลาถัดไปจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราคงที่ไปตลอดการทดสอบ เนื่องจากก่อนเริ่มการทดสอบดินมีลักษณะแห้ง โดยทางกายภาพคือมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่ำ จัดเป็นดินที่อยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แรงดันน้ำจะมีค่าเป็นลบ เมื่อเริ่มการทดสอบปล่อยน้ำผืนในช่วงแรก ผิวหน้าของดินจะดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากมีความต่างศักย์ของการซึมอยู่มาก ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำ [2] และเกิดแรงคาพิลลารี (Capillary) เป็นแรงดึงน้ำที่เกิดเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำ ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างความเชื่อมแน่น (Cohesion) ของน้ำและการประสาน (Adhesion) ระหว่างน้ำกับผิวของอนุภาคเม็ดดินตรงผิวของน้ำ (Air - water interface) ประกอบกับมีแรงดันอากาศ (Pore - air pressure) อยู่ภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน จึงทำให้ความสามารถการไหลซึมของน้ำช้าลง ดังผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 9

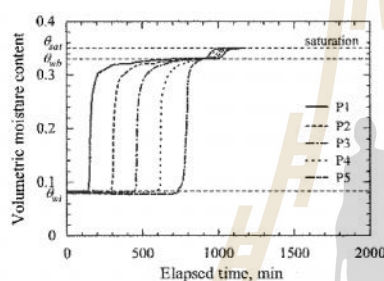
รูปที่ 8 (a) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรตามความลึกของแท่งดิน ในช่วงเวลาที่ปล่อยน้ำผืนสำหรับความชื้นผืนเท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้นเกิดจากขบวนการสองขั้นตอน คือ 1) การไหลซึมของน้ำผืนผ่านผิวดิน และ 2) การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในช่วงแรกได้จากค่าความชื้นเชิงปริมาตรเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นจาก 0.083 ถึง 0.270 เป็นความชื้นที่เกิดหลังจากการเคลื่อนตัวของแผ่นความชื้นจากผิวหน้าดิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในขั้นตอนนี้ดินยังอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ขณะที่ช่วงที่สองจะเกิดหลังจากการเคลื่อนตัวของแผ่นความชื้นมาถึงชั้นที่น้ำของแบบจำลอง จนกระทั่งเริ่มเกิดการสะสมของปริมาณความชื้นอย่างต่อเนื่องและเกิดการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ทำให้มีค่าความชื้นเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นจนถึง 0.350 ซึ่งเท่ากับค่าปริมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัว (θ_{sat}) ขนาดของปริมาณความชื้น (θ_{sat}) ที่เพิ่มขึ้นมีความคล้ายคลึงกันกับการศึกษาที่มีมาก่อนหน้านี้ [3, 11, 14-17] และรูปที่ 8 (c) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรตามความลึกของแท่งดิน ในช่วงเวลาที่ปล่อยน้ำผืนสำหรับความชื้นผืนเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง สังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเกิดขึ้นเพียงช่วงแรกหรือช่วงการไหลซึมเท่านั้น และคงที่ไปตลอดจนสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ เนื่องจากบริเวณผิวดิน



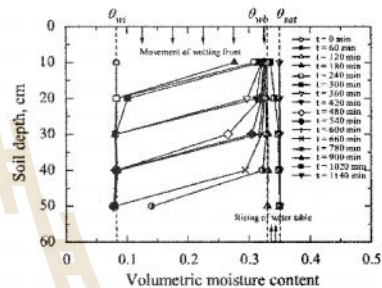
(a)



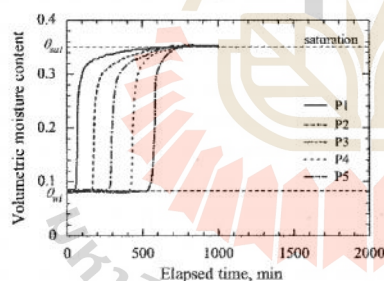
(a)



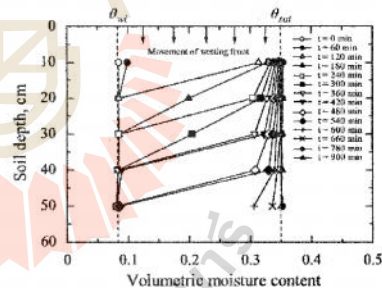
(b)



(b)



(c)



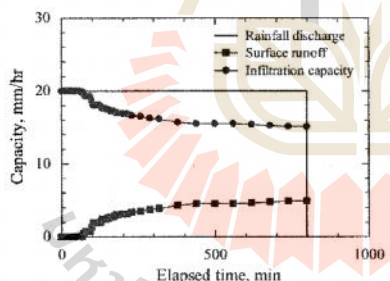
(c)

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเชิงปริมาตรกับเวลา
 (a) ปริมาณความชื้นฝ่น 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
 (b) ปริมาณความชื้นฝ่น 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
 (c) ปริมาณความชื้นฝ่น 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของแห้งดินกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเชิงปริมาตร
 (a) ปริมาณความชื้นฝ่น 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
 (b) ปริมาณความชื้นฝ่น 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
 (c) ปริมาณความชื้นฝ่น 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

อยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำตั้งแต่เริ่มเกิดน้ำซึ่งที่ผิวดิน ความชื้นเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นคือ 0.083 ไปถึงสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (θ_{sat}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.350 หรือมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 100%

เปรียบเทียบระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรต่อเวลาแสดงไว้ในรูปที่ 7 (b) และการเปลี่ยนแปลงความชื้นเชิงปริมาตรกับความลึกของแห่งดิน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8 (b) สำหรับการทดสอบที่ค่าความชื้นผ่นเท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน สังเกตเห็นได้ว่าขนาดของปริมาณความชื้น (θ_{wb}) ที่เพิ่มขึ้นในช่วงการไหลซึมมีค่าใกล้เคียงปริมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัว เวลาในการตอบสนองต่อปริมาณความชื้นจะเร็วกว่าที่ความชื้นผ่น 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และตอบสนองช้ากว่าที่ความชื้นผ่น 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยกล่าวได้ว่าปริมาณความชื้นผ่นมีผลต่อเวลาการตอบสนองต่อปริมาณความชื้นในช่วงการไหลซึม โดยการเคลื่อนตัวของผ่นความชื้นจะเร็วขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความชื้นผ่น ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่เคยมีการศึกษามา [11] ที่ได้ทำการทดสอบการตอบสนองทางอุทกวิทยาและการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยแบบจำลองลาดดินสองมิติ

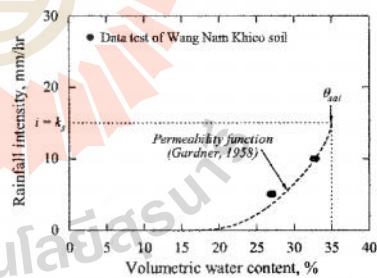


รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการซึมผ่านกับระยะเวลาทดสอบ

จากรูปที่ 9 เมื่อเริ่มการทดสอบปล่อยน้ำฝน สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของน้ำที่ระบายออกมาทางผิวดินคือปริมาณน้ำผ่นสะสม สำหรับความชื้นผ่น 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยในช่วง 0 ถึง 56 นาทีแรกน้ำผ่นสามารถซึมผ่านผิวดินได้ทั้งหมด หมายความว่าผิวดินมีความ

สามารถในการดูดซับน้ำได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอัตราเร็วของการซึมผ่านมีค่าเท่ากับปริมาณความชื้นผ่นที่ใช้ในการทดสอบ โดยการไหลซึมผ่านผิวดินไปตามความลึกของผ่นดินจะเป็นไปตามกฎของ Darcy (Darcy's law) [18] น้ำผ่นที่ปล่อยออกจากแบบจำลองน้ำผ่นสามารถคำนวณเป็นปริมาณน้ำผ่นที่ตกลงสู่ผิวดินมีค่าคงที่ที่ 261.80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที หลังจากนั้นเมื่อผ่นผิวดินเริ่มอิ่มตัวด้วยน้ำ คืออัตราเร็วของน้ำผ่นสูงกว่าค่าการซึมผ่านน้ำอิ่มตัวของดิน จะก่อให้เกิดน้ำซึ่งที่ผิวดินหรือเรียกว่าปริมาณน้ำผ่นส่วนเกิน (Rainfall excess rate) หลังจากสภาวะนี้ดินจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้น้อยและช้าลงจนถึงวันที่ 400 นาทีระบายออกที่ผิวดินจะมีอัตราการไหลออกคงที่ไปตลอดการทดสอบ และมีอัตราการซึมผ่านดินที่น้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าระบบได้เข้าสู่สภาวะการไหลแบบคงตัว (Steady state) ซึ่งค่าแรงดันอากาศ ณ สภาวะนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของความชื้นผ่นและความลึกของน้ำที่ซังบนผิวดิน โดยค่าอัตราการซึมผ่านสุดท้ายของน้ำภายในดินจะมีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองการซึมของ Philip [19] และเป็นไปตามแนวคิดของ Horton [20] ที่ใช้สมการคณิตศาสตร์มาอธิบายธรรมชาติของอัตราการซึมผ่านผิวดินว่าจะมีค่าสูงสุดในระยะเวลาแรกและจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งมีค่าคงที่ตลอดไป ดังสมการต่อไปนี้

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



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นผ่นหลัง (θ_{wb}) กับปริมาณความชื้นผ่น (i)

จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นผ่นหลัง (θ_{wb}) ที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบ กับ

ปริมาณความชื้น (i) ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าขนาดของ σ_{vs} ขึ้นกับปริมาณความชื้นผืน โดยความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้ว่าในช่วงแรกความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดินต่ำกว่าค่าความชื้นผืน เมื่อพิจารณาที่ชั้นผืนดินบางๆ ไม่นานหลังจากที่น้ำฝนแทรกซึมเข้าไป น้ำฝนจะถูกกักเก็บไว้ในดินชั้นนี้ ซึ่งการไหลออกของน้ำในชั้นนี้ต่ำกว่าค่าความชื้นผืน ทำให้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นค่าการซึมผ่านในดินชั้นนี้จึงเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณน้ำในชั้นนี้มีอัตราการไหลออกของน้ำในดินเท่ากับอัตราการไหลเข้าของน้ำฝนและไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตลอดเหตุการณ์ฝนตก ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละชั้นดิน แผ่นความชื้นจะเคลื่อนที่ไปตามความลึกของชั้นดินซึ่งอยู่ในช่วงระหว่างปริมาณความชื้นเริ่มต้นกับปริมาณความชื้นที่ σ_{vs}

อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในครั้งนี้นำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการไหลของน้ำในดิน ซึ่งจะนำไปใช้เป็นตัวบ่งชี้และประเมินโอกาสการเกิดดินโคลนถล่มในเขตพื้นที่อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา ต่อไป และเป็นความเข้าใจเบื้องต้นที่จะนำไปสู่การพัฒนาการติดตั้งและระบุตำแหน่งของเครื่องมือเตือนภัยล่วงหน้าให้มีประสิทธิภาพต่อการแจ้งเตือน คือสามารถแจ้งเตือนได้ทันทีที่ช่วงที่ต่อกับที่ตัดที่จะเกิดขึ้นเพื่อช่วยบรรเทาความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่เสี่ยงภัย

6. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาการไหลของน้ำในดินเนื่องจากอิทธิพลของน้ำฝนของดินตัวอย่างที่เก็บมาจากอำเภอรังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเมื่อดินอยู่ภายใต้สภาวะรับน้ำฝนแบบคงที่ ด้วยแบบจำลองทางกายภาพการซึมในหนึ่งมิติ ภายใต้เงื่อนไขไม่มีการระเหยน้ำใต้ดิน และค่าความชื้นผืนอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า ไกลเคียง และสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน สามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 ปริมาณน้ำฝนเป็นเงื่อนไขหลักที่มีอิทธิพลต่อการซึมผ่านผืนดิน โดยที่ขนาดของ σ_{vs} ขึ้นกับปริมาณความชื้นผืน ที่ความชื้นผืนสูงจะส่งผลให้แรงดันน้ำภายในมวลดินสูงกว่าที่ความชื้นผืนต่ำ เป็นสาเหตุทำให้เกิดการวิบัติของลาดดินเมื่อเกิดพายุฝนรุนแรงได้เร็วกว่า

6.2 ผลการทดสอบชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ณ สภาวะหนึ่งเมื่ออัตราเร็วของน้ำฝนสูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน อัตราการไหลซึมผ่านผืนดินจะช้าลงในช่วงเวลาแรกตามความลึกของชั้นดิน เนื่องจากที่ชั้นผืนดินอยู่ใน

สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและเกิดแรงคาพิลลารีภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจนได้รับน้ำฝน และจะมีอัตราการซึมผ่านคงที่ไปตลอดการทดสอบในเวลาถัดไป

6.3 อิทธิพลของความชื้นผืนที่แสดงโดยอัตราส่วนระหว่างค่าความชื้นผืนต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน (i/K_s) จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อ $i/K_s < 1$ การเคลื่อนตัวของแผ่นความชื้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสองช่วงคือช่วงการไหลซึม และช่วงการอิ่มตัวเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำเมื่อแผ่นความชื้นเคลื่อนตัวถึงชั้นที่น้ำ และอัตราการซึมของน้ำผ่านผืนดินจะมีค่าเท่ากับค่าความชื้นผืน ในขณะที่ $i/K_s > 1$ การเคลื่อนตัวของแผ่นความชื้นจะเกิดขึ้นที่ช่วงของการไหลซึมเท่านั้น จากปริมาณความชื้นเริ่มต้น (σ_{vs}) ไปสู่ความชื้น ณ สภาวะอิ่มตัว (σ_{sm})

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การศึกษาศาสนาสำหรับนายชานธิป สุโกทยาน

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Santi Thaiyuenwong. (2010). *Landslide Hazard Analysis by Geotechnical Engineering Method Considering Dynamic Factors in Andaman Coastal Area of Southern Thailand*. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University. (in Thai)
- [2] Fredlund, D.G., (1996). *The emergence of unsaturated soil mechanics*. The Fourth Spencer J. Buchanan Lecturer, Texas A&M University, College Station, Texas.
- [3] Tohari, A., Nishigaki, M., and Komatsu, M. (2007). "Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol.133 No.5 : 575-587.
- [4] Greco, R., Guida, A., Damiano, E., and Olivares, L. (2010). "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 : 127-136.

- [5] Eichenberger, J., Ferrari, A., and Laloui, L. (2013). "Early warning thresholds for partially saturated slopes in volcanic ashes." *Computers and Geotechnics*, Vol.49 : 79-89.
- [6] Pradel, D., and Raad, G. (1993). "Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119 No.2 : 315-332.
- [7] Lee, L.M., Gofar, N., and Rahardjo, H. (2009). "A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability." *Engineering Geology*, Vol.108 No.3 : 272-285.
- [8] Li, W.C., Lee, L.M., Cai, H., Li, H.J., Dai, F.C., and Wang, M.L. (2013). "Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope." *Engineering Geology*, Vol.153 : 105-113.
- [9] Ali, A., Huang, J., Lyamin, A.V., Sloan, S.W., Griffiths, D.V., Cassidy, M.J., and Li, J.H. (2014). "Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modelled by infinite slopes." *Engineering Geology*, Vol.179 : 102-116.
- [10] Lee, L.M., Kassim, A., and Gofar, N. (2011). "Performances of two instrumented laboratory models for the study of rainfall infiltration into unsaturated soils." *Engineering Geology*, Vol.117 No.1 : 78-89.
- [11] Chinkuljirawat, A., Yubonchit, S., Horpibulsuk, S., Jothityangkoon, C., Jeebataku, C., and Arutrajah, A. (2016). "Hydrological responses and stability analysis of shallow slopes with cohesionless soil subjected to continuous rainfall." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.53 No.12 : 2001-2013.
- [12] Green, W.H., Ampt, G.A., (1911). "Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils." *Journal of Agricultural Science*, Vol.4 No.1 : 1-24.
- [13] Hall, M.J., Johnston, P.M., and Wheather, H.S. (1989). "Evaluation of overland flow models using laboratory catchment data. I. An apparatus for laboratory catchment studies." *Hydrological Sciences Journal*, Vol.34 : 277-288.
- [14] Huang, C.-C., Lo, C.-L., Jang, J.-S., and Hwu, L.-K. (2008). "Internal soil moisture response to rainfall-induced slope failures and debris discharge." *Engineering Geology*, Vol.101 No.3 : 134-145.
- [15] Huang, C. - C., and Yuin, S. - C. (2010). "Experimental investigation of rainfall criteria for shallow slope failures." *Geomorphology*, Vol. 120 No.3 : 326-338.
- [16] Sharma, R.H., and Nakagawa, H. (2010). "Numerical model and flume experiments of single- and two-layered hillslope flow related to slope failure." *Landslides*, Vol.7 No.4 : 425-432.
- [17] Phi, S., Clarke, W., and Li, L. (2013). "Laboratory and numerical investigations of hillslope soil saturation development and runoff generation over rainfall events." *Journal of Hydrology*, Vol.493 : 1-15.
- [18] Buckingham, E. (1907). *Studies on the movement of soil moisture*. US Department of Agriculture, Bureau of Soils No.38.
- [19] Philip, J.R., (1957). "The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution." *Soil Science*, Vol.83 No.5 : 345-357.
- [20] Horton, R.E. (1933). "The role of infiltration in the hydrologic cycle." *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol.14 No.1 : 446-460.

ประวัติผู้เขียน

นายชนาธิป สุโกทยาน เกิดเมื่อวันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ.2533 ที่จังหวัดลพบุรี บิดาชื่อ ร้อยตรีรัชพล สุโกทยาน มารดาชื่อนางรัชฎาพร สุโกทยาน สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษา จากโรงเรียนบรรจงรัตน์ ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ในปีการศึกษา 2551 สำเร็จ การศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพระนารายณ์ ตำบล ท่าศาลา อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี และเข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรม ศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ในปีการศึกษา 2557 เมื่อสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ได้ทำงานในตำแหน่งวิศวกรโยธา บริษัท กุทธา จำกัด (ธันวาคม พ.ศ.2557 – มีนาคม พ.ศ.2558) หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี โดยขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ซึ่งได้นำความรู้ที่ใช้ใน การสอนมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท มีผลงาน วิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ มีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ก.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี