



โครงการ การตอบสนองเชิงศาสตร์และการวิเคราะห์เสียวภาพของ
ลาดดินเนื่องจากฝน

โดย รศ.ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ และคณะ

พฤษภาคม 2563

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การตอบสนองเชิงกลยุทธ์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเนื่องจากฝน

รศ.ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การตอบสนองเชิงเศรษฐศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน เนื่องจากฝน นี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) เลขที่สัญญา RSA6080056 หัวหน้าโครงการขอขอบพระคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนวิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง นอกจากนี้ยังมีบุคคลากรสนับสนุนอีกหลายท่านที่ช่วยปฏิบัติงานนี้ทั้งที่เอียนามในที่นี้ ได้แก่ ดร.สมใจ ยุบลชิต อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีอีสาน นายถาวร อีระเมธาพิพรัตน์ ที่ช่วยออกแบบอุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการ และดำเนินการทดสอบและวิเคราะห์ผล รวมถึงบุคคลที่มีได้เอียนามในที่นี้ทั้งผู้วิจัยจึงขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

หวังเป็นอย่างยิ่งว่า หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจะนำองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยนี้ไปใช้ในการออกมาตรการการป้องกันดินถล่ม รวมถึงพัฒนาระบบแจ้งเตือนภัย ที่เหมาะสมต่อการเตือนภัยดินถล่มอย่างแท้จริง ช่วยให้ประชาชนที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยมีความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินต่อดินโคลนถล่ม

รองศาสตราจารย์ ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และวิเคราะห์เสถียรภาพบนหลักการลาดดินอนันต์เพื่อบูรณาการความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับดินโคลนถล่มแบบต้นและเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบเตือนภัยดินถล่ม ผลการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นผืน และความชันลาดดิน ต่อการตอบสนองเชิงอุทกวิทยาในลาดดินต้น พบว่า การตอบสนองทางอุทกวิทยาภายใต้ผืนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ การตอบสนองต่อช่วงการซึม (Infiltration phase) และช่วงการอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation phase) ในช่วงการซึม ปริมาณความชื้นสูงสุดในดิน หรือความชื้นหลังระนาบความชื้น (Water content behind wetting front, θ_w) พบว่าขึ้นอยู่กับความชื้นผืนเพียงอย่างเดียว โดยจะไม่เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของความชันลาดดิน เมื่อนำข้อสรุปดังกล่าวไปประเมินระนาบวิบัติด้วยหลักการลาดดินอนันต์ พบว่า รูปแบบการวิบัติในลาดดินต้นสามารถจำแนกด้วยค่าดัชนีเสถียรภาพ (Stability index, $\tan \phi' / \tan \beta$) ได้ 3 รูปแบบหลัก ประกอบด้วย 1) การวิบัติตามแนวชั้นทึบน้ำ (Along the impervious layer mode) 2) การวิบัติระดับตื้น (Shallow depth mode) และ 3) การวิบัติในช่วงเปลี่ยนผ่าน (Transitional mode) โดยการวิบัติในช่วงเปลี่ยนผ่านเท่านั้นที่อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีการซึม (Infiltration index, i/k_s) ส่งผลให้ตำแหน่งของระนาบวิบัติสามารถเกิดขึ้นได้ที่ทุกระดับความลึกในลาดดิน

นอกจากนี้งานวิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อดินโคลนถล่มระดับต้นผ่านกราฟความลึกวิกฤติ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความลึกที่ระนาบวิบัติ ความชันของลาดดิน ความชื้นของผืน และมุมเสียดทานของดินพบว่า อัตราการลดลงของเสถียรภาพลาดดินจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณความชื้นผืน แต่จะคงที่เมื่อความชื้นผืนมากกว่าหรือเท่ากับความสามารถในการซึมผ่านได้ของดินที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ($i \geq k_s$) นอกจากนี้ ความสามารถในการซึมผ่านได้ของดินที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำยังแสดงบทบาทสำคัญต่อกราฟน้ำผืนวิกฤติในการควบคุมปริมาณความชื้นผืนที่สามารถกระตุ้นการวิบัติของลาดดิน กล่าวคือ เมื่อปริมาณความชื้นผืนอยู่ในช่วงต่ำกว่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของดินที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ เวลาในการวิบัติของลาดดินต้นจะเร็วขึ้นตามปริมาณความชื้นผืนที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ปริมาณความชื้นผืนมีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับความสามารถของดินดังกล่าว เวลาในการวิบัติของลาดดินจะไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับความชันลาดดินจะแสดงบทบาทหลักต่อการควบคุมเสถียรภาพเริ่มต้นของลาดดิน โดยที่เสถียรภาพเริ่มต้นของลาดดินจะลดลงตามความชันที่เพิ่มขึ้น

ผลการจำแนกรูปแบบการวิบัติในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการระบุตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการติดตั้งเครื่องมือเพื่อเฝ้าระวังดินโคลนถล่มระดับต้น และการแจ้งเตือนภัยล่วงหน้าได้ โดยลาดดินมีความชันน้อยระยะนาบวิบัติจะอยู่ตามแนวรอยต่อระหว่างชั้นดินกับชั้นตึบน้ำ จึงควรติดตั้งอุปกรณ์แจ้งเตือนภัยใกล้ๆ ผิวรอยต่อของชั้นตึบน้ำเพื่อตรวจจับการเพิ่มสูงขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ขณะที่ลาดดินมีความชันปานกลาง รูปแบบการวิบัติจะเป็นการวิบัติช่วงเปลี่ยนผ่าน ระยะนาบวิบัติเกิดขึ้นได้หลายระยะนาบในลาดดิน จึงควรติดตั้งอุปกรณ์แจ้งเตือนภัยประมาณกึ่งกลางชั้นดิน หรือต่ำกว่าผิวน้ำลาดดินลงไปพอประมาณ เพื่อตรวจจับหาค่าความชันหลังระยะนาบ ส่วนลาดดินมีความชันมากรูปแบบการวิบัติจะเป็นการวิบัติระดับต้น และจะเกิดขึ้นทันทีหลังฝนตกหนัก การแจ้งเตือนภัยจึงเป็นการห้ามผู้คนเข้าไปอยู่อาศัยบริเวณนั้น นอกจากนี้ยังพบว่าการที่ดินมีค่าความยึดเกาะซึ่งเกิดจากการมีอยู่ของรากพืชสามารถช่วยเพิ่มความลึกของระยะนาบวิบัติ และยังลดความไวของระยะนาบวิบัติที่เปลี่ยนไปต่อการเปลี่ยนความชื้นฝน ดังนั้นการมีอยู่ของรากพืชจึงมีประโยชน์อย่างมากต่อการลดความเสี่ยงภัยต่อการวิบัติของชุมชนโดยรอบ

Abstract

This report consists of two main parts. In the first part, a series of experiments were undertaken to evaluate the hydrological responses of shallow slopes of varying steepness subjected to varying intensities of rainfall. An analysis of infinite slopes were also undertaken to develop a fundamental understanding of rainfall-induced shallow landslide characteristics. The hydrological and physical responses were characterized in the infiltration and saturation phases. During the infiltration phase, the maximum water content was found behind the wetting front, termed as the water content behind the wetting front (θ_{wb}). For a certain soil type, the magnitude of θ_{wb} was found to be dependent on the magnitude of rainfall intensity, regardless of the slope gradient and initial water content. Based on the relative depth of the failure plane, the failure can be categorized by three prime modes: 1) along the impervious layer mode, 2) shallow depth mode, and 3) transitional mode. These modes can be characterized by the magnitude of a stability index termed as $\tan \phi' / \tan \beta$ ratio. An infiltration index termed as i/k_s ratio was found to play a role in the depth of failure plane only for the transitional mode. The second part presents a series of parametric studies performed via finite element modeling to investigate the effect of saturated permeability of soil, slope angle and antecedent rainfall on the instability of a shallow slope. It was found that the rate of reduction in safety factor increases with an increasing intensity of rainfall, only in a range of lower than the infiltration capacity at soil saturated state. As such, the saturated permeability of the soil, which is equal to the infiltration capacity at soil saturated state, plays an important role in the shallow slope failure. The saturated permeability was found also to govern a range of applicability of the rainfall intensity-duration thresholds for initiation of slope failure. If the rainfall intensity is not greater than the infiltration capacity at soil saturated state, the rainfall duration to failure can be read from the thresholds. Slope angle and antecedent rainfall were found to play significant roles on the instability of shallow slopes, as they control the initial stability of slope, which results in the different linear relationships of thresholds. In addition, the slope angle

might accelerate the rate of rain water infiltration, and hence it reflects the slope of the thresholds.

Based on those failure modes, primary methodology for monitoring device installations to build up physically-based warning system was introduced. Where the mild slope, the failure plane will be along the impervious layer. Should install a warning device near the boundary between the soil layer and impervious layer to detect an increase in water table levels. While the Intermediate steep slope is a transitional failure, the failure plane can occur at various depths depending on the stability and infiltration indices. For a given i/k_s , lower values of the strength parameters (both c' and ϕ') result in shallower depths of the failure plane. Furthermore, in cohesionless sloping ground having its steepness angle close to the soil frictional angle, when the rainfall intensity approaches the value of the soil saturated permeability, the variation of rainfall intensity plays the major role in the eventual depth of the failure plane. This study also found that little cohesive strength in sloping ground can reduce the influence of rainfall intensity on the depth of a potential failure plane.

Executive summary

Research Title: Hydrological Responses and Stability Analysis of Rainfall-Induced Shallow Slope Failures (การตอบสนองเชิงกลศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเนื่องจากฝน)

Contract no.: RSA6080055

1. Statement of problems

Rainfall-induced shallow landslide is a natural disasters frequently found in many countries. In Thailand, four of fourteen most catastrophic natural disasters are disasters caused by rainfall-triggered shallow landslide (Wiki, Yumuang, 2006; Oh et al., 2008). Early warning systems are common tools to manage rainfall-induced disasters, including landslides, floods, and debris flows. The current warning system is evaluating the level of disaster risks based on only real-time rainfall data, i.e. period and intensity of rainfall (Caine, 1980; Calcaterra et al., 2000; Corominas, 2000; Crosta and Frattini, 2001; Aleotti, 2004; Cannon and Gartner, 2005; Chien et al., 2005; and Guzzetti et al., 2007). This system is ease to use but it is empirical based and neglects several critical factors that govern true landslide characteristics (Pradel and Raad 1993; Rahimi et al. 2010; Ma et al. 2011; Santoso et al. 2011; Cho and Lee 2002; Rahardjo et al. 2007; Cho 2009; Xu et al. 2009; Ali et al. 2014a; Shen et al. 2015; Rahardjo et al. 2001; Rahimi et al. 2011; Cuomo and Della Sala 2013; Zhan et al. 2013), thus making this system not applicable outside the calibrated area.

Presently a physically-based warning system (Tohari et al. 2007; Greco et al. 2010; Eichenberger et al. 2013) is being interested. In this method, the warning levels are evaluated via the real-time hydraulic responses read from a set of monitoring devices. Tohari et al. (2007) conducted a series of large-scale tests on homogeneous slopes to understand the triggered mechanism of rainfall-induced slope failures and reported that most of the failure planes took place near the slope surface and were triggered by the rise in water table. Consequently, Tohari et al. (2007) suggested that the monitoring devices should be installed close to the slope surface and suggested two levels of warning phases, termed as early warning and final warning. However, this recommendation is based on a homogeneous soil slope, where the dominant failure mode is a noncircular sliding failure. However, for shallow slopes, where the thickness of the soil slope is thin compared to the length of the slope, the conclusions might be different from those reported by Tohari et al. (2007).

Insight into the development of seepage responses on shallow slopes during rainfall period will assist instrument installation, and hence enhance the efficiency of the warning system. Pradel and Raad (1993), Lee et al. (2009), Li et al. (2013), and Ali et al. (2014b) reported that the increment of pore pressure depends on an infiltration index, termed as a ratio of rainfall intensity to the saturated permeability of the soil. The higher the infiltration index, the more likely the failure occurs during the period of downward advance of wetting front termed the infiltration phase, and hence the shallower the depth of failure, and vice versa. Though works have been undertaken to study the hydrological responses in shallow slope due to rainfall, many factors are either neglected or played less attentions to the considerations. There has been no known study to date involving a series of laboratory experiments to evaluate the hydrological responses due to rainfall on shallow slopes, whereby the slope angle is conclusively taken into consideration. Another interesting factor is vegetation which is believed to play role in stability of slope. This study aims to determine effect of slope angle and vegetation on hydrological response, and consequently the stability of slope. If the effect of these factors on seepage response in shallow slopes during rainfall is known, suggestion of instrument installation will be conducted effectively.

2. Objectives

1) to investigate the effect of the relevant factors including rainfall intensity, slope angle, vegetation, and soil hydraulic properties on the failure characteristics of shallow slopes subjected to continuous rainfall.

2) to suggest the suitable location for instrumentations such that the warning system will work effectively.

3. Research methodology

This study was systematically divided into two parts: 1) laboratory experiments and 2) stability analysis of the slope.

1) Laboratory experiment

A large physical slope model was constructed such that a series of experiment to evaluate the hydrological responses can be conducted under various conditions of the relevant

factors. A schematic diagram of the physical model is shown in Figure1. The model consists of four components including the rainfall simulator, the experiment box, the box supports, and the chain pulley system. The box supports are pin and roller type supports such that the experiment box can be raised one side to a prescribed inclined angle by the chain pulley. The configuration of laboratory experiment was designed to investigate only hydrological responses of various sloping ground subjected to various rainfall intensities. Mechanical responses of the sloping ground are about to exclude from this experiment.

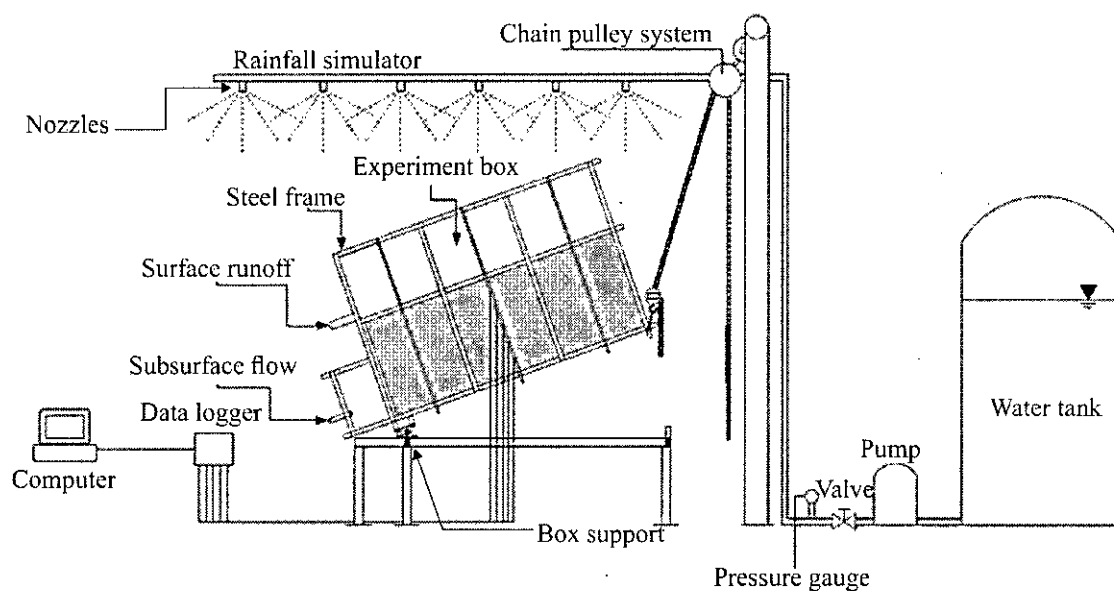


Figure 1 Schematic diagram of the physical slope model

Sets of laboratory experiment was conducted as shown in Table 2. Each test, rainfall was continuously applied until the arrival of the steady state which is indicated by the rate of water outflow at slope toe equals to the rainfall intensity. The magnitudes of rainfall intensity assigned to every test are lower than the soil saturated permeability. Monitored data will be recorded during the test until the arrival of the steady state (end of each test).

Table 1 Detail of the tests to be conducted.

Series	Rainfall intensity (mm/hr)	Slope angle (deg.)	Inter-storm rainfall period, t_b (day)
I	45	20	
	70		
	100		
	130		
	160		
II	100	5	
		10	
		30	
III	100	20	4
			7
			14

2) Stability analysis

Based on comprehensive knowledge from laboratory investigated in the first section, a series of infinite slope analysis was conducted to develop a fundamental understanding of the characteristics of failure planes in shallow slopes when subjected to varying of relevant factors. A limit-equilibrium approach is a most common method to assess the stability of infinite slopes when subjected to varying rainfall conditions. Figure 2 shows a typical section of infinite slope under rainfall condition. The failure plane is assumed to be parallel to the slope surface. The safety factor (FS) representing slope stability is defined by a term of shear strength (τ_R) over mobilized shear force (τ_M).

- The hydrological response is characterized by wetting and saturation phases. During the wetting phase, the magnitude of volumetric water content increases from its initial value to the final volumetric water content called “volumetric water content behind the wetting front: θ_{wb} ”. Further increment of the magnitude of volumetric water content will take place again when the saturation phase begins. At the saturation phase, the magnitude of water content will increase from θ_{wb} to the saturated volumetric moisture content (θ_s).
- The magnitude of rainfall intensity (i) affects the volumetric water content on both phases. The higher magnitude of rainfall intensity induces faster movement of wetting front and rise of water table. In addition, the magnitude of θ_{wb} increases with increasing the magnitude of rainfall intensity.
- The slope angle (b) does not affect the variation of volumetric water content during the wetting phase. In addition, the magnitude of θ_{wb} does not depend on the

magnitude of b . However, the slope angle affects the variation of volumetric water content during the saturation phase. The flatter slope coincide with the faster rise of water table.

As for the slope stability analysis, the location of the failure plane is located at the depth of the impervious layer for the low gradient slope and at a shallower depth close to the slope surface for the high gradient slopes. Based on the relative depth of failure plane, the failure is categorized to three modes: 1) along the impervious layer mode, 2) shallow depth mode which occurred very close to the slope surface, and 3) transitional mode which occurred any depth from the impervious layer to the slope surface. These modes are governed by the stability index ($\tan\phi'/\tan\beta$) and summarized below:

- For the low gradient slope ($\tan\phi'/\tan\beta \geq 1.0$), the failure mode is the along the impervious layer mode which is triggered by an increment of positive pore water pressure taking place during the saturation phase.
- If the slope gradient is greater than the soil frictional angle ($\tan\phi'/\tan\beta < 1.0$), the failure is triggered by the loss of matric suction during the wetting phase. With the assistance of the critical depth chart, the failure mode is characterized according to the magnitude of $\tan\phi'/\tan\beta$ ratio.
 - If the slope angle is far greater than the soil frictional angle (for the illustrated case shown in the study, the $\tan\phi'/\tan\beta$ ratio is lower than 0.9), the failure mode is the shallow depth mode which occurs closed to the slope surface.
 - If the slope angle is closed to the soil frictional angle (for the illustrated case shown in the study, the $\tan\phi'/\tan\beta$ ratio ranges from 0.90 to 1.0), the failure mode is the transitional model. The depth of failure plane can occurs any depth in the soil layer depending on the magnitude of infiltration index. The greater the $\tan\phi'/\tan\beta$ ratio results in the more sensitive of the depth of failure plane to the infiltration index.
- For a given i/k_s , lower values of the strength parameters (both c' and ϕ') result in shallower depths of the failure plane.
- In cohesionless sloping ground having its steepness angle close to the soil frictional angle, when the rainfall intensity approaches the value of the soil saturated

permeability, the variation of rainfall intensity plays the major role in the eventual depth of the failure plane.

- Little cohesive strength in sloping ground can reduce the influence of rainfall intensity on the depth of a potential failure plane.
- With the identical strength parameters, a soil having larger and more uniform pore structure tends to fail at the shallower depth.

5. Publication outputs:

1) *Chinkulkijniwat, A., Tirametatiparat, T., Supotayan, C., (...), Salee, R., Voottipruex, P. (2019), Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall (2019), Journal of Mountain Science, 16(9), pp. 2171-2183

2) Chinkulkijniwat, A., Horpibulsuk, S., Tirametatiparat, T., Yubonchit, S., Hydrological state at steady condition in stabilized earth with drainage installation, International Journal of Geomechanics (under second reviewed)

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ง
Executive summary.....	ฉ
สารบัญ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ทฤษฎี สมมุติฐานและกรอบแนวความคิดงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 บริบทการณ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ.....	4
2.1.1 ปัจจัยการเกิดดินถล่ม.....	5
2.1.2 การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม.....	7
2.1.3 คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำในดิน.....	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.2.1 เสถียรภาพของลาดดินภายใต้กระบวนการอุทกวิทยา.....	15
2.2.2 การตอบสนองของลาดดินต่อกระบวนการทางอุทกวิทยา.....	19
2.2.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการณ์การซึมน้ำภายในลาดดิน.....	20
2.2.4 ปัจจัยกระตุ้นภายนอกที่ส่งผลต่อการวิบัติในลาดดินธรรมชาติ.....	21
2.2.5 แบบจำลองกายภาพของลาดดิน.....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1	บทนำ	30
3.2	การเลือกและเตรียมตัวอย่างดิน	31
3.3	การสร้างแบบจำลองทางกายภาพการซึมและแบบจำลองน้ำฝน	34
3.4	การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Sensor) และการสอบเทียบ	39
3.4.1	อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Sensor)	39
3.4.2	การสอบเทียบตัววัดความชื้น	40
3.5	ขั้นตอนการทดสอบการไหลซึมของน้ำฝนในห้องปฏิบัติการ	41
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	
4.1	บทนำ	43
4.2	การทดสอบการซึมในหนึ่งมิติ	43
4.2.1	ผลการทดสอบชุดที่ 1	43
4.2.2	ผลการทดสอบชุดที่ 2	44
4.3	พฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน	47
4.4	การประเมินเสถียรภาพลาดดินต้นภายใต้สภาวะรับน้ำฝน	50
4.5	การจำแนกประเภทดินโคลนถล่ม	53
5	สรุปผลการวิจัย	57
	ภาคผนวก	60
	ประวัตินักวิจัย	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การพัฒนาเชิงอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วในหลายทศวรรษที่ผ่านมา เกิดความก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีเป็นอย่างมากในหลายๆ ประเทศทั่วโลก แต่ความเจริญก้าวหน้านี้ได้มาพร้อมกับผลกระทบที่ร้ายแรงต่อสภาพแวดล้อมของโลกเช่นกัน คือ ความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศในประเทศต่างๆ ทั่วโลกที่กำลังเผชิญอยู่ในปัจจุบันนี้ เช่น การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ทำให้อากาศอุ่นขึ้นบริเวณขั้วโลกเหนือและใต้ จึงเป็นเหตุให้เกิดการละลายของหิมะขั้วโลกมากขึ้น การเกิดอากาศร้อนจัดบ่อยครั้งในประเทศทางซีกโลกเหนือ ก่อเกิดไฟไหม้ป่ากินพื้นที่เป็นบริเวณกว้างในหลายๆ ประเทศ รวมทั้งการเกิดฝนตกหนักติดต่อกันหลายวันจนเกิดน้ำป่าและน้ำท่วมในหลายประเทศในเขตร้อนเขตอบอุ่น สำหรับประเทศไทยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เกิดเหตุการณ์น้ำป่า น้ำท่วม ดินถล่มตามลาดเขา แทบทุกปีและก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมากมายทั้งชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมากและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี เช่นในปี พ.ศ. 2549 เกิดอุทกภัยและโคลนถล่มในจังหวัดบริเวณภาคเหนือตอนล่าง ซึ่งเกิดจากฝนตกผิดปกติคงที่ในพื้นที่เดิมเป็นเวลาหลายวัน ทำให้ดินบนภูเขาไม่สามารถอุ้มน้ำฝนที่ตกลงมาได้ จึงส่งผลให้เกิดภาวะน้ำท่วม และภาวะดินถล่ม ทำให้เกิดความสูญเสียในชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนจำนวนมาก มีผู้เสียชีวิตและสูญหายทั้งสิ้น 116 ราย จาก 5 จังหวัดที่ประสบเหตุการณ์อุทกภัยและโคลนถล่มครั้งนี้ในปี พ.ศ.2553 เกิดเหตุการณ์การเกิดน้ำท่วมในประเทศไทยหนักที่สุดในรอบหลายสิบปี เนื่องจากมีฝนตกหนักในหลายพื้นที่ ในช่วงเดือนตุลาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2553 ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างหนักทั้งชีวิตและทรัพย์สินในหลายพื้นที่ กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย กระทรวงมหาดไทย พบว่ามีพื้นที่ประสบอุทกภัย มีจังหวัดประสบภัยทั้งสิ้น 39 จังหวัด 425 อำเภอ 3,098 ตำบล 26,226 หมู่บ้าน ราษฎรได้รับความเดือดร้อน 2,002,961ครัวเรือน 7,038,248 คน พื้นที่การเกษตรคาดว่าจะได้รับความเสียหาย 7,784,368 ไร่ พบผู้เสียชีวิตจากเหตุอุทกภัยแล้วทั้งหมด 180 ราย โดยเฉพาะในปี พ.ศ. 2554 หลังจากเกิดอุทกภัยครั้งใหญ่ในปี พ.ศ. 2553 ไม่มีใครคาดคิดว่าในปีต่อมาจะเกิดอุทกภัยครั้งใหญ่อีกครั้ง เนื่องจากฝนตกเป็นจำนวนมากทางภาคเหนือ เขื่อนหลายแห่งไม่สามารถเก็บน้ำได้ จึงต้องปล่อยน้ำปริมาณมากออกมา เป็นเหตุให้มวลน้ำปริมาณมหาศาลจากทางเหนือเข้าท่วมพื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่เศรษฐกิจ ในแทบทุกจังหวัดในพื้นที่ภาคกลาง รวมทั้งกรุงเทพมหานคร ทำให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจไม่น้อยกว่า 5 แสนล้านบาท การเกิดอุทกภัยใหญ่ถึงสามครั้งภายในเวลาเพียงห้าปี และขณะนี้มีการพูดถึงการแก้ปัญหาครั้งใหญ่ โดยจัดระบบการบริหารจัดการน้ำแบบบูรณาการ ได้แก่ การจัดการการระบายน้ำ การจัดระบบผังเมืองเพื่อรองรับการระบายน้ำได้ดี

รวมทั้งการมีระบบเตือนภัยที่แม่นยำ สำหรับพื้นที่ต่างๆ ในการอพยพชุมชนออกจากพื้นที่เสี่ยงภัย โดยเฉพาะพื้นที่ใกล้ภูเขา ซึ่งหากเกิดน้ำป่า หรือดินโคลนถล่ม จะก่อให้เกิดความสูญเสียกับชุมชนที่อยู่ปลายน้ำอย่างมาก ดังเช่นดินโคลนถล่มที่จังหวัดอุตรดิตถ์ ในปี พ.ศ. 2549 หรือเหตุการณ์น้ำป่าไหลทะลักท่วม 3 หมู่บ้าน ใน ตำบลน้ำไผ่ อำเภอน้ำปาด จังหวัดอุตรดิตถ์เมื่อเดือนกันยายน พ.ศ. 2553 ซึ่งเหตุการณ์ที่ยกตัวอย่างมาเป็นเพียงหนึ่งในหลายๆ เหตุการณ์ที่น้ำป่า และดินโคลนถล่มได้ก่อให้เกิดความสูญเสียให้กับชีวิตและทรัพย์สินมากที่สุดในช่วงห้าปีที่ผ่านมา จากการศึกษาของศูนย์เตรียมความพร้อมป้องกันภัยพิบัติแห่งเอเชีย (Asian Disaster Preparation Center, 2006) พบว่าหนึ่งในสาเหตุของความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์ดินถล่มในจังหวัดอุตรดิตถ์ในปี พ.ศ.2549 มาจากการไม่มีระบบเตือนภัยที่มีประสิทธิภาพ หลังเกิดเหตุการณ์ดินถล่มที่จังหวัดอุตรดิตถ์ ในปีพ.ศ.2549 ได้มีการจัดตั้งระบบเตือนภัยขึ้น มีทั้งการใช้แผนที่ความเสี่ยงร่วมกับการมีสถานีวัดปริมาณน้ำฝน และจัดตั้งเครือข่ายเฝ้าระวังภัย และการจัดตั้งสถานีสำหรับเตือนภัยล่วงหน้า (Early warning) ประกอบด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนอัตโนมัติ กระจายวัดปริมาณน้ำฝน เครื่องวัดความชื้นในดิน เครื่องวัดอุณหภูมิ ตัวอุปกรณ์ พร้อมทั้งมีการรายงานสถานะแบบปัจจุบัน (Real time) ผ่านหน้าข่าวสารในระบบ network (http://202.129.59.76/website/ews_all/index.php) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดหลายชนิด แต่มีเพียงปริมาณน้ำฝนสะสมที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดถูกนำมาใช้สำหรับการเตือนภัยในปัจจุบัน โดยปริมาณน้ำฝนที่วัดได้ในแต่ละสถานีจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์น้ำฝนสะสมวิกฤติคือ ค่าปริมาณน้ำฝนสะสมที่อยู่ระหว่าง 150 มิลลิเมตร ถึง 300 มิลลิเมตร สำหรับพื้นที่ทั่วทุกภาคของประเทศไทย เกณฑ์น้ำฝนวิกฤตินี้ได้มาจากปริมาณน้ำฝนสะสมที่สอดคล้องกับเกิดเหตุการณ์ดินถล่มในอดีต แต่ในเชิงวิศวกรรมแล้ว การเกิดดินถล่มนั้นจะสอดคล้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนและการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดิน กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินจากเหตุการณ์ฝนตกจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนและเสถียรภาพของลาดดิน ตามลำดับ โครงการวิจัยนี้จึงมีแนวทางที่จะเชื่อมโยงพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนและการเกิดดินถล่มเข้าด้วยกัน โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดดินผ่านการติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นในดินโดยละเอียดตามสถานีตรวจวัดเดิมที่ถูกจัดตั้งขึ้น พร้อมทั้งประเมินเสถียรภาพของลาดดินตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่ได้รับผ่านการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่ถูกเสนอขึ้นแล้วในอดีต และเสนอแนะแนวทางในการใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด รวมทั้งเสนอหลักการติดตั้งเครื่องวัดในตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการเตือนภัยดินถล่มอย่างแท้จริง เพื่อเป็นแนวทางในการเตรียมความพร้อมรับมือ เตือนภัย การเกิดดินถล่มในพื้นที่เสี่ยงภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่สอดคล้องกับเหตุการณ์ฝนตก
- 2) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดินตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน
- 3) เพื่อวางแผนทางในการติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเตือนภัยดินถล่มอย่างแท้จริง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนสู่ลาดดิน ผ่านการติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นอย่างละเอียดในสถานีตรวจวัดเดิมที่ถูกจัดตั้งขึ้น และนำผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่ได้รับไปร่วมวิเคราะห์เชิงทฤษฎี เพื่อประเมินเสถียรภาพของลาดดิน และวางแผนทางการในการติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับการเตือนภัยดินถล่มให้มีประสิทธิภาพ

1.4 ทฤษฎี สมมติฐานและกรอบแนวความคิดงานวิจัย

การวิบัติของลาดดินจะสอดคล้องกับการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนของดิน ภายใต้เหตุการณ์ฝนตก การซึมของน้ำฝนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ดังนั้น ความเข้าใจปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินและกลไกการวิบัติของลาดดินจึงเป็นสิ่งสำคัญเบื้องต้น สำหรับการพัฒนาระบบเตือนภัยดินถล่ม โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะนำไปสู่การเตือนภัยล่วงหน้าในการวิบัติของลาดดินได้แม่นยำขึ้น และช่วยลดความต่อความสูญเสียในชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่เสี่ยงภัยได้มากขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการศึกษาจะเป็นหลักการพื้นฐานทางวิชาการที่มีคุณค่า สามารถพัฒนาต่อยอดงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินได้ สำหรับในพื้นที่ศึกษาผลการศึกษาสามารถนำไปใช้ในการเตือนภัยได้จริง นอกจากนี้แนวทางการศึกษาจะสามารถนำไปใช้ในการวางแผนทางในการพัฒนาแผนที่เตือนภัยที่มีประสิทธิภาพต่อไป หน่วยงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่ องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับสาธารณภัยจากการวิบัติของลาดดิน

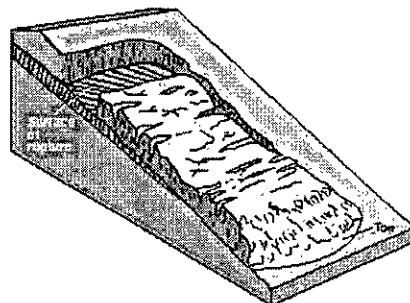
บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การเกิดดินโคลนถล่ม (Landslide) และดินไหล (Flow landslide) คือ การเคลื่อนที่ของมวลดินหรือหินลงมาตามลาดเขาด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งส่วนมากจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ภูเขาที่มีความลาดชันสูง ผลการศึกษาการแผ่กระจายของรอยดินถล่มในพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่มในประเทศไทย พบว่ารอยของดินถล่มมีลักษณะเกิดร่วมกันได้หลายแบบ และมักเกิดตามทางน้ำเดิมที่มีอยู่แล้วหรือบนร่องเล็ก ๆ บนลาดเขาที่น้ำมักไหลมารวมกันเมื่อมีฝนตก และมีความลาดชันสูงมากกว่าร้อยละ 30 (วรฤทธิ, 2535) และเมื่อพิจารณาเฉพาะจุดบนภูเขาสูงพบว่าบริเวณที่ชันดินหนาส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบ Debris avalanche และ Rotational slide ส่วนบริเวณที่ชันดินบางจะเป็นแบบ Translational slide เป็นส่วนใหญ่และจากการที่ดินถล่มในประเทศไทยเกิดรวมกับการที่มีฝนตกเป็นปริมาณที่สูงมาก ดังนั้น ชนิดของรอยดินถล่มโดยภาพรวมจึงเป็นแบบ Flows เป็นส่วนใหญ่ตะกอนดินทรายที่พังทลาย เนื่องจากดินถล่มก็จะถูกพัดพาโดยน้ำ ออกจากที่เกิดการถล่มลงไปสู่เบื้องล่าง ก่อนที่จะไหลลงมากองทับถมกันบริเวณที่ราบเชิงเขาในลักษณะของเนินตะกอนรูปพัดหน้าหุบเขาซึ่งเป็นรูปแบบของ Debris flow

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



รูปที่ 2.1 รูปแบบจำลองลักษณะของ Translational slide (L.M. Highland and P. Bobrowsky, 2008)

2.1.1 ปัจจัยการเกิดดินถล่ม

ดินถล่มที่เกิดขึ้นในประเทศไทยเกิดจากปัจจัยหลัก 4 ประการ ดังนี้คือ (สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม กรมทรัพยากรธรณี)

1) สภาพธรณีวิทยา โดยปกติชั้นดินที่เกิดการถล่มลงมาจากภูเขา เป็นชั้นดินที่เกิดจากการผุร่อนของหิน ให้เกิดเป็นดิน โดยหินแต่ละชนิดเวลาผุจะให้ชนิดและความหนาของดินที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากชั้นหินแต่ละชนิดมีอัตราการผุพังไม่เท่ากัน เช่น

- หินแกรนิต จะมีอัตราการผุพังสูง แร่องค์ประกอบเมื่อผุพังแล้วจะให้ชั้นดินทรายร่วน หรือ ดินทรายปนดินเหนียว และให้ชั้นดินหนา
- หินภูเขาไฟ มีอัตราการผุพังใกล้เคียงกับหินแกรนิต เมื่อผุพังให้ชั้นดินร่วนปนดินเหนียว
- ดินเหนียว และให้ชั้นดินหนาเช่นกัน
- หินดินดาน – หินโคลน เมื่อผุพังจะให้ชั้นดินเป็นดินเหนียวปนทราย และมีความหนาน้อยกว่าหินแกรนิต

จากปัจจัยดังกล่าว พบว่าดินที่ผุพังมาจากหินต่างชนิดกันจะให้ดินต่างชนิดกัน และชั้นดินมีความหนาต่างกัน คุณสมบัติของดินในการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินและค่าแรงต้านทานการไหลของดินก็จะแตกต่างกันตามชนิดของดินนั้นๆ ทำให้ไหลเข้ามีความลาดชันไม่เท่ากัน และต้นไม้ที่ขึ้นตามธรรมชาติบนภูเขาต่างชนิดกันตามชนิดของชั้นดินและความสูงของภูเขาด้วย นอกจากชนิดของหินแล้ว ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยา เช่น รอยเลื่อน รอยแตก และทิศทางการวางตัวของชั้นหิน จะมีผลต่อการผุพัง โดยเฉพาะหินที่มีรอยแตกมาก หินที่อยู่ในเขตรอยเลื่อนโดยเฉพาะรอยเลื่อนมีพลัง (Active fault) จะมีการผุพังสูง เนื่องจากมวลหินที่รอยแตกนั้นจะมีช่องว่างให้น้ำและอากาศผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาทางเคมีให้หินผุพังได้ง่าย ชั้นหินในบางบริเวณหากมีการแทรกดันของหินอัคนีแทรกซอน หรือบริเวณที่มีน้ำพุร้อน และแหล่งแร่จากสายน้ำแร่ร้อน จะทำให้หินมีอัตราการผุพังยิ่งขึ้นไปอีก เพราะความร้อนและสารละลายน้ำแร่ร้อนที่มาจากหินอัคนีแทรกซอนจะไปทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในเนื้อหิน

2) สภาพภูมิประเทศ ลักษณะภูมิประเทศเป็นผลที่เกิดจากขบวนการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลก การผุพังที่แตกต่างกันของชั้นหินและลักษณะการวางตัวของโครงสร้างชั้นหิน ซึ่งเป็นปัจจัยอีกตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของดินบนภูเขา ค่าความลาดชันจะมีความสัมพันธ์โดยตรง กับเสถียรภาพของดินที่อยู่บนภูเขา กล่าวคือ ยิ่งบริเวณใดที่มีความลาดชันสูง ยิ่งมีโอกาสที่ดินจะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพและเคลื่อนที่ลงมาตามลาดชันของภูเขาได้สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นดินทรายร่วนที่ไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินมีโอกาสจะถล่มลงมาได้สูงเมื่อฝนตกเข้ากับปัจจัยตัวอื่นๆ ซึ่งจากการศึกษาของวรวิทย์ ตันตวนิช (2535) ได้รายงานผลการศึกษาการเกิดดินถล่มที่บ้านกระทุงเหนือ อำเภอพิปูน

จังหวัดนครศรีธรรมราช เมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน 2531 พบว่ารอยดินถล่มส่วนมากพบอยู่ในบริเวณที่มีความลาดชันมากกว่า ร้อยละ 30 นอกจากนี้ ลักษณะภูมิประเทศที่เป็นร่องเขาหน้ารับน้ำฝนและเป็นบริเวณที่น้ำฝนไหลมารวมกันจะทำให้ปริมาณน้ำในมวลดินสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และทำให้บริเวณพื้นมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินลดลง มีโอกาสเกิดการเคลื่อนตัว และถล่มลงมาได้มากกว่าพื้นที่ที่ไม่ใช่ร่องเขาหน้ารับน้ำฝน

3) ปริมาณน้ำฝน ดินถล่มที่เคยเกิดขึ้นในประเทศไทย จะเกิดขึ้นเมื่อฝนตกหนักเป็นเวลานาน โดยน้ำฝนจะไหลซึมลงไปในพื้นที่ดินจนกระทั่งชั้นดินชุ่มน้ำ ไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้ เนื่องจากความดันของน้ำในดินเพิ่มขึ้น (Piezometric head) เป็นการเพิ่มความดันในช่องว่างของเม็ดดิน (Pore Pressure) ดันให้ดินมีการเคลื่อนที่ลงมาตามลาดเขาได้ง่ายขึ้น และนอกจากนี้แล้ว น้ำที่เข้าไปแทนที่ช่องว่างระหว่างเม็ดดินทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินลดน้อยลง ส่งผลให้ดินมีกำลังรับแรงต้านทานการไหลของดินลดลง ทำให้ความปลอดภัยของลาดดินลดลงไปด้วย (วรการ ไม้เรียงและคณะ, 2546) และถ้าหากปริมาณน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้นจนมวลดินอิ่มตัวไปด้วยน้ำ และระดับน้ำในชั้นดินสูงขึ้นมาที่ระดับผิวดินจะเกิดการไหลบนผิวดินและกัดเซาะหน้าดิน ความปลอดภัยของลาดดินจะลดลงไปครึ่งหนึ่งของสภาวะปกติ (Glawe, 2004) หมายความว่า ลาดดินเริ่มมีการเคลื่อนตัวตามระนาบของการเคลื่อนตัวของดิน และถ้าฝนตกต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานออกไป น้ำจะไหลลงไป ในระนาบของรอยการเคลื่อนตัวและเซาะล้างเม็ดดินที่เป็นดินเหนียวออกไปตามแนวระนาบ ทำให้ค่าแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินบริเวณระนาบการเคลื่อนตัวลดลงเป็นอย่างมาก เสถียรภาพลาดดินจะลดลงก่อให้เกิดดินถล่มลงมาตามความลาดชันของไหล่เขา จากการศึกษาข้อมูลปริมาณน้ำฝนรวมกันกับประชาชน ในพื้นที่หลายจังหวัด พบว่า ถ้าปริมาณน้ำฝนมากกว่า 90 มิลลิเมตร ในรอบ 24 ชั่วโมง จะเกิดน้ำป่าไหลหลาก และหากปริมาณน้ำฝนมากกว่า 150 มิลลิเมตร ชั้นดินบางแห่งอาจเกิดดินไหลหรือดินถล่ม นอกจากนี้ ปริมาณน้ำฝนที่ตกต่อเนื่องกันหลายวันสะสมมากกว่า 300 มิลลิเมตรบางแห่งอาจเกิดดินไหล หรือดินถล่มได้เช่นเดียวกัน

4) สภาพสิ่งแวดล้อม จากบันทึกเหตุการณ์ดินถล่มในอดีต พบว่าพื้นที่เกิดดินถล่มส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ภูเขาสูงชันและหลายๆ พื้นที่พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากรายงานของคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (2540) (อ้างถึงใน วรวิทย์ ตันตวินิช, 2548) พบพื้นที่ที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่มที่บ้านกระทุนเหนือมีการเปลี่ยนแปลงสภาพป่าเป็นสวนยางพารา โดยเฉพาะพวกต้นยางที่ยังมีขนาดเล็กอยู่ หรือที่บ้านน้ำก้อ บ้านน้ำขุนมีการบุกรุกทำลายป่าไม้เพื่อทำไร่และทำการเกษตรบนที่สูง จากการศึกษาของ Abe และ Twamoto (1986) (อ้างถึงใน วรวิทย์ ตันตวินิช, 2548) พบว่าดินที่มีรากไม้ยึดเกาะจะมีค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมากกว่าดินที่ไม่มีรากไม้ ซึ่งทำให้ค่ากำลังรับแรงต้านทานการไหลของดินมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากว่ารากพืชที่แทรกตัวในเนื้อดินจะแทรกซอนผ่านแนวระนาบเฉือนของพื้นราบซึ่งจะช่วยรับแรงดึงและ

ยึดโครงสร้างดิน ทำให้ดินมีค่ากำลังรับแรงต้านทานการไหลของดินสูงขึ้น จากการศึกษาของ กวี จรุงทวีเวทย์ (2546) พบว่า การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงต้านทานการไหลของดินจะมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับคุณสมบัติความหนาแน่นของรากพืช หมายความว่าชั้นดินที่มีรากพืชหนาแน่นมาก ค่ากำลังรับแรงต้านทานการไหลของดินจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และในการศึกษาเดียวกันนี้ ได้ทำการจำลองอิทธิพลของรากพืชต่อการเพิ่มเสถียรภาพพื้นลาด ที่ระนาบเฉือนความลึกแตกต่างกัน พบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยพื้นลาดที่มีรากพืชแทรกอยู่ต่อพื้นลาดที่ไม่มีรากพืชมีค่ามากกว่าพื้นลาดที่ไม่มีรากพืชและมีความมากที่สุดที่ระดับความลึกของระนาบเฉือน 0.0-0.5 เมตร และลดลงไปตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของรากพืชช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงต้านทานการไหลของมวลดินเฉพาะในส่วนที่รากไม้ยังลึกลงไปถึงเท่านั้น และมีความหนาแน่นมาก หากเกิดการเฉือนของระนาบอยู่ลึกลงไปมากกว่าชั้นดินที่รากไม้จะหยั่งถึง รากไม้นั้นก็ไม่มีส่วนช่วยใดๆ ในกำลังรับแรงต้านทานการไหลของดิน กำลังรับแรงต้านทานการไหลของดินทั้งหมดก็จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน และแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินของชนิดดินนั้นๆ ดังที่เราจะเห็นได้ว่าเมื่อมีเหตุการณ์ดินถล่มบางพื้นที่ที่เป็นป่าสมบูรณ์ ดินโคลนจะถล่มลงมาพร้อมต้นไม้ โดยการเลื่อนไถลของต้นไม้ซึ่งเคลื่อนที่ลงไปในขณะที่ลำต้นยังคงตั้งตรงอยู่ในแนวตั้ง นอกจากคุณสมบัติในการเพิ่มกำลังรับแรงต้านทานการไหลของดินแล้ว รากพืชยังมีส่วนในการดูดซึมเอาน้ำที่ไหลลงไปในดินให้มีปริมาณลดลงหรือชะลอการอัดตัวของดินอีกทางหนึ่ง

2.1.2 การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม

การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินถล่ม โดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลที่จัดเก็บในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) มาพิจารณาร่วมกัน อาจทำได้ 4 วิธี เรียงลำดับจากง่ายและรวดเร็ว แต่มีข้อผิดพลาดค่อนข้างสูงไปสู่วิธีที่พิถีพิถันใช้เวลานาน แต่มีความถูกต้องและเป็นประโยชน์มากกว่า ดังนี้ (วรกร, 2542)

1) วิธีทางธรณีฐาน (Geomorphology Method) โดยการวิเคราะห์จากลักษณะภูมิประเทศ ร่องน้ำและลาดเขา

2) วิธีดัชนีปัจจัยร่วม (Weighted Factor Index) โดยการนำปัจจัยที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์กระทำมาจัดจำแนกลำดับความรุนแรงและให้น้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยแล้วคิดออกมาเป็นแต้มคะแนนรวม เพื่อจัดลำดับความรุนแรงหรือโอกาสเสี่ยงในแต่ละพื้นที่ วิธีนี้ต้องปรับแก้ความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ให้เข้ากับเหตุการณ์ที่เคยเกิดขึ้น

3) วิธีทางธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering Method) โดยการสำรวจและทดสอบคุณสมบัติทางธรณีวิทยาและวิศวกรรมปฐพีของชั้นดินและหิน ร่วมกับอิทธิพลของความชื้นที่เปลี่ยนไป แล้ววิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินและหินจากรูปแบบทางกลศาสตร์เพื่อหาระดับความมั่นคง

4) วิธีการวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk Analysis Method) โดยการดำเนินการต่อจากวิธีที่ 2 และ 3 โดยการศึกษาทางสถิติของโอกาสที่จะเกิดการวิบัติและผลเสียหายทางด้านเศรษฐกิจและสังคมที่จะเกิดขึ้นตามมา

หลายหน่วยงานในประเทศไทย มีความพยายามที่จะศึกษาแผ่นดินถล่มเพื่อนำไปเตือนภัยหาทางแก้ไขป้องกัน หรือจัดแบ่งเขตการใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดผลกระทบจากแผ่นดินถล่มน้อยที่สุด ดังตัวอย่าง ได้แก่ กรมทรัพยากรธรณี (2544) ได้ศึกษาสาเหตุของเหตุการณ์พิบัติพื้นที่ตำบลน้ำก้อ-น้ำซุน จังหวัดเพชรบูรณ์ จากปัจจัยต่าง ๆ อันได้แก่ สภาพธรณีวิทยา ความลาดชัน ปริมาณน้ำฝน สภาพการใช้ที่ดิน ซึ่งพบว่าโคลนดินถล่มเกิดขึ้นจากสภาพธรณีวิทยาที่เอื้ออำนวย หินมีการผุพังสูง พื้นที่ป่าปกคลุมอยู่น้อย โดยมีปริมาณฝนตกมากกว่าปกติเป็นปัจจัยเร่งให้เกิดดินถล่ม

การวิเคราะห์นั้นนอกเหนือจากการใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกำลังของดินแล้ว ในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์มากขึ้น เนื่องจากการรวมผลกระทบที่ตอบสนองต่อปัจจัยกระตุ้นทางอุทกวิทยา ประกอบด้วยความชื้นผืนและอัตราการระเหย เข้าร่วมด้วย กล่าวคือ จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำและความชื้นในลาดดินตามกระบวนการทางอุทกวิทยาเกิดขึ้น อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินแต่ละชนิดและเวลาที่ตอบสนองด้วย เช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำวิธีอื่นๆ ก็ต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาปัจจัยทางอุทกวิทยาที่ตอบสนองต่อลาดดินที่ดินมีคุณสมบัติต่างกันให้ชัดเจน เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น รวมถึงระยะเวลาที่ลาดดินมีโอกาสดังกล่าวการวิบัติ ตลอดจนวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของดัชนีการซึมกับความลึกของระนาบการวิบัติแบบตื้นของลาดดินธรรมชาติ เพื่อประเมินตำแหน่งของการติดตั้งสัญญาณเตือนภัยต่อไป

2.1.3 คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำในดิน

2.1.3.1 ความชื้นดิน (Soil moisture)

ความชื้นดิน หมายถึง น้ำทั้งที่อยู่ในสถานะของเหลวและไอน้ำในดิน ส่วนคำว่าน้ำในดิน (Soil water) หมายถึง เฉพาะน้ำในสถานะของเหลวในดิน ตามปกติความชื้นในดินจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนและอัตราการระเหยของน้ำ และขึ้นอยู่กับความจุน้ำของดิน (Field of capacity of water) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของเนื้อดิน เช่น ดินทรายจะมีความจุน้ำของดินต่ำสุด ส่วนดินเหนียวจะมีความจุน้ำสูงสุด ทั้งนี้เนื้อดินที่มีความหยาบจะยอมให้น้ำผ่านได้ง่ายกว่าเนื้อดินที่ละเอียด การแสดงปริมาณความชื้นดินโดยน้ำหนักเป็นการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักของความชื้นในดินกับน้ำหนักของดินอบแห้ง วิธีที่ง่ายและตรงที่สุดที่จะหาน้ำหนักของความชื้นและน้ำหนักดินอบแห้งคือ การชั่งน้ำหนักดินขณะชื้นและหลังอบแห้ง ความแตกต่างของ

น้ำหนักที่ได้จากการชั่งทั้งสองครั้งนี้คือ น้ำหนักความชื้นดิน น้ำหนักดินอบแห้งคือ น้ำหนักดินที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 95-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนมีน้ำหนักคงที่ ปริมาณความชื้นดินโดยน้ำหนัก สามารถแสดงเป็นสัดส่วนของน้ำหนักความชื้นต่อน้ำหนักดินอบแห้งโดยตรง เช่น กรัม/กรัม อาจแสดงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (Gravimetric moisture content, w) ก็ได้ร้อยละโดยน้ำหนักคือ สัดส่วนของน้ำหนักความชื้นคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักดินอบแห้ง

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

เมื่อ w คือ ความชื้นดินโดยน้ำหนัก, %

W_w คือ น้ำหนักน้ำ

W_s คือ น้ำหนักดินแห้ง

นอกจากจะคิดความชื้นดินโดยน้ำหนักแล้ว ยังสามารถคิดเป็นร้อยละของปริมาตรน้ำได้ด้วยเรียกว่า ความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric moisture content, θ) หมายถึง ปริมาตรน้ำที่มีอยู่ในดินต่อปริมาตรทั้งหมดของดิน ซึ่งตัวอย่างดินที่นำมาหาความชื้นโดยปริมาตรเป็นตัวอย่างชุดเดียวกันกับตัวอย่างดินที่ใช้หาความชื้นโดยน้ำหนัก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 (Scott, 2000)

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \times 100 = w \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (2.2)$$

เมื่อ θ คือ ความชื้นดินโดยปริมาตร, %

V_w คือ ปริมาตรน้ำ

V_t คือ ปริมาตรทั้งหมดของตัวอย่างดิน

γ_d คือ หน่วยน้ำหนักของดินรวม

γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ

2.1.3.2 การวัดความชื้นในดิน

การวัดความชื้นโดยปริมาตรยังสามารถวัดด้วยอุปกรณ์วัดความชื้น (Sensor) ได้อีกทางหนึ่งซึ่งเป็นวิธีวัดค่าความชื้นทางไฟฟ้า (Electrical method) ด้วยการวัดค่า Dielectric constant และยังแบ่งวิธีการหาความชื้นออกเป็น 3 วิธีคือ (1) Time Domain Reflectometer method : TDR (2) Frequency Domain Reflectometer method : FDR และ (3) Amplitude

Domain Reflectometer method : ADR แสดงผลออกมาเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Topp et al., 1980) ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นให้สามารถวัดค่าความเค็มของดินพร้อมกับวัดค่าความชื้น โดยการแปลงค่า Dielectric constant เป็นค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) เพราะค่าความเค็มของดินแสดงในรูปของค่าการนำไฟฟ้า ค่าความเค็มมีหน่วยเป็น เดซิซีเมนต่อเมตร (dS/m) แต่อย่างไรก็ตามการวัดความชื้นของดินภายใต้เงื่อนไขที่มีความเค็ม หัววัดมักจะถูกจำกัดด้วยชนิดของดิน ปริมาณความเค็ม และความหนาแน่นของดิน ดังนั้น เมื่อใช้หัววัดความชื้นในการวัดความชื้นของดินจำเป็นจะต้องสอบเทียบอุปกรณ์ก่อน เพราะความเค็มจะทำให้ค่าความชื้นที่วัดได้มีปริมาณมากเกินไปจนไม่เป็นจริง (Inoue et al., 2008)

2.1.3.3 แรงดึงดูดน้ำในดิน (Soil suction or Total suction, Ψ)

แรงดึงดูดน้ำในดินคือ แรงดูดยึดที่ดินมีกับน้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความชื้นในดินลดลงและเมื่อช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีขนาดเล็กลงน้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ได้สภาวะแรงดึงดูดที่เรียกว่า แรงดึงดูดเมทริก หรือ แรงคาพิลลารี (Matric or Capillary suction, $(u_a - u_w)$) และแรงดึงดูดออสโมติก (Osmotic suction, π) คือ ความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองของดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินด้วย โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมากความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองจะได้มากกว่าด้วย (Fredlund and Rahardjo, 1993) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3 โดยที่ u_a คือ แรงดันอากาศในช่องว่างดิน และ u_w คือ แรงดันน้ำในดิน

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

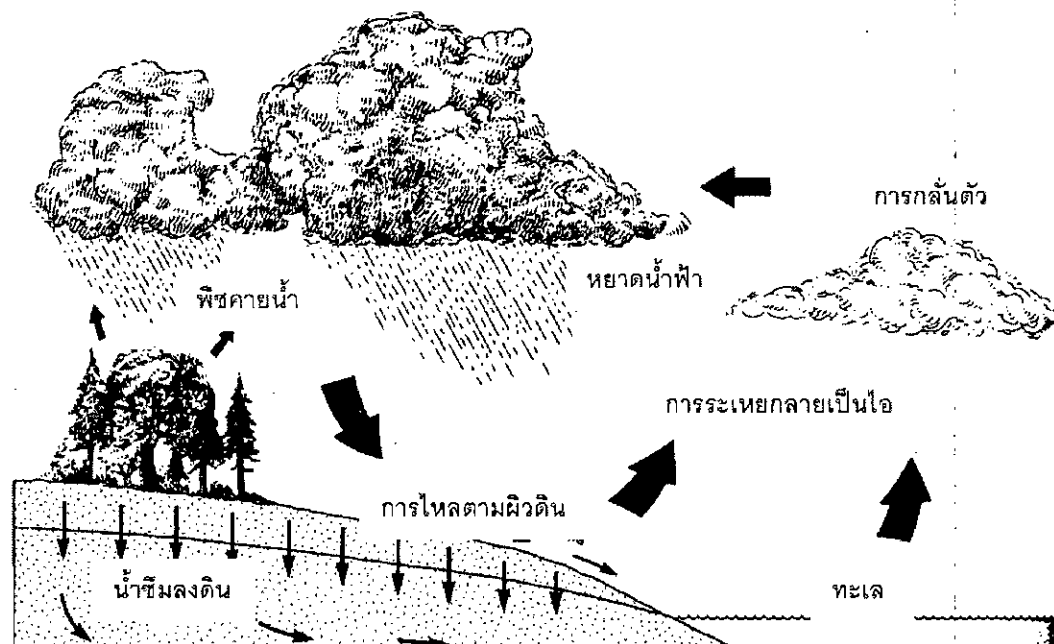
แรงดึงดูดเมทริกหรือแรงคาพิลลารีสามารถหาได้ด้วยการใช้หม้อแรงดัน (Pressure plate) ตามมาตรฐาน ASTM D6836-02 ทดสอบหาค่าแรงคาพิลลารี เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงดึงดูดเมทริกหรือแรงคาพิลลารี (Soil Water Characteristic Curve : SWCC)

2.1.3.4 สมดุลความชื้น

การซึมของน้ำ (Infiltration) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายนอกผิวดินเข้าสู่ดินทางผิวดิน ดังจะเห็นได้จากการให้น้ำโดยระบบชลประทานหรือการที่ฝนตก น้ำเหล่านี้ไหลซึมลงไปในดินด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก โดยสิ่งที่มีอิทธิพลต่อการซึมลงดินสามารถสรุปได้ ดังนี้ (1) อัตราการตกของน้ำฝน น้ำชลประทาน หรือความลึกของน้ำที่ขังบนผิวดิน (2) ความสามารถในการรับน้ำของดิน (3) ปริมาณความชื้นในดินขณะเริ่มต้น (4) ความลาดชันและความขรุขระของ

ผิวดิน (5) คุณสมบัติทางเคมีของดิน และ (6) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำ อัตราการซึมของน้ำในดินขึ้นอยู่กับระดับความชื้นของดิน ลักษณะโครงสร้างของเนื้อดินและผิวดิน อัตราการขยายตัวของแร่ดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุในดินและเสถียรภาพของโครงสร้างดิน

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



รูปที่ 2.2 วัฏจักรของน้ำ (Water cycle)

2.1.3.5 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน (Theory of soil water flow)

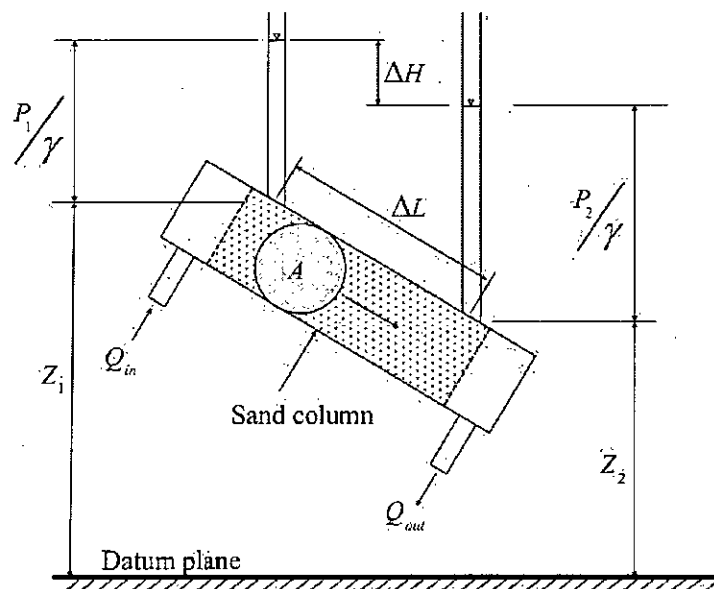
ในส่วนนี้ประกอบไปด้วย สมการดาร์ซี-บัคกิงแฮม (Darcy-buckingham equation) ซึ่งอธิบายถึงหลักการการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านวัตถุพรุน โดยพิจารณาผลของค่าความแตกต่างเขตของน้ำเทียบกับระยะการเคลื่อนที่ผ่านวัตถุพรุน ในปี ค.ศ.1856 จากการทดลองให้น้ำผ่านทรายดังรูปที่ 2.3 พบว่าอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ (Q) มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ

พื้นที่หน้าตัดของการเคลื่อนที่ (A) และค่าแตกต่างระหว่างเฮดของน้ำที่บริเวณเข้าและออก (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

$$q = -K_u i \quad (2.6)$$

เมื่อ i คือ เกรเดียนต์ชลศาสตร์ ($\Delta H / \Delta L$) และ K_u คือสภาพนำชลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัว
ด้วยน้ำซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้นของดิน (θ) หรือเฮดแรงดัน (h_p) เขียนได้เป็น

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

หรือ

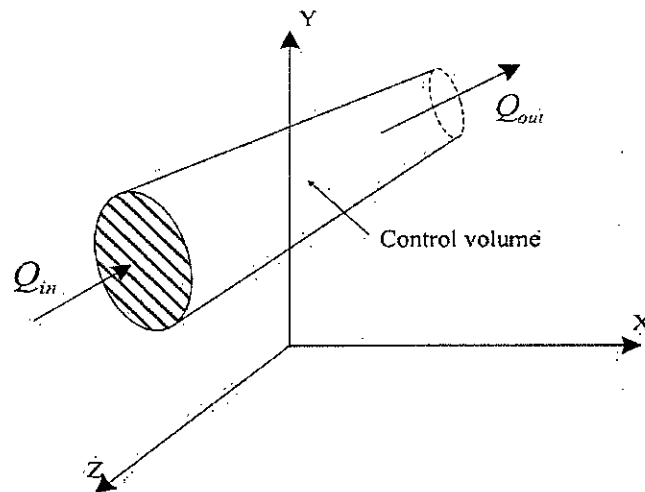
$$K_u = K(h_p) \quad (2.8)$$

สมการริชาร์ดส์ (Richards equation) จากกฎทรงมวลซึ่งกล่าวว่าสสารย่อมไม่สูญหายนั้นในปริมาตร
ควบคุม (Control volume) อัตราไหล่เข้าของมวลน้ำลบด้วยอัตราการไหล่ออกต้องเท่ากับอัตรา
การเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุม ถ้าพิจารณาว่ามวลนี้คือ น้ำซึ่งเป็นของเหลวที่กดอัดไม่ได้
(Incompressible fluid) พิจารณาปริมาตรแทนมวล ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังรูปที่ 2.4 ในช่วง
ระยะเวลา Δt สมการริชาร์ดส์เป็นสมการสำหรับการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางพรุนหรือดินที่ไม่อิ่มตัว
ด้วยน้ำเมื่ออยู่ในสถานะไม่คงตัว (Unsteady flow) และเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial
differential equation) ลำดับที่สอง (Second-order) แบบพาราโบลา (Parabolic) ไม่เป็นเชิงเส้น
(Nonlinear) เมื่อเขียนในรูปการไหลใน 3 มิติจะได้

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

เมื่อ K คือ ฟังก์ชันของความชื้นหรือเฮดความดัน

H คือ เฮดทางชลศาสตร์



รูปที่ 2.4 อัตราการไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม (ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)

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

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

เมื่อ S_e คือ ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล (Effective degree of saturation)

θ_r คือ ความชื้นเชิงปริมาตรที่สภาวะหยุดนิ่ง (Residual volumetric moisture content)

θ_{sat} คือ ความชื้นเชิงปริมาตรที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated volumetric moisture content)

α คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่บ่งบอกค่าแรงดันน้ำ ณ จุดที่อากาศเริ่มเข้าไปในมวลดิน (Air-Entry pressure)

n คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่บ่งบอกอัตราการลดลงของความชื้นเชิงปริมาตรกับแรงดึงน้ำ หลังจากที่อากาศเริ่มเข้าไปในมวลดิน

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

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

เมื่อ k_s คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในมวลดินที่สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยปกติดินถล่มที่เกิดขึ้นในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีปริมาณน้ำฝนเป็นตัวกระตุ้นหลัก โดยน้ำจะมีการซึมผ่าน (Infiltration) ลงสู่ลาดดิน เมื่อความชื้นในมวลดินสูงขึ้น จากทฤษฎีของหน่วยแรงประสิทธิผลจะพบว่าความแข็งแรงของดินจะลดลงตามความชื้นในมวลดินที่เพิ่มขึ้นและน้ำเป็นตัวที่ทำให้คุณสมบัติของดินที่มีสถานะเป็นของแข็งสามารถเปลี่ยนไปเป็นของไหลได้ ดังนั้น สิ่งจำเป็นที่จะต้องพิจารณาเมื่อทำการศึกษาปัญหาการเกิดดินโคลนถล่มคือ กระบวนการทางอุทกวิทยา และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของดินระหว่างการเกิดกระบวนการทางอุทกวิทยา

2.2.1 เสถียรภาพของลาดดินภายใต้กระบวนการอุทกวิทยา

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินได้มีการศึกษาต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลายาวนานและมีวิธีการวิเคราะห์หลายวิธี เช่น Slope stability charts โดย Janbu (1968) และ Duncan 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 วิธีวิเคราะห์ที่กล่าวมาเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่เรียกว่า Limit equilibrium method การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะมีการกำหนดระนาบวิบัติ (Failure plane) สมมติของลาดดินแตกต่างกันออกไปและการวิเคราะห์ทุกวิธีจะมีการประเมินเสถียรภาพของลาดดินเป็นค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, FS) ดังต่อไปนี้

$$FS = \frac{\tau_R}{\tau_M} \quad (2.12)$$

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 Nicotera (2012) ได้ทำการวิจัยและศึกษากลไกของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ในเหตุการณ์ดินโคลนถล่มที่มีการวิบัติแบบการไหล หรือที่เรียกว่า ดินไหล (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 ส่งผลให้เกิดการลดลงของหน่วยแรงประสิทธิภาพในมวลดิน จนกระทั่งสถานะของหน่วยแรงเข้าสู่สถานะวิบัติและภายหลังสถานะวิบัติ หากน้ำไม่สามารถระบายออกจากลาดดิน หรืออยู่ในสภาวะแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained conditions) จะมีการพัฒนาจากสถานะวิบัติไปสู่การเกิดการวิบัติแบบไหลหรือดินไหล มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาเกี่ยวกับการวิบัติแบบไหลของลาดดิน ทั้งในแบบจำลองทางกายภาพ (Physical model) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical model) เพราะเป็นสถานะการวิบัติที่เกิดร่วมกับการไหลของน้ำฝน เช่น งานวิจัยของ Cascini et al., (2008) และ Huang et al., (2008) เป็นต้น

การสไลด์ลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่ (Translational slides) เป็นการสไลด์ลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่มีลักษณะค่อนข้างตรงและขนานกับลาดของผิวดิน ส่วนใหญ่เป็นการเคลื่อนที่ตามระนาบของโครงสร้างทางธรณีวิทยา การวิบัตินี้จะวิบัติในระดับตื้นถึงแม้ว่าชั้นดินจะมีความหนาหรือลึกก็ตาม 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 วิธีวิเคราะห์นี้จะเป็นการประเมินเสถียรภาพของลาดดินตามสมการ (2.13) ดังนี้

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

เมื่อ σ'_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 ดังนั้น กำลังรับแรงเฉือนของดิน (τ_R) จึงต้องพิจารณาเป็นกำลังรับแรงเฉือนในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และสามารถพิจารณาตาม Bishop (1959) ได้เสนอให้มีการใช้หน่วยแรงประสิทธิผล (Bishop's Effective Stress, σ') สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนี้

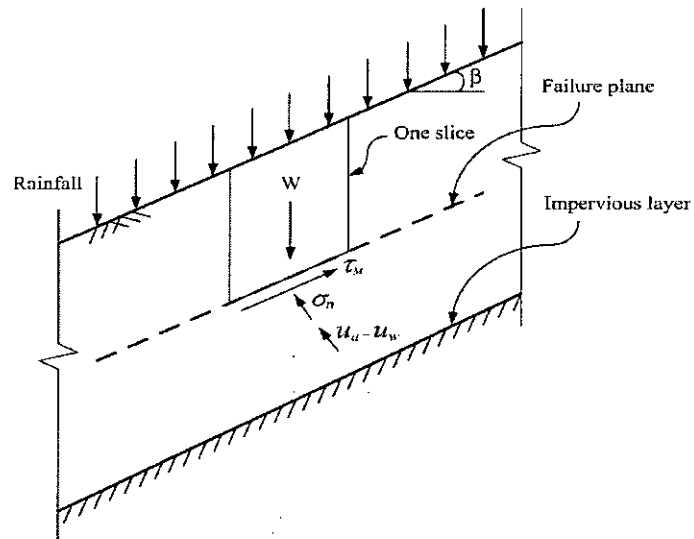
$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.14)$$

เมื่อ σ คือ หน่วยแรงรวม (Total stress)

u_a คือ แรงดันอากาศในช่องว่างเม็ดดิน (Air pressure)

u_w คือ แรงดันน้ำในช่องว่างเม็ดดิน (Water pressure)

χ คือ ค่าคงตัวของ Bishop จะสัมพันธ์กับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation) หรือความชื้น (Moisture content) ในมวลดิน



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์แบบลาดอนันต์ (Infinite slope)

ดังนั้น อัตราส่วนความปลอดภัยในลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะเป็นดังนี้

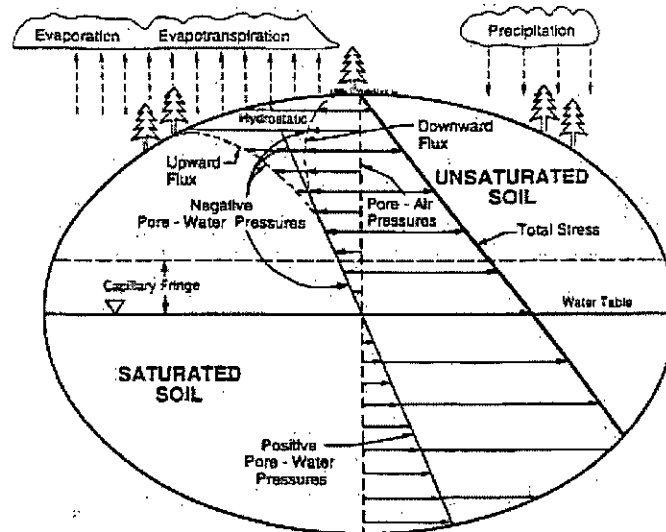
$$FS = \frac{c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi'}{\tau_M} \quad (2.15)$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแบบลาดอนันต์ตามสมการ (2.15) นอกจากการใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกำลังของดินแล้ว จะเห็นได้ว่าในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์มากขึ้น เนื่องจากการรวมผลกระทบที่เป็นปัจจัยกระตุ้นทางอุทกวิทยา ประกอบด้วย ความชื้นฝนและอัตราการระเหยเข้าร่วมด้วยกล่าวคือ ในเทอมของ $\chi(u_a - u_w)$ ซึ่งเป็นเทอมที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำและความชื้นในลาดดินจะเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการทางอุทกวิทยา อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินแต่ละชนิดและเวลา ที่ตอบสนองด้วย เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำวิธีอื่นๆ ดังนั้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาถึงกระบวนการทางอุทกวิทยาที่ตอบสนองต่อลาดดิน เพื่อให้มีความชัดเจนในการทำนายเหตุการณ์ดินโคลนถล่มได้อย่างแม่นยำและนำไปสู่ระบบการเตือนภัยดินโคลนถล่มที่ช่วยลดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินได้มากยิ่งขึ้น

2.2.2 การตอบสนองของลาดดินต่อกระบวนการทางอุทกวิทยา

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

Fredlund (1996) ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำตามความลึกของชั้นดินที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอัตราน้ำเข้า-ออก (Water flux) บริเวณผิวดินที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพทางอุทกวิทยา ดังรูปที่ 2.6 เมื่อชั้นดินถูกแบ่งออกเป็นสองโซนคือ ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) จะอยู่เหนือจากระดับน้ำใต้ดินและชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) ที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (Equilibrium) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราน้ำเข้า-ออกบริเวณผิวดิน แรงดันน้ำตลอดชั้นดินจะเป็นแรงดันน้ำสถิตย (Hydrostatic pressure) ซึ่งเป็นสภาวะเริ่มต้น (Initial condition) ของแรงดันน้ำในชั้นดิน ภายใต้สภาวะนี้ในโซนอิ่มตัวด้วยน้ำแรงดันน้ำจะมีค่าเป็นบวก ในขณะที่โซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีค่าเป็นลบ หลังจากนั้นเมื่อมีการไหลจากน้ำฝนซึมลงสู่ชั้นดิน ในโซนดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในชั้นดิน ในทางกลับกันหากอัตราน้ำเข้า-ออกบริเวณผิวดินเท่ากับอัตราการระเหยจะทำให้ชั้นดินในโซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีแรงดึงน้ำเพิ่มขึ้น จากการเปลี่ยนแรงดันน้ำดังกล่าว จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราน้ำเข้า-ออกที่ผิวดิน ภายในชั้นดินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำจากสภาวะเริ่มต้นซึ่งเป็นสภาวะสมดุล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดินตามไปด้วย โดยเฉพาะในช่วงที่เกิดฝนเพราะทำให้แรงดันน้ำเพิ่มขึ้นในโซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและเป็นการเปลี่ยนแปลงภายใต้ระยะเวลาอันสั้น ดังนั้น จึงเรียกได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำภายใต้สภาวะการซึมแบบไม่คงที่ขึ้นกับเวลา (Transient seepage) สอดคล้องกับเหตุการณ์ดินโคลนถล่มที่จะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างพายุฝน หรือหลังจากพายุฝนไม่นาน การวิเคราะห์การซึมแบบไม่คงที่ขึ้นกับเวลา ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน และแรงดันน้ำที่สัมพันธ์กับทั้งการเปลี่ยนแปลงเวลาและความหนาแน่นดินด้วย ซึ่งสามารถนำไปรวมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินวิธีต่างๆ 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)

2.2.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการณ์การซึมน้ำภายในลาดดิน

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

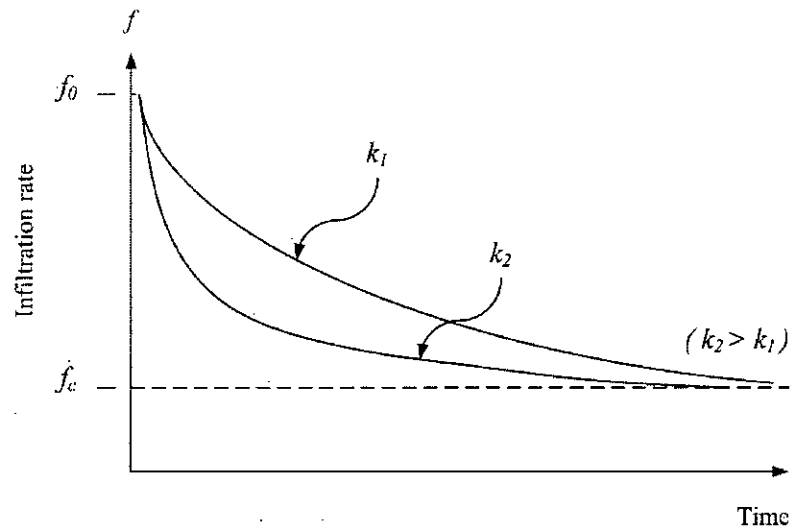
ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการณ์การซึมน้ำในลาดดินสามารถแบ่งได้เป็น 4 ปัจจัยหลัก คือ 1) ปัจจัยทางด้านรูปร่างของลาดดิน (Geometry), 2) ปัจจัยที่เกิดจากคุณสมบัติของดินแต่ละชนิดภายในลาดดิน (Internal factors), 3) ปัจจัยกระตุ้นภายนอก (External factors), และ 4) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต (Initial and boundary conditions) จากการศึกษาทั้ง 4 ปัจจัย พบว่าปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ ปัจจัยกระตุ้นภายนอกที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางอุทกวิทยา คือ ความเข้มของปริมาณฝนในพื้นที่ (Rainfall intensity) ช่วงเวลาในการเกิดพายุฝนตก (Rainfall duration) อัตราการระเหย (Evaporation rate) เป็นต้น ถ้าหากปราศจากปัจจัยเหล่านี้ ปัญหาที่มีความรุนแรงอย่างดินโคลนถล่มและน้ำหลากคงไม่มีทางเกิดขึ้นได้อีกทั้งงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้ทำการศึกษามานั้นยังไม่ค่อยพบงานวิจัยใดที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยเหล่านี้

อย่างแน่ชัด เป็นเพียงการนำเอาปัจจัยมาแสดงให้เห็นถึงผลกระทบ ผ่านผลที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและวิธีคำนวณเชิงวิเคราะห์เท่านั้น

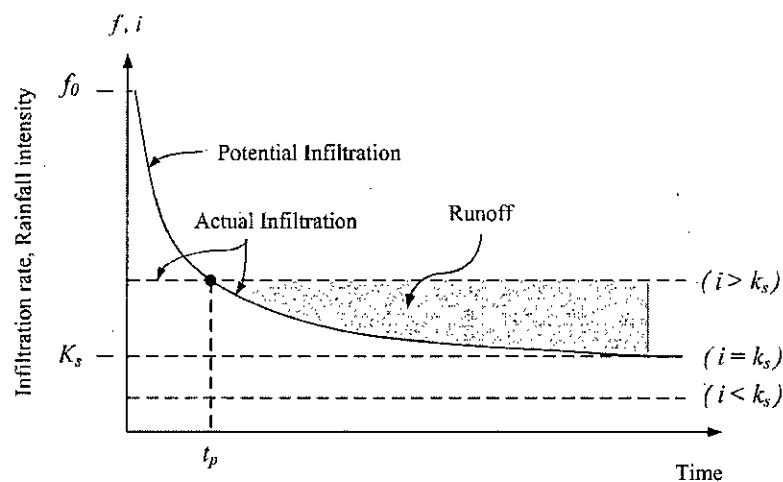
2.2.4 ปัจจัยกระตุ้นภายนอกที่ส่งผลต่อการวิบัติในลาดดินธรรมชาติ

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) และการระเหยซึ่งกระบวนการย่อยเหล่านี้ถือเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก การที่จะศึกษาปัจจัยกระตุ้นภายนอกจึงควรคำนึงถึงปัจจัยย่อยเหล่านี้ด้วยเช่นกัน

Horton (1933) ทำการศึกษารวบรวมและได้เสนอแบบจำลองอย่างง่ายในการอธิบายความสามารถในการซึมน้ำของดินกับเวลา ดังรูปที่ 2.7 โดยความสามารถในการซึม (f) ของดินจะลดลงตามระยะเวลาที่เกิดฝน จากความสามารถในการซึมเริ่มต้น (f_0) จนกระทั่งมีค่าคงที่เมื่อความสามารถในการซึมมีค่าใกล้เคียงกับความสามารถในการซึมสุดท้ายของดิน (f_c) สามารถประมาณให้มีค่าเท่ากับค่าการนำทางชลศาสตร์ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Hydraulic Conductivity, K_s) โดย Green and Ampt (1911) และ Philip (1957) จากแบบจำลองการซึมข้างต้น สามารถใช้แยกฝนที่ตกลงสู่พื้นดินออกเป็นกรซึมและการไหลบนผิวดิน ดังรูปที่ 2.8 สมมติให้ความเข้มฝน (i) มีค่าคงที่ เมื่อฝนตกที่เวลาดำกว่า t_p ความสามารถในการซึมของดินจะมีค่าเท่ากับความเร็วซึมในขณะนั้น เมื่อเวลาในการตกของฝนมีค่ามากกว่า t_p ความเข้มฝนจะสูงกว่าความสามารถในการซึมของดิน จึงทำให้เกิดการไหลบนผิวดินขึ้น ซึ่งจุดที่เวลาฝนตกมีค่าเท่ากับ t_p จะเรียกว่าเวลาที่เกิดน้ำขัง (Ponding time) ในขณะเดียวกันหากความเข้มฝนมีค่าต่ำกว่าความสามารถในการซึมสุดท้ายของดิน จะไม่มีการไหลบนผิวดินเกิดขึ้น



รูปที่ 2.7 แบบจำลองการซึม (Philip, 1957)

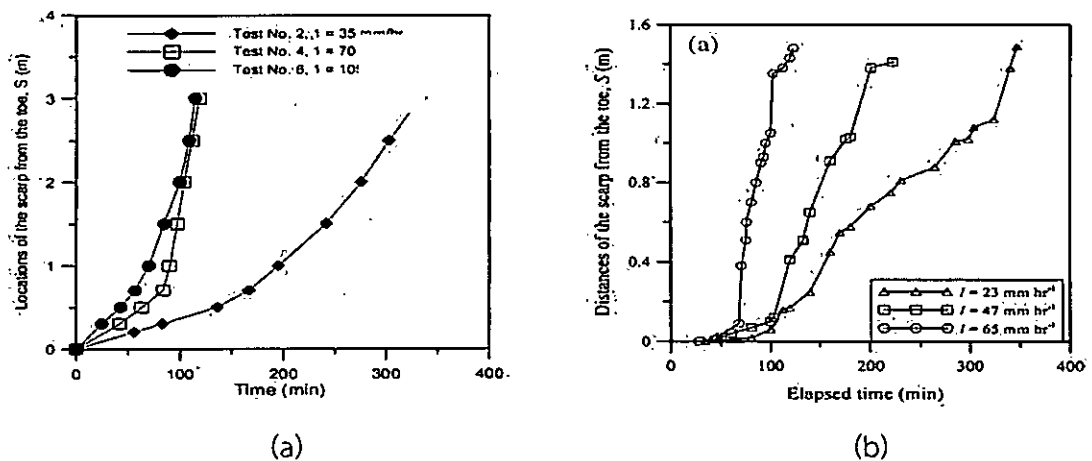


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมและการไหลผิวดิน

จากหลักการแยกความสามารถในการซึมและการไหลบนผิวดิน ในการศึกษาผลกระทบจากการตอบสนองของลาดดินต่อปริมาณน้ำฝนด้วยแบบจำลองการซึม จะมีการเปลี่ยนความชื้นผืน คือ ความชื้นผืนต่ำกว่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านได้ของดิน ($i < k_s$) ความชื้นผืนประมาณเท่ากับหรือใกล้เคียงสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ($i = k_s$) และความชื้นสูงกว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน ($i > k_s$) ซึ่งจะทำให้ทราบอิทธิพลของความชื้นผืนในช่วงเวลาการเกิดฝนทั้งการซึมและการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 2.11 แสดงการวิบัติของลาดดินทราย (a) ในช่วงแรกเกิดขึ้นที่ปลายลาดดิน
(b) ในช่วงที่สองเกิดขึ้นที่ตอนกลางของลาดดิน (Huang et al., 2010)



รูปที่ 2.12 แสดงช่วงเวลาการวิบัติของลาดดิน (a) ลาดดินตะกอนปนทราย (Huang et al., 2009)
(b) ลาดดินทราย (Huang et al., 2010)

Lee (2011) ทำการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อน้ำฝนของลาดดิน โดยการจำลองลาดดินแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ แสดงในรูป 2.13 เพื่อสังเกตการณ์การซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดดินแล้ววัดค่าแรงดึงน้ำ (Suction) เปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองทั้งสองแบบ ซึ่งพบว่า ผลการทดสอบของทั้งสองแบบให้ผลการทดสอบที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และได้ศึกษาผลของช่วงเวลารับน้ำฝนต่อค่าแรงดันน้ำในลาดดินที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง โดยใช้ดินที่มีความแตกต่างกันใน

การทดสอบ ผลที่ได้คือ พบว่าที่ 1 ชั่วโมง มีค่าแรงดันน้ำน้อยกว่าที่ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.15 นอกจากนี้ ยังสังเกตและพบว่า การซึมของน้ำฝนในลาดดินที่ชั้นดินมีคุณสมบัติแตกต่างกัน เมื่อดินชั้นล่างมีการซึมผ่านน้อยกว่าชั้นบน เมื่อเกิดการซึมถึงช่วงเวลาหนึ่งแล้ว น้ำที่ซึมลงสู่ลาดดินชั้นล่างบางส่วนจะเกิดการไหลไปตามระนาบของรอยระหว่างชั้นดิน

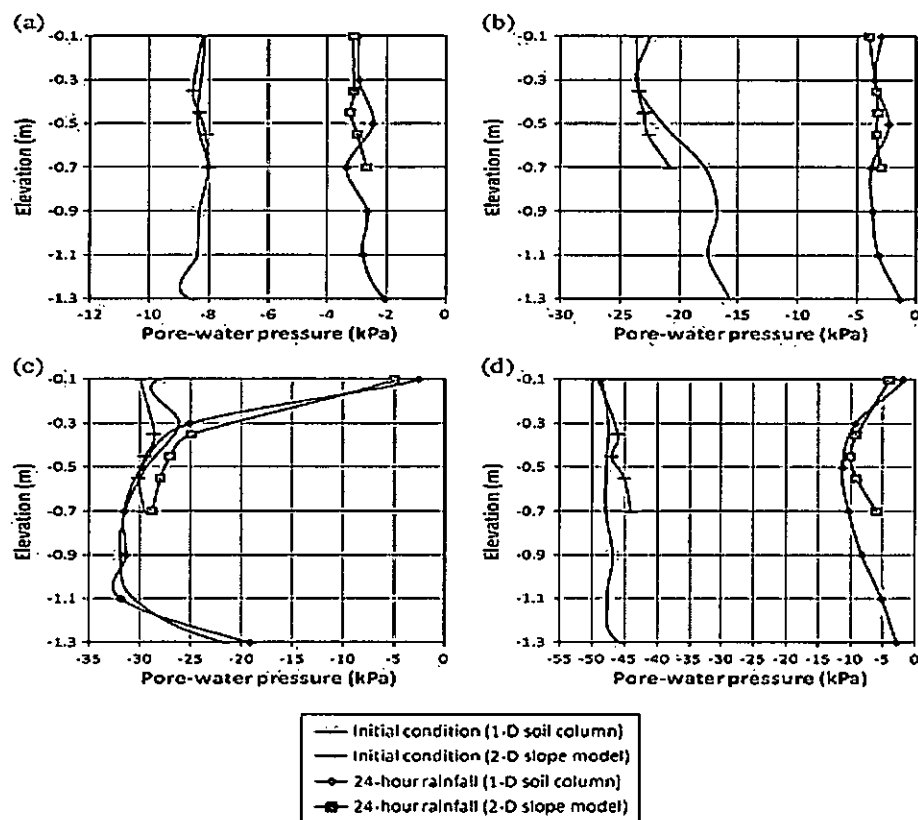


(a)

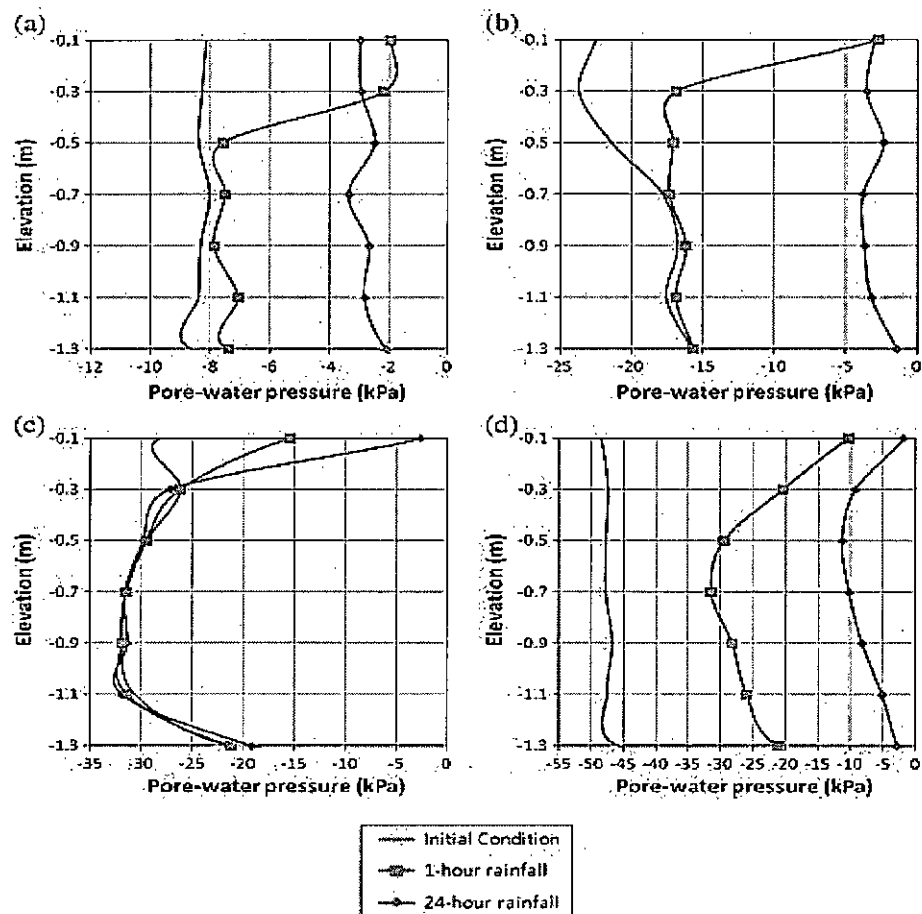


(b)

รูปที่ 2.13 แบบจำลองลาดดิน (a) แบบ 1 เมตร และ (b) แบบ 2 เมตร (Lee, 2011)



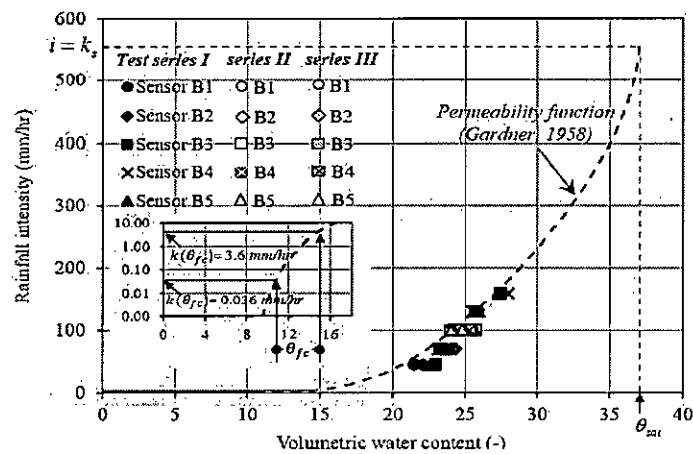
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงค่าแรงดันน้ำตามความลึกของดินในแบบจำลอง 1 เมตรและ 2 เมตร (Lee, 2011)



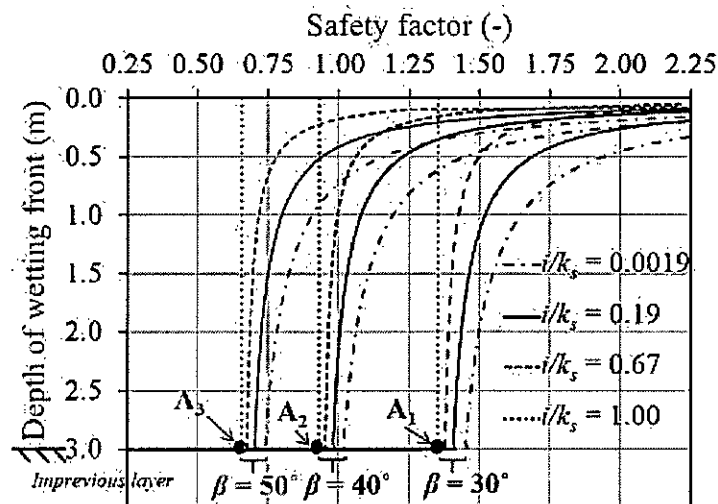
รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำกับความลึกของดินระยะเวลาของน้ำฝนที่ 1 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงของลาดดิน (Lee, 2011)

Chinkulkijniwat et al., (2016) ทำการวิจัยและศึกษาการตอบสนองทางกายภาพและอุทกวิทยาของลาดดินตื้นด้วยแบบจำลองทางกายภาพการซึมในสองมิติ ภายใต้สภาวะรับน้ำฝนในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบเตือนภัย ในงานวิจัยได้ใช้ดินทรายในการทดสอบจากการศึกษาพบว่า การตอบสนองของลาดดินแบ่งออกเป็นสองเฟส คือ เฟสการซึม และเฟสการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ในระหว่างช่วงเฟสการซึมช่วงเวลาที่เท่ากันปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของความชื้นฝน ดังแสดงในภาพที่ 2.16 แต่จะไม่ขึ้นกับค่าความชื้นของลาดดินและปริมาณความชื้นเริ่มต้น อิทธิพลของความชื้นฝนมีผลต่อปริมาณความชื้นทั้งสองเฟส ซึ่งการวิบัติของลาดดินตื้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน คือ 1) วิบัติตามแนวชั้นที่บ้น้ำ 2) วิบัติไถ่ๆ ผิวลาดดิน และ 3) วิบัติที่ความลึกใดๆ ระหว่างชั้นที่บ้น้ำจนถึงผิวลาดดิน การวิบัติของลาดดินตื้นที่มีความชื้นสูงอาจเกิดขึ้นในช่วงเฟสการซึม ขณะที่ลาดดินที่มีความชื้นต่ำอาจจะเกิดการวิบัติที่เฟสการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ลาดดินที่มีความชื้นสูงตำแหน่งของระนาบวิบัติสามารถ

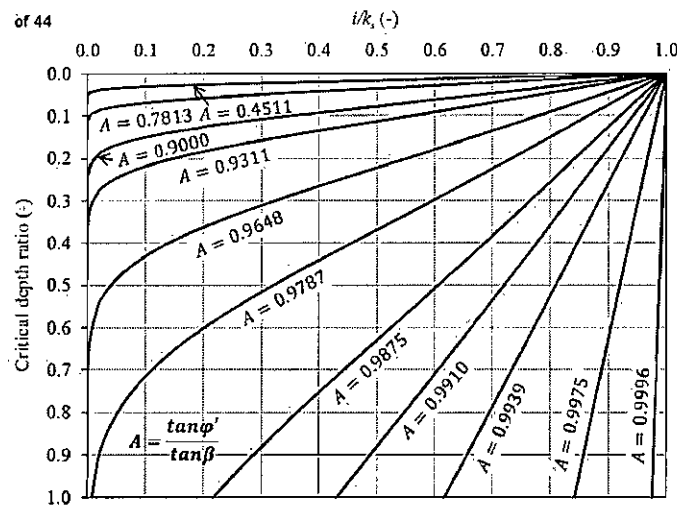
เกิดขึ้นที่ความลึกใดๆ จากชั้นที่บนน้ำถึงผิวลาดดินจะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพและดัชนีการซึม (i/k_s) ซึ่งผลกระทบของความเข้มข้นบนค่าสัดส่วนความปลอดภัยใดๆ แสดงได้ในเทอมของดัชนีการซึม ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยเสถียรภาพของลาดดินจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความลึกของระนาบความชื้นที่เคลื่อนตัวลงในดิน สำหรับดัชนีการซึมที่มีค่าน้อยกว่า 1.0



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับปริมาณความชื้น
(Chinkulkijniwat et al., 2016)



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับความลึก
(Chinkulkijniwat et al., 2016)



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

และจากรูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกวิกฤตกับดัชนีการซึม ซึ่งตำแหน่งของระนาบวิบัติมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประเมินการวิบัติของลาดดินและการระบุตำแหน่งของเครื่องมือเตือนภัย โดยกราฟนี้ใช้ประมาณความลึกของลาดดินที่มีโอกาสเกิดระนาบวิบัติในช่วงเฟสการไหลซึมของน้ำฝน แต่การใช้มีข้อจำกัดอยู่แค่ในกรณีที่ลาดดินเป็นดินทราย ($c' = 0$ kPa) เท่านั้น โดยในธรรมชาติแล้ว เป็นเรื่องยากที่จะพบลาดดินทรายเพียงอย่างเดียว

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ได้ทำการศึกษาและจัดทำแผนที่โอกาสเกิดแผ่นดินถล่มในพื้นที่ภาคใต้ โดยใช้ดัชนีปัจจัยรวม (Weighted Factor Index) จากปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดดินถล่ม ได้แก่ ลักษณะชนิดดินและหินความลาดชัน ปริมาณฝน สภาพการใช้ที่ดิน ระดับความสูงของพื้นที่ ซึ่งแต่ละปัจจัยมีค่าถ่วงน้ำหนักเป็นเลขโดดที่แตกต่างกันและมีระดับคะแนนตามช่วงค่าของปัจจัยนั้นๆ

Pantanahiran (1994) ใช้หลัก Logistic Regression Analysis เพื่อประเมินโอกาสเกิดแผ่นดินถล่มในบริเวณพื้นที่ลาดเขาเขตอำเภอพิปูน และเขาศรีวังค์ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานจาก Remote Sensing ประกอบด้วยตัวแปรต่อไปนี้ Elevation, Adjusted aspect, TM4, Flow accumulation, Brightness, Wetness, Slope, Flow direction

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้ศึกษาพฤติกรรมของดินถล่มมาอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ พื้นที่ตำบลน้ำก้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ อำเภอวังชิ้น จังหวัดแพร่ อำเภอเขาชัยภูมิ จังหวัดจันทบุรี ตำบลป่าตอง จังหวัดภูเก็ต โดยทำการศึกษาในด้านคุณสมบัติของดินทางวิศวกรรม เพื่อประเมินความมั่นคงของลาดภูเขา โดยเฉพาะเมื่อเกิดฝนตกหนักซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดดินถล่ม

สถาบันวิจัยและพัฒนาเพื่อป้องกันการเป็นทะเลทรายและเตียนภัย กรมพัฒนาที่ดินได้จัดทำแผนที่แสดงโอกาสเกิดแผ่นดินถล่มในประเทศไทย โดยพิจารณาถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดแผ่นดินถล่ม ได้แก่ การใช้ที่ดิน พืชพรรณ ลักษณะชนิดดิน ความลาดชัน และปริมาณฝน โดยวิเคราะห์บนระบบภูมิศาสตร์สารสนเทศ ที่รูปแบบการพิบัติเป็นแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope)

งานวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นงานวิจัยที่เป็นต้นแบบที่ดีในการศึกษาผลกระทบและการตอบสนองของลาดดินต่อน้ท่วมความชื้นฝน รวมไปถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งการวิบัติส่วนใหญ่เป็นแบบการเลื่อนไหลลงมาตามระนาบการวิบัติ (Translational slides) และใช้วิธีระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ หรือใช้พื้นฐานการคำนวณทางปฐพีวิศวกรรมเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่มีผลต่อการเกิดการวิบัติ โดยบูรณาการระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์กับพื้นฐานการคำนวณทางปฐพีวิศวกรรมเข้าด้วยกัน ในการประมาณความเสี่ยงของระนาบวิบัติซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญมากต่อการระบุตำแหน่งของเครื่องมือเตือนภัย ภายใต้เงื่อนไขระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ เพื่อพัฒนาระบบเตือนภัย (Early warning) ให้มีความแม่นยำมากขึ้น สำหรับการส่งสัญญาณเตือนให้ประชาชนในพื้นที่เสี่ยงภัยสามารถประมาณเวลาในการเตรียมการรับมือต่อภัยพิบัติที่จะเกิดขึ้นได้อย่างทันเหตุการณ์ ช่วยลดผลกระทบความเสียหายทั้งด้านชีวิตและทรัพย์สินให้ลดน้อยลงได้ด้วย

บทที่ 3

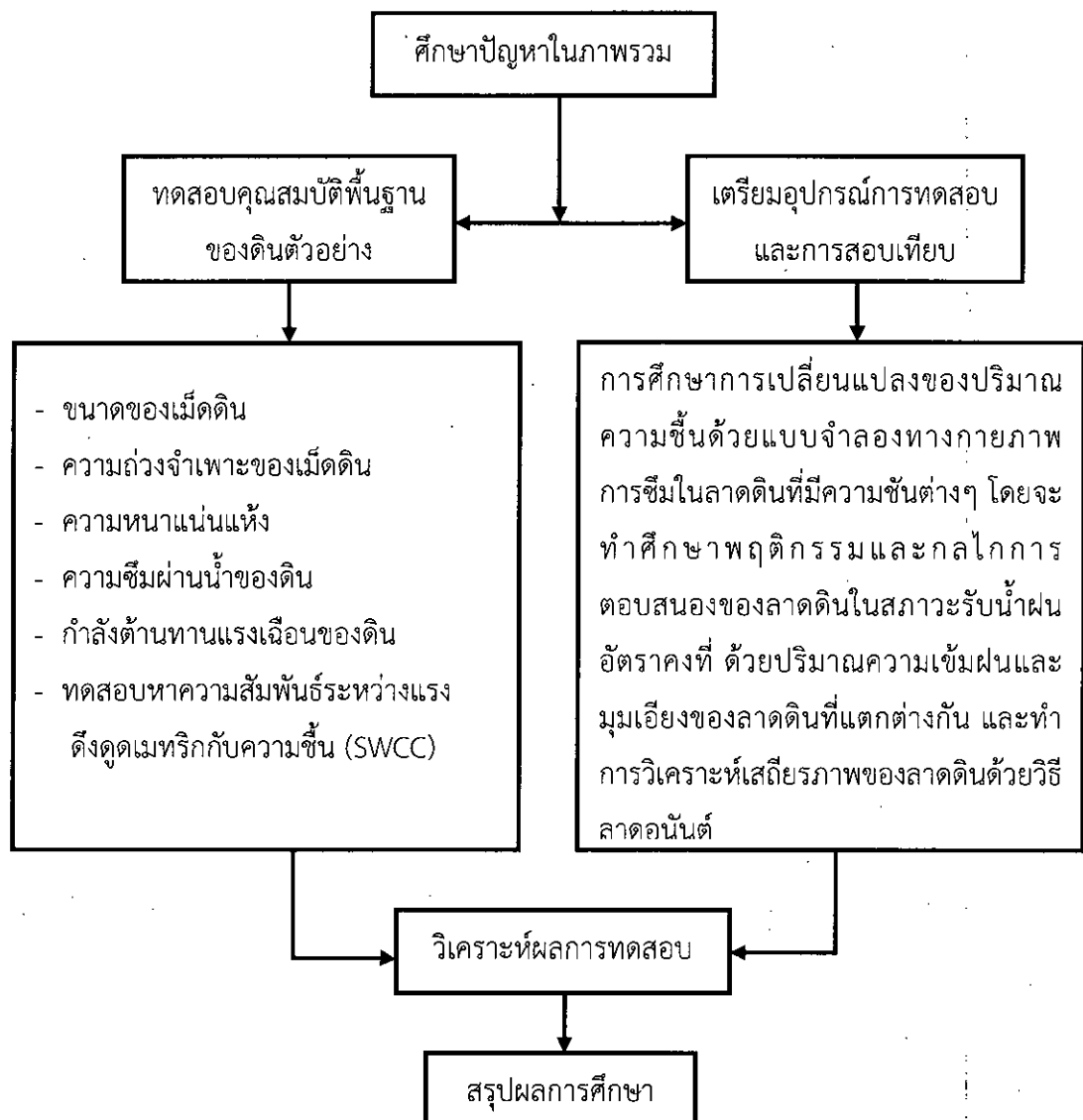
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่สอดคล้องกับเหตุการณ์ฝนตก นำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินนั้น เพื่อที่จะเสนอแนวทางการติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการแจ้งเตือนภัยดินถล่มได้อย่างแม่นยำ โดยออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ วิธีการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลัก ดังนี้

1) ส่วนแรกเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพบนหลักการลาดดินอนันต์ ผ่านการติดตั้งเครื่องมือวัดติดตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นในลาดดินเมื่อมีเหตุการณ์ฝนตกด้วยอัตราคงที่ โดยกำหนดตัวแปรค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity, i) และค่ามุมลาดชันของลาดดิน (Slope angle, β) ที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มฝน และความชันลาดดินต่อการตอบสนองเชิงอุทกวิทยาในลาดดินต้นที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดินตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เกิดขึ้นในลาดดิน สำหรับบูรณาการความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับดินโคลนถล่มแบบต้นและพัฒนาระบบเตือนภัยเบื้องต้นต่อไป

2) ส่วนที่สองของงานวิจัยเป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อดินโคลนถล่มระดับต้น โดยใช้กราฟน้ำฝนวิกฤติ หรือความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มฝนและระยะเวลาที่ลาดดินเริ่มเกิดการวิบัติ (Threshold) ซึ่งเป็นค่าเสถียรภาพลาดดินจุดต่ำสุดที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพลาดดินอย่างรวดเร็วตามมา จึงนิยมใช้ค่านี้ในการแจ้งเตือนภัยล่วงหน้ากันอย่างแพร่หลาย และสามารถจำแนกรูปแบบการวิบัติของลาดดิน และเสนอแนะตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์แจ้งเตือนภัยดินโคลนถล่มที่เหมาะสม และมีความแม่นยำมากขึ้นด้วย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การคำนวณเสถียรภาพลาดดิน

งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยวิธีสมดุลจำกัด (Limit-equilibrium method: LEM) โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element method, FEM) พิจารณา ร่วมกับการลดลงของหน่วยแรงในมวลดิน (Stress based method, SBM) ที่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วน ความปลอดภัย (Factor of safety, FS) รูปที่ 3.1 แสดงหน้าตัดของลาดดินอนันต์ในสภาวะฝนตก โดยระนาบวิบัติ (Failure plane) ของลาดดินระดับต้นเกิดขึ้นในแนวขนานกับผิวหน้าของลาดดิน

ทำการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ได้จากค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear strength resistance, τ_R) ต่อค่ากำลังเฉือนเนื่องจากการเคลื่อนตัวของมวลดิน (Mobilized shear strength, τ_M) ในแนวระนาบเดียวกัน โดยทั่วไปแล้วสภาพลาดดินในธรรมชาติ จะไม่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้จึงสามารถคำนวณค่ากำลังต้านแรงเฉือนของลาดดินได้ตามทฤษฎีภายใต้เงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb failure criteria) ในสภาวะดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Fredlund and Morgenstern 1976; Fredlund et al. 1978; Fredlund and Rahardjo 1993; Vanapalli et al. 1996) และเงื่อนไขการวิบัติของลาดดินตามแนวทางของ Lu and Griffiths (2004) and Lu and Likos (2006) ดังต่อไปนี้

$$\tau_R = c' + [(\sigma - u_a) - \sigma^s] \tan \phi' \quad (3.1)$$

เมื่อ c' คือ ค่าเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดินประสิทธิผล (Effective cohesion), ϕ' คือ ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective frictional angle), σ คือ ค่าความเค้นหรือค่าหน่วยแรงตั้งฉากรวม (Total normal stress) u_a คือ ค่าแรงดันอากาศในเม็ดดิน (Pore-air pressure) และ σ^s คือ ค่าหน่วยแรงดึงดูด (Suction stress) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$\sigma^s = -\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} (u_a - u_w) = -S_e (u_a - u_w) \quad (3.2)$$

เมื่อ θ_w คือ ค่าความชื้นในดิน (Volumetric water content), θ_r คือ ค่าความชื้นคงเหลือในดิน (Residual volumetric water content), θ_{sat} คือ ค่าความชื้นในดินที่สภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated volumetric water content) ด้วยเหตุนี้ค่าแรงดึงดูดในเม็ดดิน (Soil suction) จึงมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างค่าแรงดันอากาศในเม็ดดินกับค่าแรงดันน้ำในเม็ดดิน ($u_a - u_w$) และ S_e คือ ค่าดีกรีของความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล (Effective degree of saturation) ดังนั้น ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของลาดดินอนันต์ตามรูปที่ 3.1 สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ 3.3

$$FS = \frac{\tau_R}{\tau_M} = \frac{c' + [(\sigma - u_a) - \sigma^s] \tan \phi'}{W \sin \beta \cos \beta} \quad (3.3)$$

เมื่อ β คือ ค่ามุมลาดเอียงของลาดดิน (Slope angl) และ W คือ ค่าน้ำหนักดินในชิ้นส่วนหน้าตัดที่พิจารณา (Weight of the soil slice) เนื่องจากว่า $W = \gamma Z_w$, $\sigma = \gamma Z_w \cos^2 \beta$ และ $u_a = 0$ ในสภาวะความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) ดังนั้นจึงสามารถแปลงรูปสมการที่ 3.3 นามาเขียนใหม่เป็นสมการที่ 3.4 ดังนี้

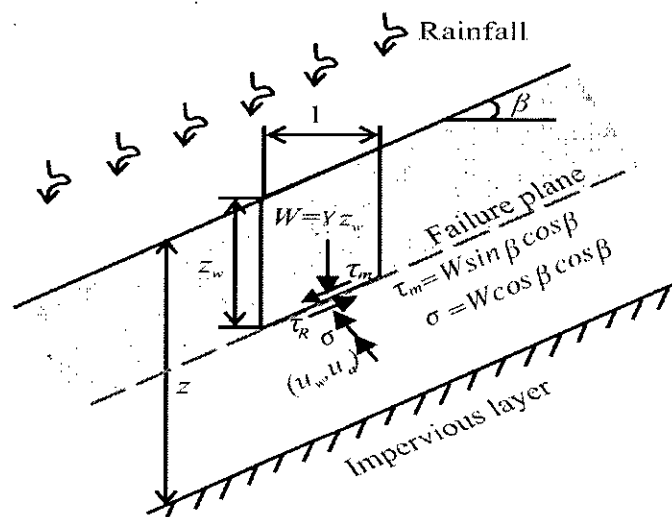
$$FS = \frac{c' + [\gamma Z_w \cos^2 \beta - \sigma^s] \tan \phi'}{\gamma Z_w \sin \beta \cos \beta} = \frac{c' - \sigma^s \tan \phi'}{\gamma Z_w \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (3.4)$$

เมื่อ γ คือ ค่าน้ำหนักดินต่อปริมาตร (Unit weight of soil), Z_w คือ ค่าระดับความลึกในแนวตั้งของระนาบวิบัติ (Vertical depth at failure plane)

สำหรับการหาค่าดัชนีของความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล (Effective degree of saturation, S_e) เพื่อนำมาแทนค่าในสมการที่ 3.2 นั้นจะสามารถหาค่า S_e ได้จากสมการที่ 3.5

$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad (3.5)$$

เมื่อ α คือ ค่าแรงดึงดูดเมทริกที่เริ่มดึงดูดอากาศเข้ามาในโพรงเม็ดดิน (Air entry value) และ n คือ อัตราน้ำไหลออกจากโพรงเม็ดดินเมื่อมีแรงดึงดูดเมทริกเกินกว่าค่า Air entry value



รูปที่ 3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินอนันต์ในสภาวะฝนตก

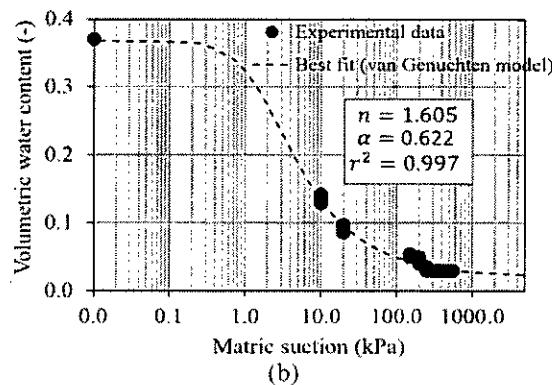
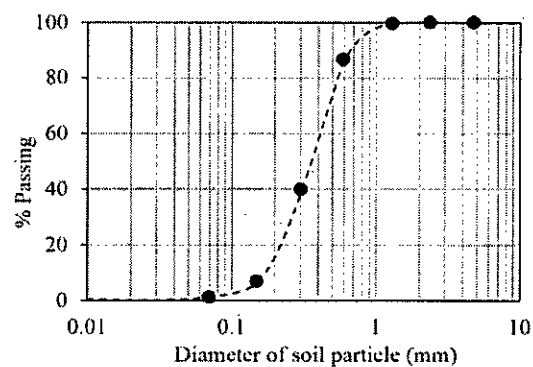
ในการวิจัยครั้งนี้ จะใช้สมการที่ 3.4 ในการคำนวณหาเสถียรภาพของลาดดิน เมื่อมีการจำลองเหตุการณ์ฝนตก โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงความชื้นในลาดดิน และความสัมพันธ์ของระนาบวิบัติอธิบายได้ตาม รูปที่ 3.1 ดังนั้น เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาวิจัยจึงได้สร้างแบบจำลองทางกายภาพของลาดดิน และจำลองเหตุการณ์ฝนตกในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

3.3 การเตรียมตัวอย่างดิน

ดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินทราย (Sand) เป็นดินตัวอย่างที่เก็บมาจากบ่อดินตัวอย่างในตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา โดยทำการเก็บตัวอย่างดินแบบมีการรบกวนตัวอย่างขณะเก็บ (Disturbed) ที่ความลึกช่วงผิวดินถึง 1 เมตร เป็นดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการซึมในสองมิติ (ดินที่มีความลาดชัน) ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง โดยหาการกระจายของอนุภาค (Particle size distribution) ด้วยการทดสอบร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) และการทดสอบไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ตามมาตรฐาน ASTM D422-63 และจำแนกด้วยระบบ Unified Soil Classification ตามมาตรฐาน ASTM D2487-69 โดยการคำนวณร้อยละของอนุภาคดินเป็นกลุ่มต่างๆ ได้แก่ ทราย (Sand) ทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay) หาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of soil) ตามมาตรฐาน ASTM D854-14 หาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดิน (Permeability) ตามมาตรฐาน ASTM D2434-68 หาค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry density) ตามมาตรฐาน ASTM D698 หากำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test) แบบเฉือนแห้ง คือ ดินที่ใช้ทดสอบมีค่าความชื้นเป็นศูนย์ ตามมาตรฐาน ASTM D 3080-04 และทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดเมทริกกับความชื้น (SWCC) โดยวิธีห่อแรงดัน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6836-02 โดยแสดงคุณสมบัติทั้งหมดของดินตัวอย่างที่นำมาจำลองเป็นลาดดิน ตามตารางที่ 3.1 และการจำแนกขนาด การกระจายของเม็ดดิน และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดเมทริกกับความชื้นดิน แสดงในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบการซึมในลาดดิน

Soil properties	Value	Unit
Soil type(USCS Classification)	SP	-
Dry unit weight, γ_d	16.9	kN/m^3
Specific gravity, G_s	2.69	-
Soil hydrologic parameters		
Saturated permeability, k_s	1.54×10^{-4}	m/sec
Saturated volumetric water content, θ_{sat}	0.371	-
Residual volumetric water content, θ_r	0.021	-
Fitting parameter, α	0.662	kPa^{-1}
Fitting parameter, n	1.605	-
Soil strength parameters		
Internal friction angle, ϕ'	38	deg
Cohesion, c'	0	kPa

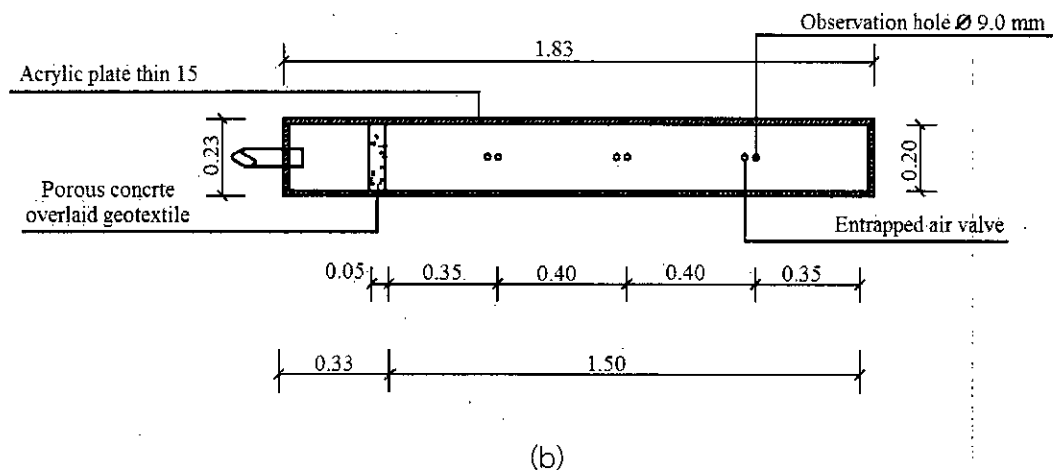
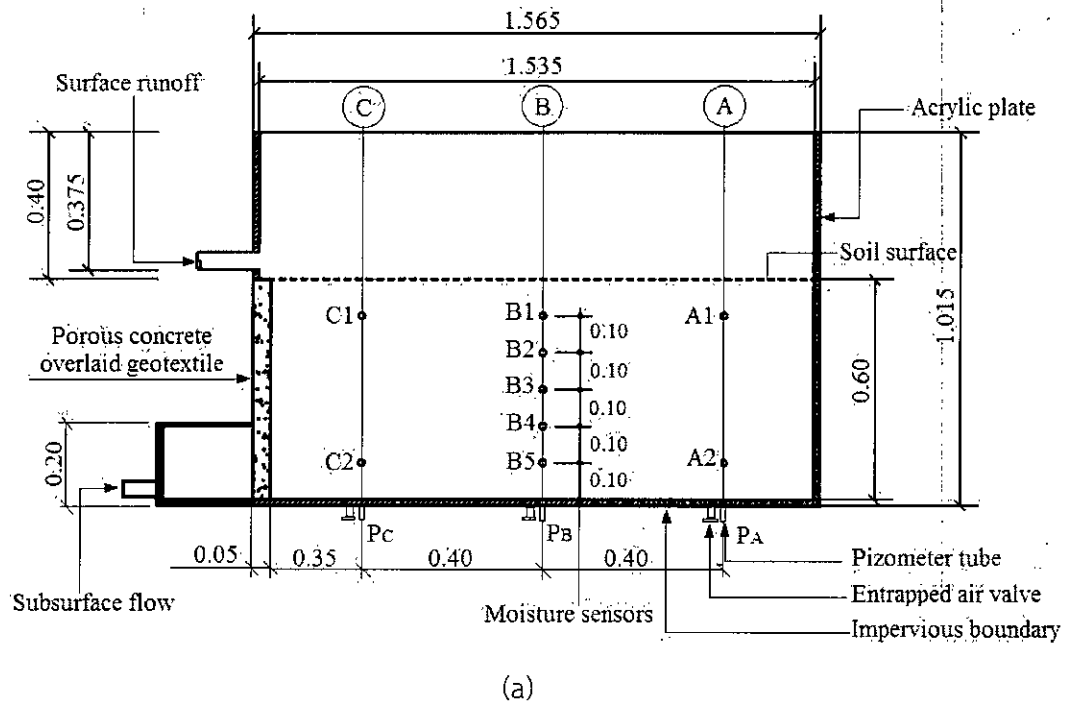


รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของเม็ดดินในลาดดินจำลอง a) ขนาดและการกระจายของเม็ดดินทราย (SP) และ b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดเมทริกกับความชื้นดิน (SWCC) ของดินทราย (SP)

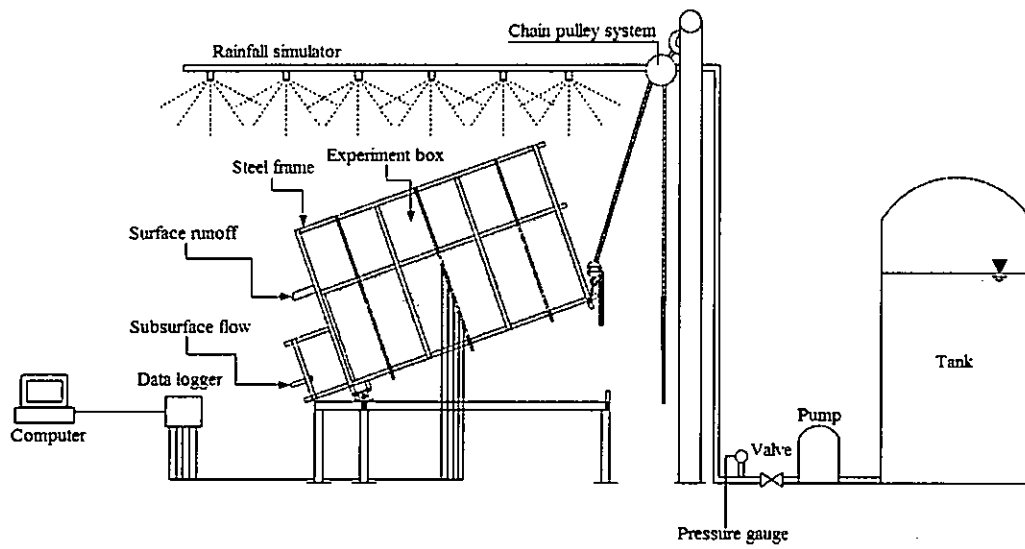
3.3 การสร้างแบบจำลองทางกายภาพการซึมและแบบจำลองน้ำฝน

รายละเอียดของแบบจำลองทางกายภาพการซึมในลาดดิน ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นกล่องทดสอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อใช้บรรจุดินตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่งทำด้วยอะคริลิกใสมีความหนา 15 มิลลิเมตร เพื่อให้ง่ายต่อการมองเห็นและสังเกตพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนอย่างชัดเจน มีขนาดกว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 1500 มิลลิเมตรและสูง 1,000 มิลลิเมตร ด้านหลังของกล่องทดสอบเจาะรูขนาด 9 มิลลิเมตร 5 รู มีระยะห่างจากพื้นกล่อง 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตรตามลำดับ เพื่อติดตั้งตัววัดความชื้น (sensor) ส่วนด้านข้างที่ตอนปลายของลาดดินมีแผ่นคอนกรีตพรุน (porous concrete overlaid geotextile) หนา 50 มิลลิเมตร สูง 600 มิลลิเมตรและกว้าง 210 มิลลิเมตรกันไว้เพื่อให้ น้ำในลาดดินสามารถไหลซึมออกได้ โดยน้ำที่ไหลซึมออกมาจะไหลลงสู่กล่องรับน้ำอยู่ตอนปลายของลาดดินมีขนาดกว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตรและสูง 200 มิลลิเมตร เพื่อวัดปริมาณฝนที่ซึมลงสู่ลาดดินทุกๆ 5 นาที ด้วยกระบอกตวงขนาด 2,000 มิลลิลิตรตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดยมีโครงเหล็กยึดตัวกล่องอะคริลิกเพื่อป้องกันการแอ่นตัวหรือการเคลื่อนของอะคริลิกเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วซึมของน้ำ กล่องทดสอบจะเชื่อมต่อกับฐานด้วยเพลลาเพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนองศาความลาดชันของลาดดิน

เพื่อที่จะตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน พื้นของกล่องทดสอบเจาะรูขนาด 10 มิลลิเมตร 3 รู มีระยะห่างจากปลายของลาดดิน 350, 750 และ 1125 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยติดตั้งตัววัดระดับน้ำใต้ดิน (Pizometer) ด้วยท่อพลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สังเกตการเปลี่ยนแปลงและบันทึกค่าของระดับน้ำใต้ดินทุกๆ 5 นาทีตลอดการทดสอบ นอกจากนี้ยังติดตั้งวาล์วอีก 3 ตัว ที่ด้านล่างของกล่องทดสอบใกล้ๆ กับตัววัดระดับน้ำใต้ดินสำหรับไล่อากาศที่อยู่ในลาดดินขณะที่น้ำกำลังซึมลงสู่ลาดดิน ที่อาจทำให้เกิดการดักจับของอากาศเป็นสาเหตุให้ค่าความชื้นคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของกล่องทดสอบอะคริลิกไว้ในรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.4 รายละเอียดของกล่องทดสอบลาดดินการซึมใน 2 มิติ (a) รายละเอียดกล่องทดสอบจากด้านข้าง (Side view) และ (b) รายละเอียดกล่องทดสอบจากด้านบน (Top view)



รูปที่ 3.5 แผนผังของแบบจำลองลาดดินและระบบน้ำฝน

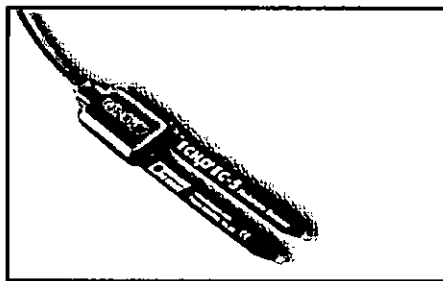


รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายกล่องทดสอบลาดดินจำลองและระบบน้ำฝน

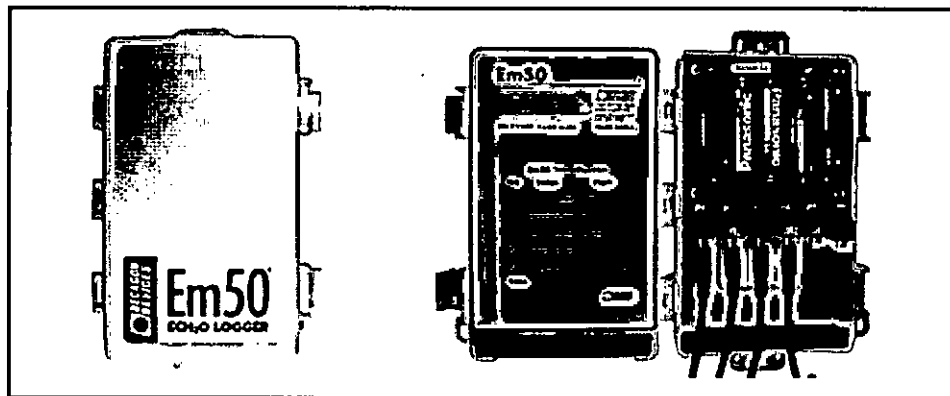
3.4 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Sensor) และการสอบเทียบ

3.4.1 อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Sensor)

อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Sensor) ประกอบด้วย หัววัดความชื้น (Probe) รุ่น EC-5 แสดงดังรูปที่ 3.10(a) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าความชื้น ด้วยวิธี Frequency Domain Reflectometry (FDR) โดยอาศัยหลักการความต่างศักย์ไฟฟ้า และเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) รุ่น Em 50 แสดงดังรูปที่ 3.10(b) ที่มีช่องสำหรับต่อเข้ากับหัววัด 5 ช่อง สามารถกำหนดระยะเวลาในการวัดค่าได้ ตั้งแต่ 1 นาทีต่อครั้ง จนถึง 24 ชั่วโมงต่อครั้ง โดยมีโปรแกรมสำเร็จรูปที่ทำงานในรูปแบบปฏิบัติการบน Windows ลงบนคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกข้อมูลจะแสดงค่าความชื้นเชิงปริมาตร θ' (%)



(a)



(b)

รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นในดิน (Sensor)

(a) หัววัด (Probe) รุ่น EC-5

(b) เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) รุ่น Em 50

3.4.2 การสอบเทียบตัววัดความชื้น

ค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากตัววัดความชื้นจะต้องได้รับการสอบเทียบกับดินที่ใช้ในการทดสอบก่อน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) บดอัดดินตัวอย่างลงในแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ให้ได้ความหนาแน่นเท่าที่ต้องการ
- 2) ผึ่งตัววัดความชื้นลงในดินที่บดอัดเรียบร้อยแล้ว
- 3) วัดความชื้นด้วยห้ววัด และบันทึกค่าความชื้นที่วัดได้ (θ')
- 4) เก็บตัวอย่างดินนำไปอบเพื่อหาความชื้นโดยน้ำหนัก (w)
- 5) คำนวณความชื้นเชิงปริมาตรที่ถูกต้อง (θ) จากสมการที่ 3.1
- 6) ทำซ้ำข้อที่ 1 ถึง 5 โดยมีการเติมน้ำลงในดินเพื่อแปรผันความชื้น นำค่าดังกล่าวมาหาค่าความชื้นตามสมการที่ 6.

$$\theta = w \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (3.1)$$

เมื่อ w คือ ปริมาณความชื้นของน้ำในมวลดิน (%)

γ_d คือ หน่วยน้ำหนักของดินแห้ง (อยู่ในช่วง 1.60 – 1.70 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ (เท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

เมื่อทำการสอบเทียบห้ววัดแล้ว นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเชิงปริมาตรที่ได้จากห้ววัดความชื้น (θ') ความชื้นโดยน้ำหนักในมวลดิน (w) และความชื้นเชิงปริมาตรที่ถูกต้อง (θ) เพื่อปรับแก้ค่าความชื้น โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่ได้จากการคำนวณกับค่าความชื้นที่อ่านได้จากตัววัดความชื้น พบว่า ค่าความชื้นที่ได้จากสมการกับค่าที่อ่านได้จากตัววัดความชื้นมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้น จึงต้องมีการปรับแก้ค่าความชื้นที่ได้จากตัววัดความชื้นเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการ สำหรับดินทราย (SP) ปรับแก้จากสมการที่ 3.2

$$\theta = 1.1160\theta' - 0.0160 \quad (3.2)$$

เมื่อ θ' คือ ค่าความชื้นเชิงปริมาตรที่ได้จากตัววัดความชื้น

3.5 ขั้นตอนการทดสอบการไหลซึมของน้ำฝนในห้องปฏิบัติการ

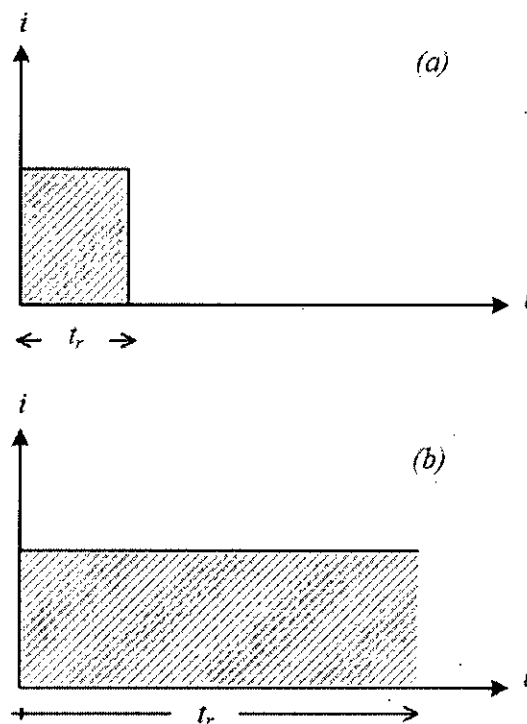
การเตรียมดินครั้งแรกทิ้งไว้ที่อากาศแห้งและพลิกกลับเป็นเวลา 14 วัน จนดินที่ได้รับการผึ่งอย่างสม่ำเสมอ มีความชื้นเป็น 3% ของน้ำหนักดินแห้งซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความชื้นที่เหลือของ SWCC ของดิน หลังจากนั้น บดอัดดินอย่างรอบคอบภายในกล่องทดสอบแบ่งออกเป็น 10 ชั้น ในแนวนอนซึ่งแต่ละชั้นมีความหนา 60 มิลลิเมตร น้ำหนักของดินที่ถูกควบคุมในแต่ละชั้น ซึ่งหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 1.69 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และอัตราการช่องว่างของ 0.67 ในระหว่างกระบวนการบดอัดดินนั้น ได้ติดตั้งตัววัดความชื้น (Probes) ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว เข้ากับรูที่อยู่ด้านข้างกล่องทดสอบด้วย

ตารางที่ 3.2 โปรแกรมการทดสอบการซึมผ่านในลาดดิน

Series	Rainfall intensity, i (mm/hr)	Slope angle, β (deg)	Rainfall sequence, t_r (hr)
I	45	20	4
	70		
	100		
	130		
	160		
II	100	5	4
		10	
		20	
		30	

เงื่อนไขการทดสอบแบบจำลองลาดดินทรายได้รับการออกแบบเพื่อที่จะศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นน้ำฝนความเข้มข้นในการตอบสนองต่อความชื้นของลาดดินที่มีความสามารถในการซึมผ่านสูง ซึ่งมีทั้งหมด 2 ชุดทดสอบ โดยชุดทดสอบแรกมี 5 ทดสอบจะใช้ค่าปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันในการทดสอบคือ 45, 70, 100, 130, 160 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และใช้มุมความลาดชันของลาดดินคงที่เท่ากับ 20 องศา ส่วนชุดทดสอบที่สองมี 4 ทดสอบจะใช้มุมความลาดชันของลาดดินแตกต่างกันในการทดสอบคือ 5, 10, 20, 30 องศา และใช้ค่าความเข้มข้นคงที่เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

ลาดดินจำลองมีค่าปริมาตรความชื้นเริ่มต้นของดินอยู่ระหว่าง 0.40 ถึง 0.50 โดยแต่ละครั้งถูกกำหนด ปริมาณความชื้นฝนในช่วงที่ต่ำกว่าการซึมผ่านอิมิตัวของดิน รวมทั้งสองชุดทดสอบมีทั้งหมด 9 ทดสอบถูกจำลองเหตุการณ์ฝนตกอย่างสม่ำเสมอต่อเนื่องเป็นระยะเวลาในการทดสอบ 4 ชั่วโมง โดยเงื่อนไขการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางการทดสอบที่ 3.4 สำหรับรูปแบบการจำลองฝนตกในการ ทดสอบจริงแสดงในรูปที่ 3.2 (a) และรูปแบบจำลองเหตุการณ์ฝนตกในการคำนวณเสถียรภาพของ ลาดดินอนันต์ด้วยวิธีสมมูลจำกัด (LEM) โดยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) แสดงในรูปที่ 3.2 (b)



รูปที่ 3.8 รูปแบบจำลองเหตุการณ์ฝนตก (a) การทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ
(b) การคำนวณเสถียรภาพของลาดดินอนันต์

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

ในการศึกษาพฤติกรรมของการไหลซึมของน้ำภายในลาดดินของงานวิจัยนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของ Green- Ampt model ซึ่งเป็นแนวคิดที่พัฒนามาจากกฎของดาร์ซี (Darcy's law) โดยการทดสอบอยู่ภายใต้สมมติฐานฝนตกแล้วไม่เกิดน้ำขังที่ผิวดิน ($i/k_s < 1$) การเคลื่อนที่ของระนาบความชื้น (wetting front) จะต้องสม่ำเสมอ เมื่อดินเปียกน้ำแล้วภายในโซนของดินเปียกจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของความชื้นในดิน และเขตดินเปียกจะต้องมี negative pressure ที่คงที่ ผลการทดสอบภายใต้เงื่อนไขของความชื้นที่แตกต่างกันและฝนตกด้วยอัตราคงที่ และไม่มีการระบายน้ำใต้ดิน ในสภาวะนี้ ค่าการเปลี่ยนแปลงดัชนีการซึม (Infiltration index, i/k_s) หรืออัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อความสามารถซึมผ่านได้ของดินที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ จะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดระนาบการวิบัติของลาดดิน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในชั้นดินดังกล่าวจะถูกตรวจวัดได้จากหัวอ่านค่าความชื้นที่ฝังในลาดดินที่ระดับความลึกต่างๆ

4.2 ผลการทดสอบการซึมในลาดดิน

ผลการทดสอบโดยการตรวจวัดค่าปริมาตรความชื้นในลาดดินได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ค่าความชื้นจากการทดสอบทั้งหมดได้จากตัววัดความชื้นที่ถูกติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแบบจำลองลาดดิน ซึ่งอยู่ในระดับความลึกที่แตกต่างกันจากผิวคือ B1, B2, B3, B4 และ B5 อยู่ลึกลงไปจากผิวหน้าลาดดิน 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตร ตามลำดับ

4.2.1 ผลการทดสอบชุดที่ 1

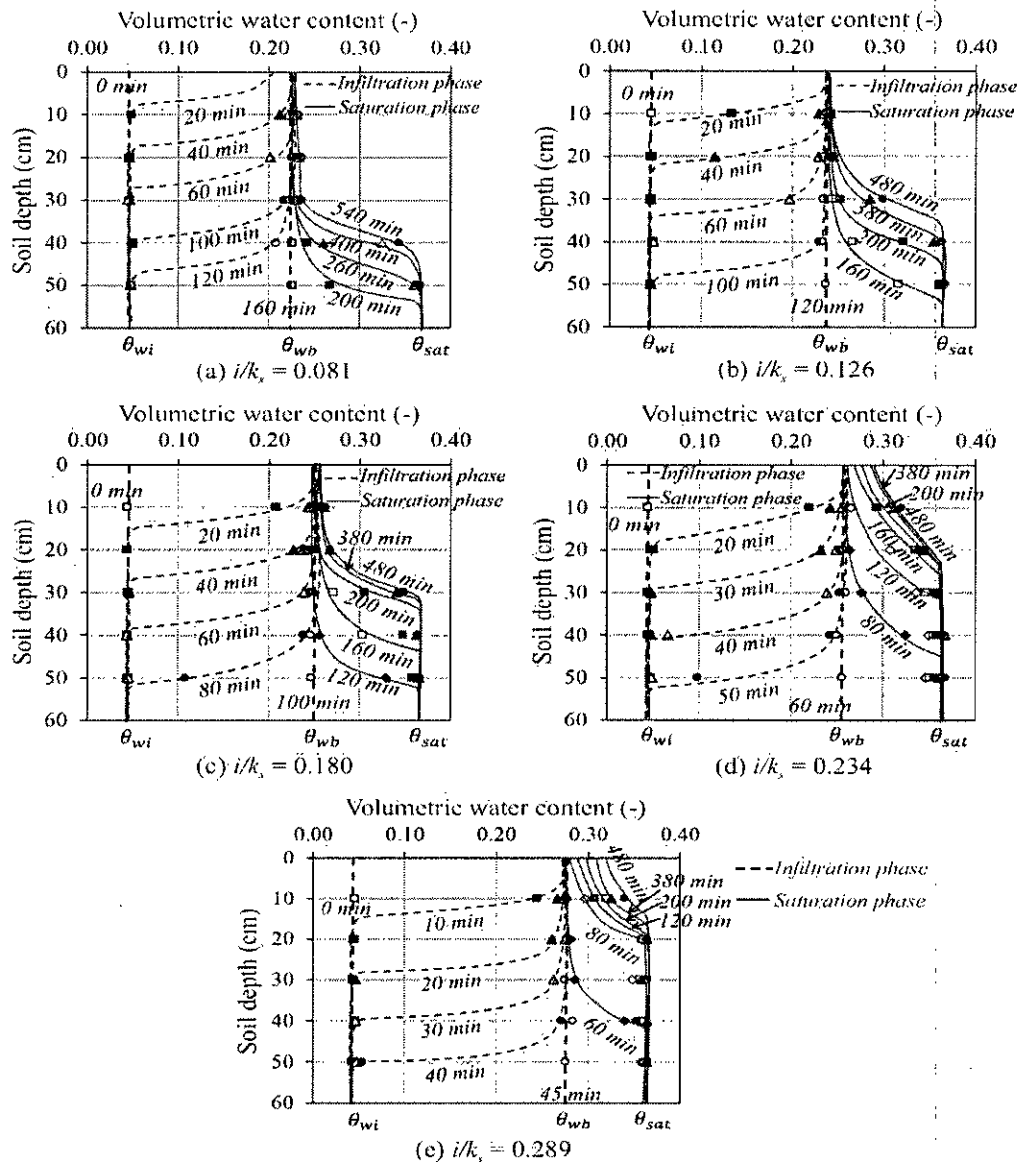
รูปที่ 4.1 (a)-(e) แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรความชื้นตามความลึกของลาดดินในชุดทดสอบที่ 1 โดยที่ลาดดินทั้ง 5 การทดสอบในชุดการทดสอบนี้มีความลาดเอียงเท่ากันที่ 20 องศา ($\beta = 20$) รูปที่ 4.1 (a) แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรความชื้นตามความลึกของลาดดิน ในช่วงเวลาที่จำลองน้ำฝนที่ค่าความชื้นผิวดินเท่ากับ 45 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.081$) แสดงให้เห็นชัดเจนว่ามีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรความชื้นในลาดดินจำแนกออกเป็นสองขั้นตอน (phase) ชัดเจนคือ 1) การแทรกซึมของน้ำฝนจากผิวหน้าของลาดดิน และ 2) การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน โดยจะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงช่วงแรกได้จากค่าปริมาตรความชื้นเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นจาก 0.045 ทำให้เกิดความชื้นหลังระนาบความชื้น (θ_{wb}) ที่ค่าปริมาตรความชื้นเพิ่มขึ้นถึง 0.225 เคลื่อนตัวจากผิวหน้าลาดดิน ลงไปตามระดับความลึกซึ่งในขั้นตอนนี้นั้นดินยังอยู่ในสถานะที่ไม่อิ่มตัว ในขณะที่ช่วงที่

สองเกิดหลังจากการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นมาถึงพื้นล่างของลาดดิน จนเริ่มเกิดการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินทำให้ปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 0.36 ($\theta_w = 0.36$) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าปริมาณความชื้นที่สภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Huang et al. 2008; Huang and Yuin 2010; Sharma and Nakagawa 2010 และ Tohari et al. 2007

การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นกับความลึก สำหรับความชื้นผิวน 70 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.126$) รูปที่ 4.1(b) สำหรับความชื้นผิวน 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.180$) รูปที่ 4.1(c) สำหรับความชื้นผิวน 130 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.234$) รูปที่ 4.1 (d) และสำหรับความชื้นผิวน 160 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.289$) รูปที่ 4.1(e) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในสองขั้นตอนใช้เวลาในการตอบสนองจะเร็วกว่าที่ความชื้นผิวนที่ 45 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.081$) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงในช่วงที่สองของปริมาณความชื้นจะแสดงที่ระดับความลึกตื้นขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นผิวนที่สูงกว่า 45 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงในช่วงที่สองแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

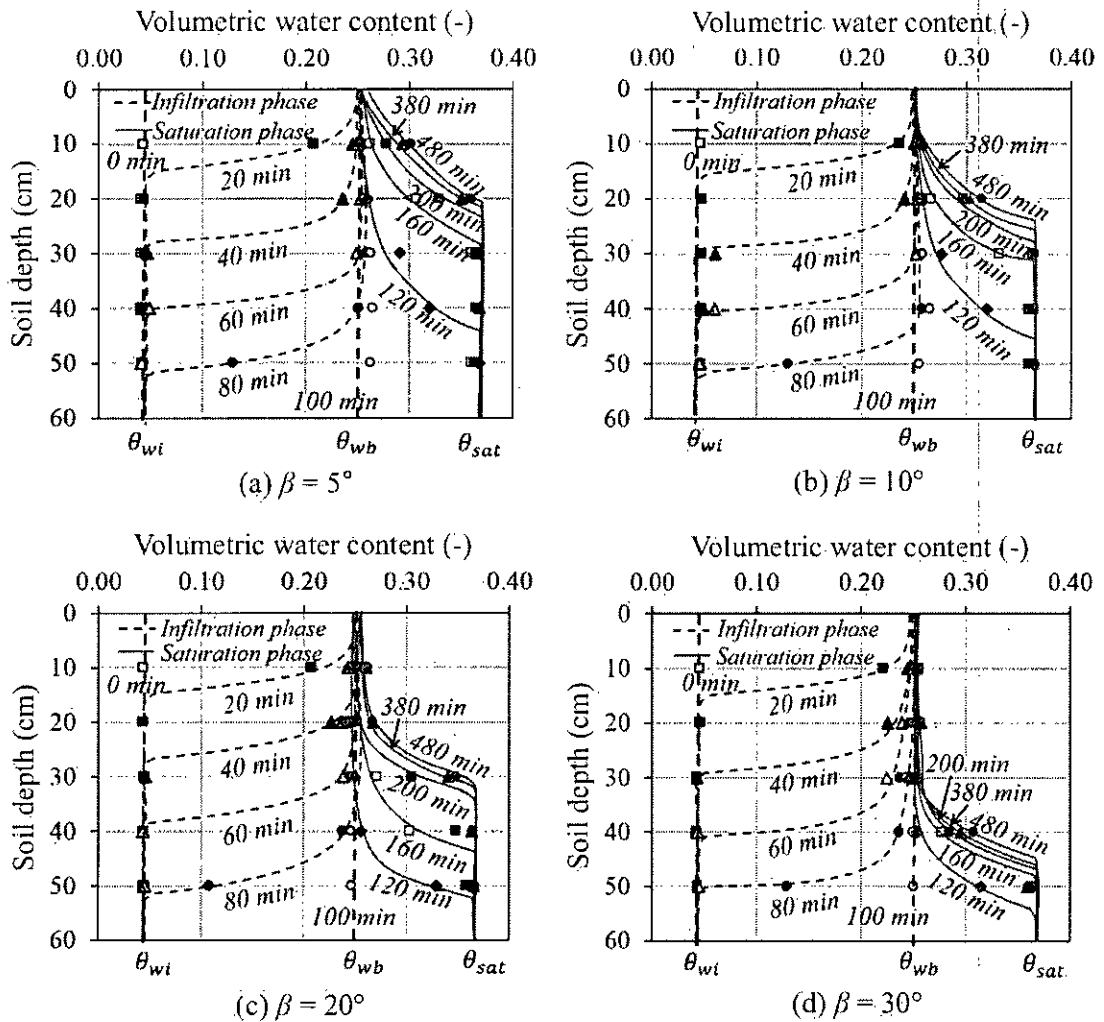
4.2.2 ผลการทดสอบชุดที่ 2

ในชุดการทดสอบที่สองจะกำหนดค่าความชื้นน้ำผิวน (i) คงที่ค่าเดียว แต่แปรผันค่าความลาดเอียง หรือความชันของลาดดิน จำนวน 4 การทดสอบ รูปที่ 4.2 (a)-(d) แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นตามความลึกของลาดดินเมื่อกำหนดค่าความชื้นผิวน 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.180$) เท่ากัน แต่ได้ทำการปรับมุมชันของลาดดินแตกต่างกัน สำหรับค่ามุมลาดชัน 5, 10, 20 และ 30 องศา ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า ในช่วงการแทรกซึมของน้ำผิวนจากผิวหน้าของลาดดินมีลักษณะคล้ายกันในทุกๆ มุมลาดชัน ในขณะเดียวกันในช่วงการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินสำหรับมุมลาดชัน 5, 10 และ 20 องศา ก็คล้ายคลึงกันคือมีระดับน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 30-40 เซนติเมตร ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินสำหรับมุมลาดชัน 30 องศา มีระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นเพียง 15 เซนติเมตรเท่านั้น



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของลาดดินที่ความชื้น 20 องศา กับ ปริมาตรความชื้น

- (a) ปริมาณความชื้น 45 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.081$)
- (b) ปริมาณความชื้น 70 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.126$)
- (c) ปริมาณความชื้น 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.180$)
- (d) ปริมาณความชื้น 130 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.234$)
- (e) ปริมาณความชื้น 160 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ($i/k_s = 0.289$)



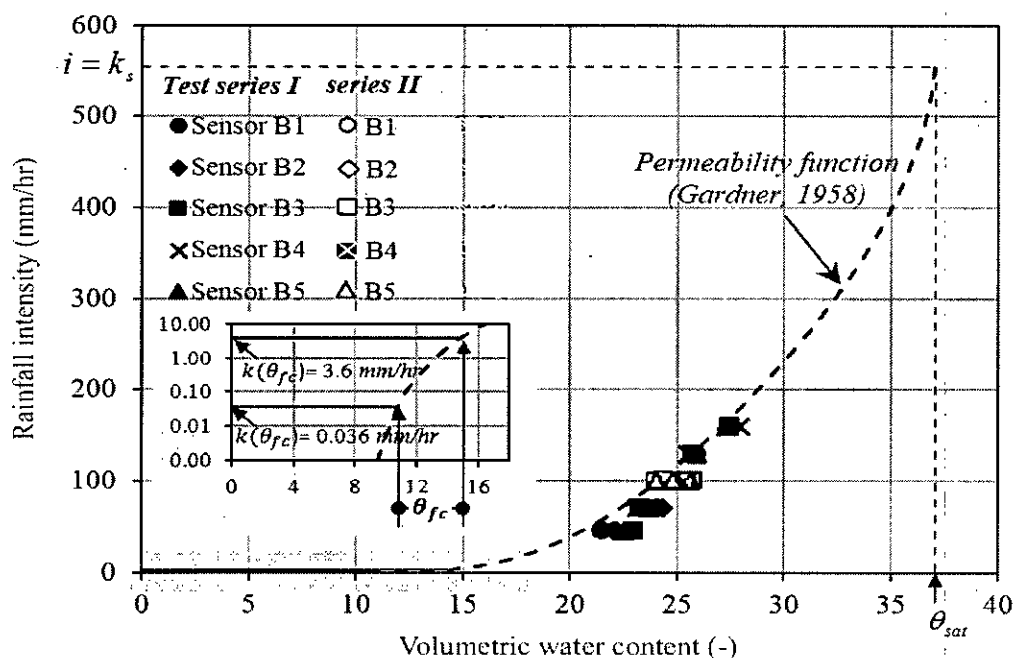
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของลาดดินกับปริมาตรความชื้น

ที่ความชัน 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

- (a) ลาดดินชัน (β) เท่ากับ 5 องศา
- (b) ลาดดินชัน (β) เท่ากับ 10 องศา
- (c) ลาดดินชัน (β) เท่ากับ 20 องศา
- (d) ลาดดินชัน (β) เท่ากับ 30 องศา

4.3 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน

รูปที่ 4.3 แสดงถึงคุณสมบัติที่สำคัญของดินในสนามที่มีความสามารถรับความชื้นเข้ามาเพิ่มเติมในดิน หรือที่เรียกว่า ความจุความชื้นในสนาม (field capacity, θ_{fc}) ซึ่งมีอิทธิพลต่อการซึมลงของน้ำฝนลงสู่ลาดดิน โดยค่าความจุความชื้นในสนาม สามารถหาได้จากความชื้นคงเหลือในดิน หลังจากมีการระบายน้ำออกจากดินอย่างอิสระเป็นเวลา 2-3 วัน (Soil Science Glossary Terms Committee, 2008) ทั้งนี้ Meyer and Gee (1999) เสนอให้พิจารณาจากช่วงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน (k) ระหว่าง 10^{-9} ถึง 10^{-11} เมตรต่อวินาที ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ลาดดินที่ใช้ทำแบบจำลองในการวิจัยในครั้งนี้ จึงมีค่าความจุความชื้นในสนาม (θ_{fc}) ระหว่าง 0.11-0.15 หรือมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินที่ความจุความชื้นในสนาม ($k(\theta_{fc})$) ระหว่าง 0.036- 3.6 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ปริมาตรความชื้นในดินจะยังคงที่ถึงแม้จะมีฝนตกซึมลงไป ในดินจนกระทั่งมีปริมาตรความชื้นสะสมเกินค่าความจุความชื้นในสนาม ปริมาตรความชื้นในดินจึงเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ผลการทดสอบทั้งสองชุดทดสอบมีความสอดคล้องกับสมการการซึมผ่านของน้ำในดิน (Permeability function) ของ Gardner (1958)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรความชื้นหลังระนาบความชื้นในลาดดินกับปริมาณความเข้มฝน สำหรับประมาณค่าความจุความชื้นในสนาม

ในการวิเคราะห์หาจุดค่าอัตราส่วนความปลดกัยต่ำสุดหรือความลึกระนาบวิกฤติจะพิจารณาจากสมการการซึมผ่านของ Gardner (1958) เป็นฟังก์ชันการซึมผ่านของน้ำลงในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนี้

$$k(\theta) = k_s \exp[-\alpha(u_a - u_w)] \quad (4.1a)$$

เมื่อ k_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในสภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในสภาวะดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

θ คือ ค่าปริมาตรความชื้น

$(u_a - u_w)$ คือ แรงดึงดูดเมทริก หรือ แรงคาพิลลารี เป็นความแตกต่างระหว่างแรงดันอากาศในช่องว่างเม็ดดินกับแรงดันน้ำในช่องว่างเม็ดดิน

α คือ ค่าแรงดึงดูดเมทริกที่เริ่มดึงดูดอากาศเข้ามาในโพรงเม็ดดิน (Air entry value)

โดยเปลี่ยนรูปสมการในรูปค่า Air entry ดังนี้

$$\alpha(u_a - u_w) = -\ln\left(\frac{k(\theta)}{k_s}\right) \quad (4.1b)$$

นำสมการที่ 4.1b ไปแทนค่าในสมการ 3.5 จะได้ว่า

$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + [-\ln(k(\theta)/k_s)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad (4.2)$$

เมื่อ $\theta_w = \theta_{wb}$, $k(\theta_{wb}) = i$ ดังนั้น สมการ (4.2) จึงเขียนใหม่เป็น

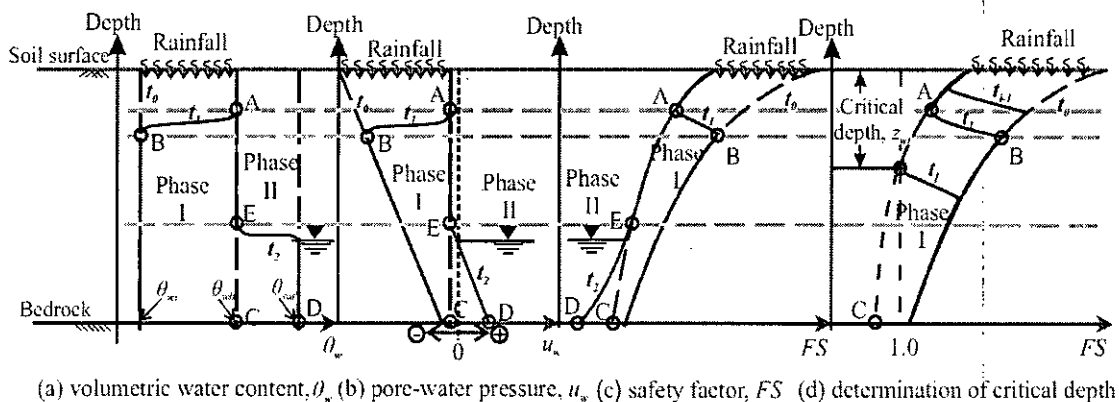
$$S_{eb} = \frac{\theta_{wb} - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + [-\ln(k(\theta_{wb})/k_s)]^n} \right\}^{1-1/n} = \left\{ \frac{1}{1 + [-\ln(i/k_s)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad (4.3a)$$

และที่แรงดึงดูดเมทริกสูงสุดค่า $\theta_w = \theta_{wb}$ นั่นคือ

$$(u_a - u_w)_b = -\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{i}{k_s}\right) \quad (4.3b)$$

เมื่อ S_{eb} และ $(u_a - u_w)_b$ คือ ค่าความอิ่มตัวประสิทธิผล และแรงดึงดูดเมทริกหลังระนาบความชื้นตามลำดับ สมการที่ (4.3a) และ (4.3b) สอดคล้องกับที่ Lu และ Griffiths (2004) , Lu และ Godt (2008) ได้เสนอไว้ในการอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองความชื้นในสถานะน้ำไหลซึมลงลาดดินในอัตราคงที่สม่ำเสมอและไม่มีการสะสมตัวของระดับน้ำใต้ดิน จากผลวิเคราะห์การทดสอบในช่วงเวลาที่เกิดสภาวะตามเงื่อนไขดังกล่าวพบว่าความชื้นหลังระนาบความชื้น (θ_{wb}) ที่ก่อตัวขึ้นในลาดดินนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับมุมลาดเอียงของลาดดิน (β) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล (S_e) และค่าปริมาตรความชื้น (u_w) แปรผันตามค่าความเข้มข้นน้ำฝน (i) ที่เพิ่มขึ้น

แนวคิดในการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) เป็นการหาความสัมพันธ์ความชื้นตามความลึกกับเวลาในช่วงการแทรกซึมของน้ำฝนจากผิวหน้าของลาดดินจนถึงดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ความชื้นในลาดดินเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกินกว่าค่าความจุความชื้นในสนาม (θ_{fc}) จนเกิดความชื้นหลังระนาบความชื้น (θ_{wb}) โดยอัตราส่วนความปลอดภัยจะแปรเปลี่ยนค่าระหว่างเส้นปริมาตรความชื้นเริ่มต้น (θ_{wi}) ปริมาตรความชื้นหลังระนาบความชื้น (θ_{wb}) ไปจนถึงปริมาตรความชื้นในสภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (θ_{sat}) แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินในสภาวะฝนตก

- ปริมาตรความชื้น (θ_w)
- แรงดันน้ำในโพรงเม็ดดิน (u_w)
- อัตราส่วนความปลอดภัย (FS)
- การหาค่าความลึกวิกฤติ

รูปที่ 4.4(d) แสดงการหาความลึกที่เกิดระนาบวิบัติ (failure plane) ที่เรียกว่า ความลึกวิกฤติ (critical depth) ซึ่งเป็นระดับความลึกของลาดดินที่เมื่อน้ำฝนซึมลงไปแล้วทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) มีค่าเท่ากับ 1 พอดี จะเห็นได้ว่าค่า FS ลดลง ตามความลึกที่เพิ่มขึ้นและค่า FS ต่ำสุดที่รอยต่อระหว่างชั้นดินทรายกับชั้นทับน้ำ (Impervious layer หรือ Bedrock) ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับนักวิจัยหลายๆ ท่านก่อนหน้านี้ (Santoso et al. 2011; Ali et al. 2014a; Ali et al. 2014b)

4.4 การประเมินเสถียรภาพลาดดินต้นในสภาวะรับน้ำฝน

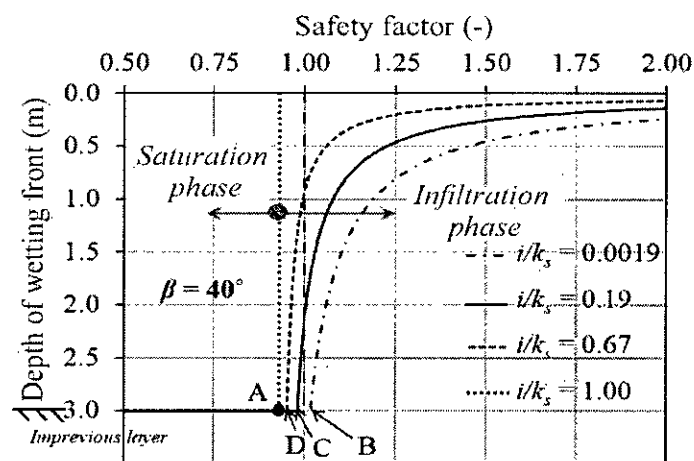
ลาดดินจำลองด้วยดินที่มีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1 ให้มีระดับความลึก 3 เมตร ด้านล่างสุดเป็นชั้นทับน้ำ กำหนดให้ลาดดินรับน้ำฝนจนดินอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่มีการสะสมตัวของความชื้นจนเกิดระดับน้ำใต้ดิน ในการทำนายเสถียรภาพลาดดิน มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1) คำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงดูดเมทริก ($\sigma^s = S_e(u_a - u_w)$) สำหรับค่าความชื้นน้ำฝน (i) ใดๆ ในช่วงการซึมที่ยังไม่มีการสะสมความชื้นจนเกิดน้ำใต้ดิน ดังนั้นจะสามารถหาค่าความอิ่มตัวประสิทธิภาพ (S_e) และแรงดึงดูดเมทริก ($u_a - u_w$) ได้จากสมการ 4.3a และ 4.3b

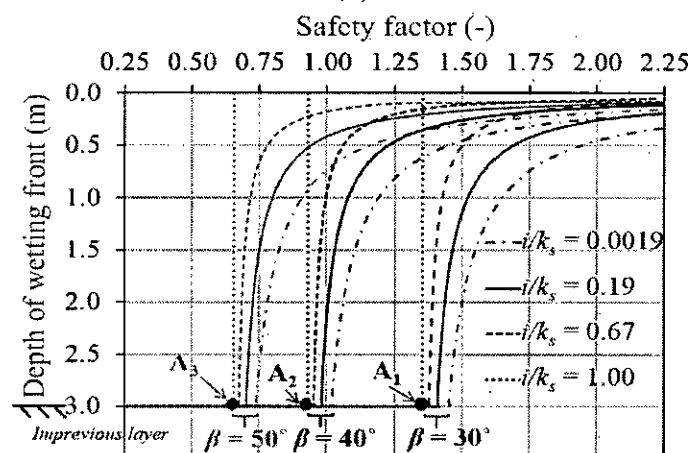
2) ใช้สมการที่ 3.4 ในการประเมินเสถียรภาพของลาดดิน จะเห็นได้ว่ามีส่วนหลักที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินประกอบด้วย หน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิภาพของดิน (c'), หน่วยแรงดึงดูดเมทริก (σ^s), และมุมเสียดทานภายในประสิทธิภาพของดิน (ϕ') โดยคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ที่ระดับความลึก (Z_w) ต่างๆ ตามการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้น (Wetting front) ในช่วงการซึมผ่านที่ดินยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จนกระทั่งเมื่อระนาบความชื้นเคลื่อนที่ถึงชั้นทับน้ำ จะต้องเปลี่ยนวิธีการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเป็นช่วงที่อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งจะขึ้นกับความสูงของระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้น

ในการศึกษาอิทธิพลของค่าความชื้นฝน (i) และมุมลาดชันของลาดดิน (β) ต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในสภาวะฝนตก แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยรูปที่ 4.5a แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกของการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้น (Z_w) ในลาดดินที่มีความลาดชัน 40 องศา และค่าความชื้นฝนต่างๆ รูปที่ 4.5b แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกของการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นในลาดดินที่มีความลาดชันต่างๆ และค่าความชื้นฝนต่างๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lu and Griffiths (2004) และ Lu and Likos (2006) ที่ว่าสภาวะทางชลศาสตร์ภายใต้เงื่อนไขเฟสการซึมคงที่เป็นฟังก์ชันของดัชนีการซึม (Infiltration index, i/k_s) ดังนั้น อิทธิพลของความชื้นฝนต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะแสดงในเทอมของดัชนีการซึม สำหรับทุกๆ ความชื้นฝนที่ i/k_s มีค่าน้อยกว่า 1.0 (ค่าความชื้นฝนไม่เกินค่าซึมผ่านได้ของลาดดิน หรือน้ำฝนไหลซึมลงสู่ลาดดินได้ทัน และไม่มีน้ำขังบนผิวหน้าลาดดิน) พบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ

ความลึกของระนาบความชื้น โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะค่อยๆมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงความลึกที่มากพอ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือค่อนข้างจะคงที่เมื่อระดับความลึกมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าหน่วยแรงดึงดูดเมตริก (σ^s) ลดลงทันทีหลังจากเริ่มขั้นตอนการแทรกซึมของน้ำฝนสู่ลาดดิน จะเห็นได้ชัดว่าในช่วงการซึมที่ดินยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ตัวแปรค่าดัชนีการซึม (i/k_s) ที่มากขึ้นจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ไม่ว่ามุมลาดชันของลาดดิน (β) จะมากหรือน้อยก็ตาม ในขณะที่ค่าดัชนีการซึม (i/k_s) เดียวกัน ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินที่มีความลาดชัน (β) มากจะลดลงเหลือน้อยกว่าในลาดดินที่มีความลาดชันน้อย



(a)



(b)

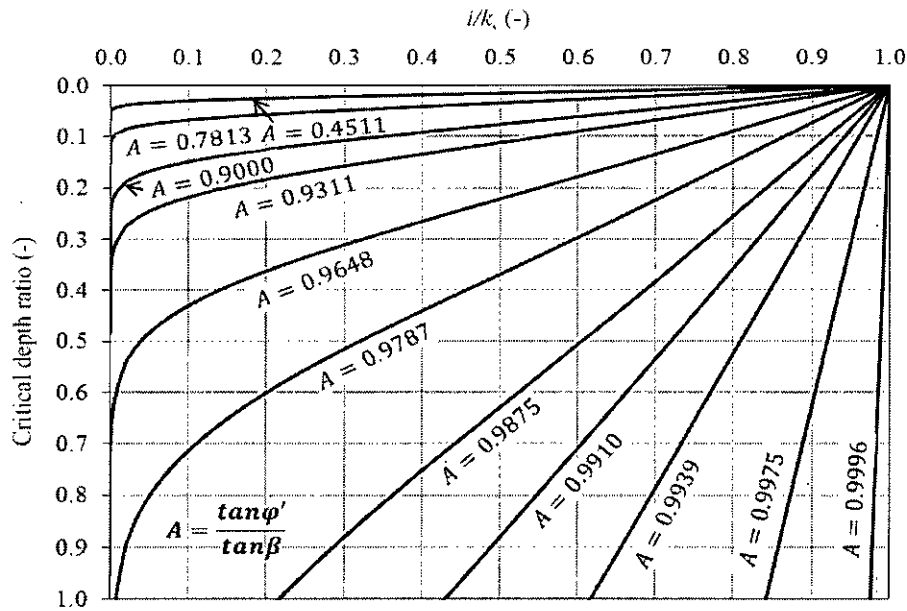
รูปที่ 4.5 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกของการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้น

(a) สำหรับค่าความซึมฝน (i) ต่างๆ และมุมลาดชันของดิน (β) เท่ากับ 40 องศา

(b) สำหรับค่าความซึมฝน (i) ต่างๆ และมุมลาดชันของดิน (β) ต่างๆ

โดยปกติดินทั่วไปจะอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แรงดึงดูดเมทริกจะมีค่าเป็นลบซึ่งจะแปรกลับมีค่าเป็นบวกด้วยค่าที่เท่ากันเมื่อดินอยู่ในสภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ลาดดินอาจจะวิบัติระหว่างช่วงการซึมผ่านจนถึงช่วงที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้น ในดินทรายที่ไม่มีค่าเชื่อมแน่น ($c' = 0 \text{ kN/m}^2$) ตามสมการที่ 3.4 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะขึ้นอยู่กับค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน (ϕ') เทียบกับมุมลาดชันของดิน (β) ด้วยเหตุนี้การวิบัติของลาดดินดินที่มีความลาดชันสูง ($\beta > \phi'$) จะเกิดขึ้นในช่วงการซึมผ่าน (Infiltration phase) ในขณะที่การวิบัติของลาดดินดินที่มีความลาดชันต่ำ ($\beta \leq \phi'$) จะเกิดขึ้นในช่วงการดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation phase)

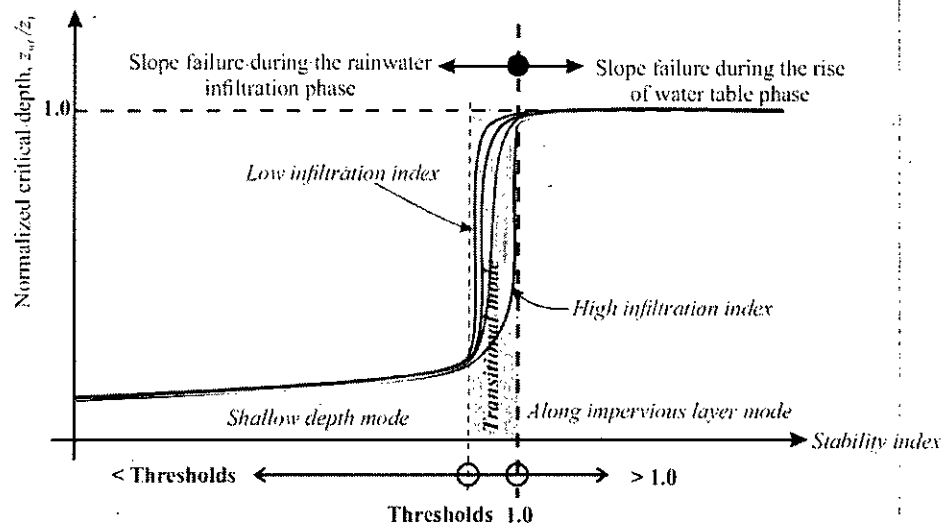
การทำนายหาตำแหน่งการเกิดระนาบวิบัติ หรือความลึกระนาบวิกฤติในลาดดิน ในช่วงดินอิ่มตัวด้วยน้ำนั้นง่ายมาก เพราะว่ามันจะเกิดขึ้นตรงรอยต่อระหว่างชั้นดินกับชั้นที่บ้น้ำเสมอ ในขณะที่ตำแหน่งการเกิดระนาบวิกฤติในช่วงการซึมผ่านที่ดินยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะแปรผันตามตัวแปรปัจจัยอิทธิพลต่างๆที่สำคัญ ได้แก่ คุณสมบัติของดิน ค่าความชื้นผืน มุมลาดชันของลาดดิน ดังนั้น เพื่อให้สะดวกในการประเมินหาตำแหน่งการเกิดระนาบวิกฤติ จึงทำการแปรค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน (Normalization) เป็นค่าดัชนีความลึกระนาบวิกฤติซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง ค่าความลึกระนาบวิกฤติต่อค่าความหนาของชั้นดินทั้งหมดในแนวตั้ง (Z_{wf}/Z_t) จากนั้นทำเป็นแผนภูมิความสัมพันธ์กับค่าดัชนีการซึม (i/k_s) และค่าดัชนีเสถียรภาพลาดดิน (stability index , $A = \tan \phi' / \tan \beta$) เรียกว่า แผนภูมิความลึกระนาบวิกฤติ (Critical depth chart) แสดงดังแผนภูมิในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าดัชนีเสถียรภาพลาดดิน (A) มีค่าระหว่าง 0.9 ถึง 1.0 ค่าความลึกระนาบวิกฤติ (Z_{wf}) จะเพิ่มขึ้นตามค่าดัชนีการซึม (i/k_s) อย่างชัดเจน ในขณะที่เมื่อค่าดัชนีเสถียรภาพลาดดินน้อยกว่า 0.9 ค่าความลึกระนาบวิกฤติจะเกิดขึ้นระดับตื้นมากๆ โดยมีค่าดัชนีความลึกระนาบวิกฤติ (Z_{wf}/Z_t) น้อยกว่า 0.2



รูปที่ 4.6 แผนภูมิความลึกวิกฤต (Critical depth chart)

4.5 การจำแนกประเภทของดินโคลนถล่ม

ในการนำแผนภูมิความลึกวิกฤต (Critical depth chart) มาใช้งานเพื่อการเฝ้าระวังแจ้งเตือนภัยดินถล่มล่วงหน้า (Early warning) ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของแต่ละบุคคลที่จะกำหนดค่าให้มีความไวต่อการตอบสนองเมื่อมีฝนตกมากน้อยแค่ไหน ด้วยเหตุนี้ การพิจารณาหาจุดที่ค่าดัชนีเสถียรภาพลาดดิน (Stability index) ต่ำสุดที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของเสถียรภาพลาดดินจนเกิดดินถล่ม หรือที่เรียกว่า “Threshold” จึงเป็นหลักเกณฑ์สำคัญในการกำหนดค่ามาตรฐานดัชนีเสถียรภาพลาดดินเพื่อการแจ้งเตือนภัยล่วงหน้า หรือเป็นค่าเสถียรภาพลาดดิน (Stability number) นั้นคือจุดที่ค่าดัชนีเสถียรภาพลาดดินเท่ากับ 0.9 ($A = \tan \phi' / \tan \beta = 0.9$) และค่าอัตราส่วนความลึกวิกฤตไม่มากกว่า 0.2 ($Z_w / Z_t \leq 0.2$) อธิบายให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นดังรูปที่ 4.7 สามารถจำแนกรูปแบบการวิบัติได้ 3 ประเภทคือ การวิบัติตามแนวรอยต่อระหว่างชั้นดินกับชั้นตึบน้ำ (Along the impervious layer mode) การวิบัติระดับตื้น (Shallow depth mode) ซึ่งจะเกิดบริเวณผิวหน้าของลาดดิน และการวิบัติช่วงเปลี่ยนผ่าน (Transitional mode) ซึ่งระนาบวิบัติจะเกิดขึ้นถัดไปจากแนววิบัติระดับตื้นจนถึงแนวรอยของชั้นตึบน้ำ



รูปที่ 4.7 อธิบายรูปแบบการวิบัติในลาดดินด้วยค่าเสถียรภาพลาดดิน (Stability number)

จากการพิจารณาค่าเสถียรภาพลาดดิน (Stability number) จุด “Threshold” จะเป็นจุดหนึ่งของค่าเสถียรภาพลาดดินนี้ สามารถอธิบายรูปแบบการวิบัติของลาดดินได้ดังนี้

1) สำหรับลาดดินที่มีความลาดชันน้อย หมายถึง ลาดดินที่มีค่าดัชนีเสถียรภาพ มากกว่าหรือเท่ากับ 1 ($\tan \phi' / \tan \beta \geq 1.0$) รูปแบบการวิบัติจะอยู่ตามแนวรอยต่อระหว่างชั้นดินกับชั้นหินน้ำ (Along the impervious layer mode) โดยกลไกเหนี่ยวนำจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำที่เป็นบวกในช่วงดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation phase)

2) สำหรับลาดดินที่มีความลาดชันมาก หมายถึง ลาดดินที่มีค่าดัชนีเสถียรภาพ น้อยกว่า 1 ($\tan \phi' / \tan \beta < 1.0$) กลไกเหนี่ยวนำจากการสูญเสียแรงดึงดูดเมทริกในช่วงการซึมน้ำลงสู่ลาดดิน (Infiltration phase) รูปแบบการวิบัติจะขึ้นอยู่กับค่าเสถียรภาพลาดดิน ดังนี้

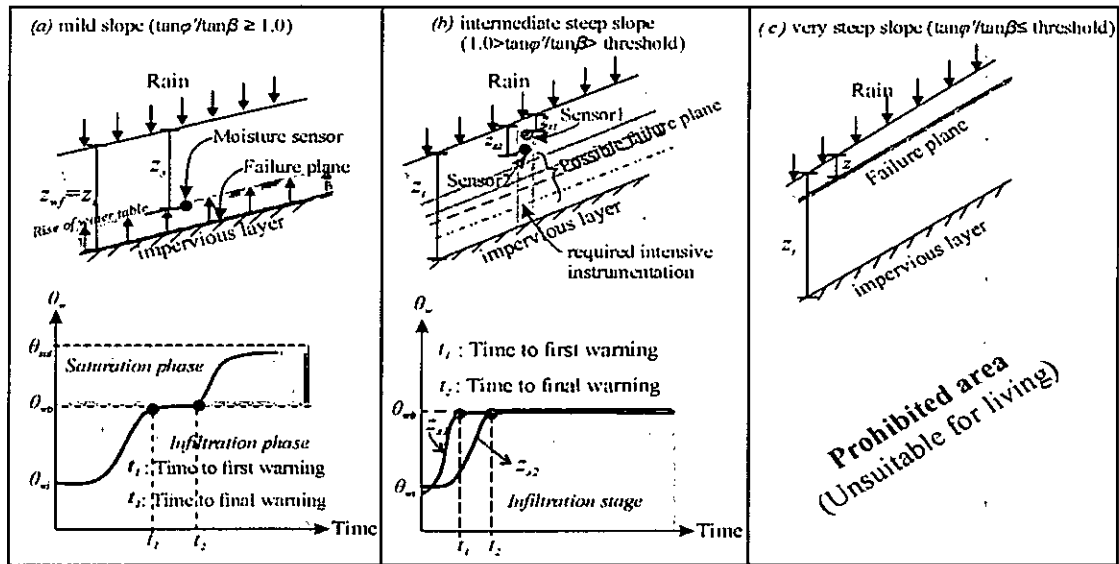
- ถ้าค่าเสถียรภาพลาดดินน้อยกว่าค่า Threshold หรือมีค่าน้อยกว่า 0.9 รูปแบบการวิบัติจะเป็นการวิบัติระดับตื้น (Shallow depth mode)
- ถ้าลาดดินมีความลาดชันไม่เกินค่ามุมเสียดทานภายในของดิน ในที่นี้หมายถึง ช่วงค่า $\tan \phi' / \tan \beta$ อยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.0 รูปแบบการวิบัติจะเป็นการวิบัติช่วงเปลี่ยนผ่าน (Transitional mode) ซึ่งความลึกระดับวิบัติจะแปรผันตามค่าดัชนีการซึม

ผลการศึกษานี้ สอดคล้องกับ Chinkulkijniwat et al., 2016 ที่กล่าวว่าสถานะการวิบัติของลาดดินตื้นที่มีมุมลาดชันสูงถูกกำหนดโดย $\beta > \phi'$ อาจเกิดขึ้นในช่วงของระยะการไหลซึม อย่างไรก็ตามสถานะการวิบัติของลาดดินที่มีมุมลาดชันต่ำๆ ($\beta \leq \phi'$) อาจเกิดขึ้นในช่วงของระยะอิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ตามรูปที่ 4.7 จะสามารถวิเคราะห์หารูปแบบการวิบัติและแนวทางการแจ้งเตือนภัยล่วงหน้า ตามรูปที่ 4.8 โดยสรุปดังนี้

4.5.1 ลาดดินมีความชันน้อย (Mild slope) หมายถึง ลาดดินที่มีค่าเสถียรภาพลาดดิน (Stability number) ไม่ต่ำกว่า 1.0 ($\tan \phi' / \tan \beta \geq 1.0$) รูปแบบการวิบัติจะอยู่ตามแนวรอยต่อระหว่างชั้นดินกับชั้นตึบน้ำ (Along the impervious layer mode) ดังนั้น จึงควรติดตั้งอุปกรณ์แจ้งเตือนภัยใกล้ๆ ผิวรอยต่อของชั้นตึบน้ำเพื่อตรวจจับการเพิ่มสูงขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน

4.5.2 ลาดดินมีความชันปานกลาง (Intermediate steep slope) หมายถึง ลาดดินที่มีค่าเสถียรภาพลาดดิน (Stability number) มีค่าสูงเกินค่า Threshold แต่ยังคงต่ำกว่า 1.0 ($1.0 > \tan \phi' / \tan \beta > \text{threshold}$) รูปแบบการวิบัติจะเป็นการวิบัติช่วงเปลี่ยนผ่าน (Transitional mode) โดยระยะการวิบัติเกิดขึ้นได้หลายระยะในลาดดิน ดังนั้น จึงควรติดตั้งอุปกรณ์แจ้งเตือนภัยประมาณกึ่งกลางชั้นดิน หรือต่ำกว่าผิวหน้าลาดดินลงไปพอสมควร เพื่อตรวจจับหาค่าความชื้นหลังระนาบความชื้น (Behind wetting front, θ_{wb})

4.5.3 ลาดดินมีความชันมาก (Very steep slope) หมายถึง ลาดดินที่มีค่าเสถียรภาพลาดดิน (Stability number) ไม่เกินกว่าค่า Threshold ($\tan \phi' / \tan \beta \leq \text{threshold}$) รูปแบบการวิบัติจะเป็นการวิบัติระดับตื้น (Shallow depth mode) และจะเกิดขึ้นทันทีหลังฝนตกหนัก การแจ้งเตือนภัยจึงเป็นการห้ามผู้คนเข้าไปอยู่อาศัยบริเวณนั้น



รูปที่ 4.8 แบบจำลองรูปแบบการวิบัติของลาดดินที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือวัด
การเปลี่ยนแปลงความชื้นในลาดดินในสภาวะฝนตก

(a) for mild slope ($\tan \phi' / \tan \beta \geq 1.0$),

(b) for intermediate steep slope ($1.0 > \tan \phi' / \tan \beta > \text{threshold}$) and

(c) for very steep slope ($\tan \phi' / \tan \beta \leq \text{threshold}$)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองลาดดินทราย (ดินไม่มีค่าเชื่อมแน่น) และน้ำฝนที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นผิวดินต่อการตอบสนองทางชลศาสตร์ของลาดดินที่มีความลาดชันแตกต่างกัน โดยใช้เครื่องมือวัดความชื้นตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน ภายใต้เหตุการณ์จำลองสภาวะรับน้ำฝนในอัตราคงที่ โดยควบคุมค่าความชื้นผิวดิน (i) ไม่ให้เกินกว่าค่าความชื้นผิวดินได้ของน้ำในลาดดิน (k_s) หรือ $i < k_s$ ซึ่งคุณสมบัติของลาดดินจะสามารถรองรับปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาได้สูงสุดในอัตรา 554 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงได้โดยไม่เกิดน้ำท่วมขังบนผิวดินลาดดิน ($k_s = 1.54 \times 10^{-4} \text{ m/sec} = 554.4 \text{ mm/hr}$) รวมทั้งทำการวิเคราะห์เพื่อให้เห็นถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดินต้น ผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ส่งสัญญาณเตือนภัยดินถล่มล่วงหน้า (Early warning) ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลการทดสอบและการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การตอบสนองต่อความชื้นภายในลาดดินต่อน้ำฝน แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่แบ่งเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกที่เกิดการเคลื่อนตัวของระนาบความชื้นจากการไหลซึมของน้ำฝน (Infiltration phase) และช่วงที่สองหลังจากดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation phase) จะเกิดการก่อตัวของระดับน้ำใต้ดินตามมา

2. ค่าความชื้นผิวดิน (i) มีอิทธิพลอย่างมากต่อการตอบสนองต่อความชื้นของลาดดินทั้งในช่วงไหลซึม และช่วงดินอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยในช่วงแรกเมื่อน้ำไหลซึมลงสู่ลาดดิน ค่าความชื้นผิวดินที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของความชื้นหลังระนาบความชื้น (θ_{wb}) รวดเร็วยิ่งขึ้น และในช่วงที่สองที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว ค่าความชื้นผิวดินที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

3. ความชันของลาดดิน (β) ไม่ว่าจะมีความลาดชันมาก หรือลาดชันน้อยจะไม่มีผลต่อการตอบสนองต่อความชื้นของลาดดินในช่วงการไหลซึมผ่าน แต่อย่างไรก็ตามในช่วงดินอิ่มตัวด้วยน้ำลาดดินที่มีความลาดชันน้อยๆ จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้นได้มากกว่า ลาดดินที่มีความชันมากๆ

4. ลาดดินที่ไม่มีค่าความเชื่อมแน่น (ดินทราย) ที่มีความลาดชันมากๆ พิจารณาจากค่ามุมลาดเอียงของลาดดินจะมีค่ามากกว่าค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน ($\beta > \phi'$) การวิบัติของลาดดินเมื่อมีเหตุการณ์ฝนตก มักจะเกิดขึ้นในช่วงการไหลซึมผ่าน (Infiltration phase) ในขณะที่

ลาดดินที่มีความลาดชันน้อยๆ ($\beta \leq \phi'$) การวิบัติของลาดดินมักจะเกิดขึ้นในช่วงดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation phase)

5. สำหรับลาดดินที่มีความลาดชันมาก ดิน ($\beta > \phi'$) ความลึกระนาบวิบัติ (failure plane) จะสามารถเกิดขึ้นได้หลายระนาบระหว่างความลึกถัดลงไปจากผิวหน้าลาดดินจนถึงใกล้แนวรอยต่อของชั้นดินกับชั้นที่บ้น้ำ (Impervious layer) โดยความลึกของแนวระนาบวิบัติจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีความซึมผ่าน (Infiltration index, i/k_r) และค่าดัชนีเสถียรภาพลาดดิน (Stability index, $\tan \phi'/\tan \beta$)

6. “Threshold” หมายถึง ค่าเสถียรภาพลาดดินจุดต่ำสุดที่เริ่มมีการก่อตัวของความลึกวิกฤติ (Critical depth) ที่ทำให้ค่าเสถียรภาพลาดดินลดลง ซึ่งสามารถนำมาจำแนกประเภทและรูปแบบการวิบัติของลาดดิน ในการเสนอแนะตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์แจ้งเตือนภัยล่วงหน้า (Early warning) ได้อย่างแม่นยำ และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนี้

6.1 ลาดดินมีความชันน้อย (Mild slope) หมายถึง ลาดดินที่มีค่าเสถียรภาพลาดดิน (Stability number) ไม่ต่ำกว่า 1.0 ($\tan \phi'/\tan \beta \geq 1.0$) รูปแบบการวิบัติจะอยู่ตามแนวรอยต่อระหว่างชั้นดินกับชั้นที่บ้น้ำ (Along the impervious layer mode) ดังนั้น จึงควรติดตั้งอุปกรณ์แจ้งเตือนภัยใกล้ๆ ผิวรอยต่อของชั้นที่บ้น้ำเพื่อตรวจจับการเพิ่มสูงขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน

6.2 ลาดดินมีความชันปานกลาง (Intermediate steep slope) หมายถึง ลาดดินที่มีค่าเสถียรภาพลาดดิน (Stability number) มีค่าสูงเกินค่า Threshold แต่ยังต่ำกว่า 1.0 ($1.0 > \tan \phi'/\tan \beta > \text{threshold}$) รูปแบบการวิบัติจะเป็นการวิบัติช่วงเปลี่ยนผ่าน (Transitional mode) โดยระนาบวิบัติเกิดขึ้นได้หลายระนาบในลาดดิน ดังนั้น จึงควรติดตั้งอุปกรณ์แจ้งเตือนภัยประมาณกึ่งกลางชั้นดิน หรือต่ำกว่าผิวหน้าลาดดินลงไปพอประมาณ เพื่อตรวจจับหาค่าความชื้นหลังระนาบความชื้น (Behind wetting front, θ_{wb})

6.3 ลาดดินมีความชันมาก (Very steep slope) หมายถึง ลาดดินที่มีค่าเสถียรภาพลาดดิน (Stability number) ไม่เกินกว่าค่า Threshold ($\tan \phi'/\tan \beta \leq \text{threshold}$) รูปแบบการวิบัติจะเป็นการวิบัติระดับตื้น (Shallow depth mode) และจะเกิดขึ้นทันทีหลังฝนตกหนัก การแจ้งเตือนภัยจึงเป็นการห้ามผู้คนเข้าไปอยู่อาศัยบริเวณนั้น

การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองเชิงกลศาสตร์และเสถียรภาพของลาดดินดินจะได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นผิวน มุมลาดชันของดิน และมุมเสียดทานภายในของดิน อย่างไรก็ตามการศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการซึ่งอยู่ในสภาวะที่ควบคุมได้ โดยในธรรมชาติเป็นเรื่องยากที่ผิวนจะตกด้วยความชื้นผิวนคงที่ และควบคุมลาดดินไม่ให้มีพืชพันธุ์ไม้งอกขึ้นตามผิวหน้าลาดดินได้ ดังนั้น จึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติมปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการ

ตอบสนองทางศาสตร์อื่นๆ เช่น ความชื้นเริ่มต้นของดิน ความเข้มข้นไม่คงที่ รากพืชในลาดดินตาม
ธรรมชาติ เพื่อรวบรวมองค์ความรู้ให้ครบถ้วน และมีแนวทางการวางตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือและ
อุปกรณ์แจ้งเตือนล่วงหน้าที่แม่นยำมากขึ้น สามารถนำไปใช้งานได้จริงในลาดดินที่มีอยู่ในธรรมชาติได้

เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม.

ธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย ความรู้ทั่วไปด้านธรณีพิบัติภัย. สืบค้นจาก

http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=99799&filename=index

กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. สำนักวิจัยพัฒนาและอุทกวิทยา.

ระบบปฏิบัติการเฝ้าระวังและเตือนภัยล่วงหน้า (Early Warning System) น้ำหลาก-

ดินถล่ม. สืบค้นจาก http://202.129.59.76/website/ews_all/index.php

กวี จรุงทวีเวทย์. (2546). การศึกษาผลรากหญ้าแกห้อมต่อการเพิ่มกำลังเฉือนของดินทราย

ปนทรายแป้ง(วิทยานิพนธ์ปริญญาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี).

มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น. 79 หน้า.

วรากร ไม้เรียง. (2542). วิศวกรรมเขื่อนดิน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.

วรากร ไม้เรียง, เสรี ศุภราทิตย์, ธวัชชัย ดิงสัญชลี, และเลิศศักดิ์ รั้วตระกูลไพบูลย์. (2546).

โครงการวิจัยการพัฒนาแผนหลักการจัดการภัยธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับน้ำ น้ำท่วม

น้ำแล้งและแผ่นดินถล่ม กรุงเทพมหานคร. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว).

488 หน้า

วรวิฑูรย์ ตันตวินิช. (2535). รายงานธรณีพิบัติภัยเนื่องจากแผ่นดินถล่มที่บ้านกระทุงเหนือ จังหวัด

นครศรีธรรมราช. กรุงเทพมหานคร : กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี. 31 หน้า.

วรวิฑูรย์ ตันตวินิช. (2548). การจัดการพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม. กรุงเทพมหานคร: กองธรณีวิทยา

สิ่งแวดล้อมกรมทรัพยากรธรณี. 57 หน้า.

ศุภสิทธิ์ คนใหญ่. (2552). การพัฒนาวิธีการวัดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของ

น้ำและมวลสารในดินเค็มที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต).

มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

สันติ ไทยยืนวงษ์. (2553). การวิเคราะห์โอกาสเกิดดินถล่มโดยวิธีทางธรณีวิศวกรรม โดยพิจารณา

จากปัจจัยที่ไม่คงที่ในภาคใต้ของประเทศไทยพื้นที่ฝั่งทะเลอันดามัน (วิทยานิพนธ์ปริญญา

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

- Ali A, Huang J, Lyamin AV, Sloan SW, and Cassidy MJ. (2014a). **Boundary effects of rainfall-induced landslides**. *Computers and Geotechnics* 61:341-354.
- Ali A, Huang J, Lyamin AV, Sloan SW, Griffiths DV, Cassidy MJ, and Li JH. (2014b). **Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modelled by infinite slopes**. *Engineering Geology* 179:102-116.
- Asian Disaster Preparedness Center (ADPC). **Safer communities and sustainable development through disaster risk reduction**. Retrieved from <http://www.adpc.net/v2007/ikm/ADPC%20MONTHLY%20UPDATES/2006/Sep/Sep2006-B.asp>
- ASTM (1999). "Standard Test Method for Classification Of Soils For Engineering Purposes", ASTM D2487-69, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- ASTM (1999). "Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge", ASTM D6836-02, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- ASTM (1999). "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions", ASTM D3080-04, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- ASTM (1999). "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard", ASTM D698, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- ASTM (1999). "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", ASTM D422-63, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- ASTM (1999). "Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)", ASTM D2434-68, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.

- ASTM (1999). "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", ASTM D854-14, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- 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.
- Coulomb, C. A. (1776). **Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture**. *Mem. Acad. Roy. Div. Sav.*, vol. 7, pp. 343-387.
- Duncan, 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.
- Fellenius, W. (1927). *Erdstatistische berechnungen mit reibung und koresion*, Ernest

Berlin.

Fredlund, D.G. (1996). **The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics.**

The Fourth Spencer J. Buchanan Lecture, College Station, Texas, A & M University Press, 39 pp.

Fredlund DG, and Morgenstern NR. (1976). **Constitutive relations for volume in unsaturated soils.** Canadian Geotechnical Journal 13:261-276.

Fredlund DG, Morgenstern NR, and Widger RA. (1978). **The shear strength of unsaturated soil.** Canadian Geotechnical Journal 15:313-321.

Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1993). **Soil mechanics for unsaturated soils.** Wiley, New York.

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.

Glawe, U. (2004). **Natural slope mass movement leading to Hazard : Classification Theory and Field assessment.** International seminar on Natural Disaster mitigation and Issues on technology transfer in South and Southeast Asia. JICA regional seminar. Tribhuvan University, Katmandu, Nepal, p. 1-19.

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.

Highland, L.M., and Bobrowsky, Peter. (2008). **The landslide handbook—A guide to understanding landslides.** Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.

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.
- 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*, 130(10), 106301076.

- Lu N, and Likos WJ. (2006). **Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Geology, 132(2):131-142.
- 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.
- Meyer PD, and Gee GW. (1999). **Flux-based estimation of field capacity.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 125(7):595-599.
- 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.
- Pantanahiran, Wichai. (1994). **The Use of Landsat Imagery and Digital Terrain Models to Assess and Predict Landslide Activity in Tropical Areas.** Bangkok.
- 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.
- 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 of Unsaturated and Collapsible Soils, G19, 371-399.

- 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.
- Scoot, 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 hill slope 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.
- Soil Science Glossary Terms Committee. (2008). **Glossary of Soil Science .Terms 2008.** Madison: SSSA: pp. 92.
- 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.
- Vanapalli SK, Fredlund DG, Pufahl DE, and Clifton AW. (1996). **Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction.** Canadian Geotechnical Journal 33(3):379–392.
- 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.

Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall

Avirut CHINKULKIJNIWAT^{1*}  <https://orcid.org/0000-0003-4905-7991>;  e-mail: avirut@sut.ac.th

Taworn TIRAMETATIPARAT¹  <https://orcid.org/0000-0001-5027-5537>; e-mail: D5840519@g.sut.ac.th

Chanathip SUPOTAYAN¹  <https://orcid.org/0000-0001-8289-4666>; e-mail: ch.supotayan@gmail.com

Somjai YUBONCHIT^{1,2}  <https://orcid.org/0000-0003-3434-9537>; e-mail: d5540150@g.sut.ac.th

Suksun HORPIBULSUK¹  <https://orcid.org/0000-0003-1965-8972>; e-mail: suksun@g.sut.ac.th

Rattana SALEE¹  <https://orcid.org/0000-0001-5411-399X>; e-mail: saleerattana6155@gmail.com

Panich VOOTTIPRUEX³  <https://orcid.org/0000-0002-9474-2915>; e-mail: pnv@fte.kmutnb.ac.th

* Corresponding author

¹ School of Civil Engineering, Center of Excellence in Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

² Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

³ Department of Teacher Training in Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok 10800, Thailand

Citation: Chinkulkijniwat A, Tirametatiyarat T, Supotayan C, et al. (2019) Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall. *Journal of Mountain Science* 16(9). <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5523-7>

© Science Press, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

Abstract: Rainfall-induced shallow landslides are known to be extremely dangerous since the sliding mass can propagate quickly and travel far from the source. Although the sliding mechanism in sloping ground is simple to understand, the problem may be complicated by unsaturated transient water flow. The flow behavior of rainwater in unsaturated sloping ground and the consequent factor of safety must be clearly understood to assess slope stability under rainfall conditions. A series of laboratory experiments was conducted to examine the critical hydrological states so that assessment of slope stability under rainfall condition can be performed. Based on the test results, a unique relationship between critical hydrological states, rainfall intensity, and soil properties was formulated. Sequential stability

analysis provided insights into the stability of slopes subjected to variations in soil properties, slope angles and rainfall intensities, and the consequent variation in the depth of the failure plane, vital in landslide risk assessment, was determined through this analysis. The variation of rainfall intensity was found to strongly affect the depth of the failure plane in cohesionless sloping ground. Furthermore, the influence of rainfall intensity on the depth of the failure plane may be alleviated by a small magnitude of cohesive strength. The results of this study will reinforce knowledge of landslide behavior and help to improve mitigation measures in susceptible areas.

Keywords: Shallow landslides; Rainfall; Failure depth

Received: 12-Apr-2019

Revised: 23-May-2019

Accepted: 25-Jun-2019

Introduction

Rainfall-induced landslides are natural disasters that are encountered in many parts of the world and they always result in massive destruction and loss of human life (Yumuang 2006; Guzzeti et al. 2008). Among the various types of landslides, shallow landslides present a special danger since they can potentially initiate debris flow (Trustrum et al. 1999), particularly when rainfall continues after the initiation of the failure. The huge scale of damage caused by shallow landslides has been reported in the literature (Gabet and Mudd 2006; Postance et al. 2018). Shallow landslides are typically translational slope failures that involve the upper few meters of unconsolidated surficial material. Recent reports (Li et al. 2013; Chinkulkijniwat et al. 2016; Yubonchit et al. 2016; Naidu et al. 2018) have concluded that, for rainfall-induced translational slides in terrains of homogeneous soil, the sliding failure can be categorized as occurring in two major phases: the infiltration phase and the saturation phase. In the infiltration phase, rainwater infiltrates the sloping ground advancing the wetting zone. If the failure takes place in this phase, the failure plane can occur at any depth depending on factors such as the slope angle, rainfall intensity, and soil properties. The saturation phase takes place during the rising of the water table, which initially occurs after rainwater reaches the impermeable interface. In this phase, the failure plane occurs only at the impervious interface.

The ability to predict the depth of the failure plane is vital when assessing slope stability during a rainfall event. A number of reports (Shimoma et al. 2002; Chaminda 2006; Tohari et al. 2007) found that slope failure is initiated at the slope toe since the fully saturated condition of soil at this position results in the development of excessive positive pore water pressure. However, their findings were based on homogeneous soil slopes, where the dominant failure mode will be a circular or noncircular sliding failure. Although the danger of shallow landslides has been recognized, reports that focused on the depth of the failure plane in shallow landslides have been limited in number (Tsai et al. 2008; Li et al. 2013; Ali et al. 2014; Chinkulkijniwat et al. 2016) and few attempted a rigorous understanding of the stability

characteristics of shallow landslides.

Chinkulkijniwat et al. (2016) were among the few to attempt a characterization of the stability of shallow landslides that took multiple factors into account. They conducted a series of artificial rainwater infiltration tests and introduced a mathematical model to approximate the magnitude of water content in sloping ground subjected to a certain magnitude of rainfall intensity. This approximated water content was used to create a profile of the factor of safety of a sloping terrain subjected to various magnitudes of rainfall intensity. Subsequently, they developed a critical depth chart based on relationships between the depth of the failure plane, the rainfall intensity and the steepness of various slopes. The stability of shallow slopes was then characterized via the critical depth chart and, using this chart, the possible depth of the failure plane was comprehensively defined. They reported that the depth of the failure plane can be determined from the soil frictional angle (ϕ'), the soil saturated permeability (k_s), the steepness of the slope (β), and the rainfall intensity (i). However, the conclusions of Chinkulkijniwat et al. (2016) were limited to cohesionless sandy soil possessing no fine fraction. Soils in mountainous terrain typically possess both a certain amount of fine fraction and either intrinsic cohesive strength or apparent cohesive strength, especially due to plant roots, which reinforce soil by their tensile strength and adhesion properties to form enclosed root matrix systems that give soil additional apparent cohesion (Tosi 2007; Burylo et al. 2011). Failure characteristics of these soils might well differ from those of cohesionless sandy soil.

To further knowledge of the stability characteristics of sloping grounds, this study extends the work of Chinkulkijniwat et al. (2016) to soils that contain a certain amount of fine fraction and possess cohesive strength. The work extended the analysis of the critical depth charts for various soil types so that a comparison among the stability characteristics of different soils could be thoroughly interpreted. The study began with a series of laboratory tests to clarify the hydrological behavior of the studied soils and, based on the conclusions drawn for hydrological behavior, continued by analyzing the stability of the soils using the infinite slope model under various

rainfall intensities. Results from this study will reinforce related research that seeks to design landslide mitigation measures.

1 Hydrological State at the Wetting Front

For a ponded surface, the maximum water content during the infiltration phase is equal to the saturated water content, Green and Ampt (1911). However, in the case of an unponded surface, although Mein and Larson (1973) and Chu (1978) elaborated the model proposed by Green and Ampt (1911), they did not clearly elaborate the maximum magnitude of water content during the infiltration process, which in the present work is termed water content behind the wetting front, θ_{wb} . Mostly, the saturated water content was assumed without consideration of rainfall intensity and soil hydrological properties. Chinkulkijniwat et al. (2016) reported a unique relationship between θ_{wb} and the infiltration index (i/k_s), defined as the rainfall intensity (i) over the saturated soil permeability (k_s), regardless of the slope gradient and initial water content. However, their report was based only on test results from a cohesionless sand, which were considered to have distinct (or sharp) wetting front characteristics. In this work, the relationship between θ_{wb} and i/k_s found in Chinkulkijniwat et al. (2016) was further validated with two soils that possessed a certain amount of fine fraction. Furthermore, the water content (θ_w) profile of studied soils that possessed a certain amount of fine fraction was revisited to test the validity of the proposed sharp wetting front boundary during various rainfall intensities.

1.1 Laboratory tests and experimental setup

The two soils used in this study contained a certain amount of fine fraction. The soil water characteristic (SWC) curve of the studied soils was determined in accordance with the ASTM D6836-02. The air-dried soils were compacted to the retainer rings placed on a saturated ceramic plate in the pressure chamber. Saturation state was acquired by spraying water from above the soil specimens. After being encapsulated, the airtight pressure chamber was subjected to a specific air pressure in order to push the water out of the

specimens. The air pressure was kept constant until no more water was released from the chamber. The specimens were then placed into the oven to determine their water content. The above procedures were repeated for various magnitudes of air pressure. The dataset between air pressure and soil water content was used to plot the SWC curve of the studied soils. Shear strength parameters were determined from the direct shear test (ASTM D3080). Each studied soil was compacted to three identical density specimens. Direct shear testing was conducted under three normal stress levels of 50, 100 and 200 kPa with a 1 mm/min displacement rate. The strength parameters (ϕ' , c') were acquired from the peak shear stress values of shear stress-horizontal displacement plots.

A series of infiltration tests were carried out in a one-dimensional column to simulate infiltration processes in the studied soils, which were later classified as SM and SM-SP soils. Figure 1 shows the schematic diagram, dimensions and a photograph of the one-dimensional soil infiltration test apparatus. The apparatus consisted of a rainfall simulator, a steel frame and an experiment column. The experiment column was made from an acrylic tube 100 mm in diameter and 1000 mm in height. An impervious acrylic plate 15 mm thick was used as the base of the experiment column. Five holes of 5 mm diameter were made in the column 100, 200, 300, 400, and 500 mm from the base. These were for the installation of moisture sensor probes. To ensure homogeneity, 7728 grams of SM soil and 8247 grams of SP-SM soil were dried in air before being layered into the standing pipe column. Ten compacted layers 60 mm thick were put in place to create a column of soil 0.6 m high. The unit weight of the SM soil and SP-SM soil columns was 16.4 kN/m³ and 17.5 kN/m³, respectively. Five moisture sensor probes (Decagon 5TE, Decagon Devices Inc. (2007-2010)) and a piezometer were then installed. The piezometer was placed in the base of the column. An open valve was also placed in base of the column close to the piezometer to prevent the occurrence of trapped air during the tests. Rainwater infiltration tests were conducted by assigning the desired intensities of rainfall to the experiment column. The desired rainfall intensities were assigned through a well-calibrated rainfall simulator comprising a water tank, a constant

water pressure pump, a pressure gauge, a plastic pipe, a control valve, and a fine spray nozzle placed in the plastic pipe.

The experimental program is summarized in Table 1. The magnitudes of rainfall intensity used in the experiment were determined by the saturated permeability of the studied soils. Rainfall intensities of 5, 10, 20, and 45 mm/hr were assigned to the SM column, whose saturated permeability was 15 mm/hr ($k_{sat} = 4.167 \times 10^{-6}$ m/sec $\approx$ 15 mm/hr). Rainfall intensities of 10, 20, 45, 70 and 100 mm/hr were applied to the SP-SM column, whose saturated permeability was 65 mm/hr ($k_{sat} = 1.806 \times 10^{-5}$ m/sec $\approx$ 65 mm/hr). These variations were applied to demonstrate the hydrological responses under three rainfall conditions: rainfall intensity lower than the soil saturated permeability ($i < k_s$), rainfall intensity approaching the soil saturated permeability ($i \approx k_s$), and rainfall intensity greater than the soil saturated permeability ($i > k_s$). In each rainfall test, rainfall was applied until the steady state was reached. The onset of the steady state was indicated when the values for water content remained constant at all moisture sensors.

1.2 Test results

The grain-size distribution and SWC curves of the studied soils are respectively presented in

Table 1 Infiltration tests in one-dimensional column conducted in this study

Soil property	Value	
Soil type (USCS classification)	SM	SP-SM
% Clay	2	1
% Silt	36	10
% Sand	62	89
Atterberg's limits		
Liquid limit, LL (%)	19.80	NP
Plastic limit, PL (%)	14.95	NP
Plasticity index, PI (%)	4.85	NP
Specific gravity, G_s	2.59	2.62
Dry unit weight, γ_d (kN/m ³)	16.4	17.5
Soil hydrologic parameters		
Saturated permeability, k_s (mm/hr)	15	65
Saturated volumetric water content, θ_{sat}	0.350	0.323
Residual volumetric water content, θ_r	0.040	0.025
Fitting parameter, α (kPa ⁻¹)	0.112	0.186
Fitting parameter, n	1.445	1.798
Soil strength parameters		
Internal friction angle, ϕ' (°)	30	36
Cohesion, c' (kPa)	5	0

Figures 2(a) and 2(b). Atterberg's limits, specific gravity of the soil (G_s), strength parameters (ϕ' , c'), and the saturated permeability (k_s) are given in Table 2. The studied soils were classified, according to Unified Soil Classification (ASTM D2487), as silty sand (SM) and poorly graded sand with silt (SP-SM). The fine fractions were about 40% for the SM soil and about 10% for the SP-SM soil. The SWC test data were fit using the van Genuchten (VG) equation (van Genuchten 1980) written in Eq. (1) as,

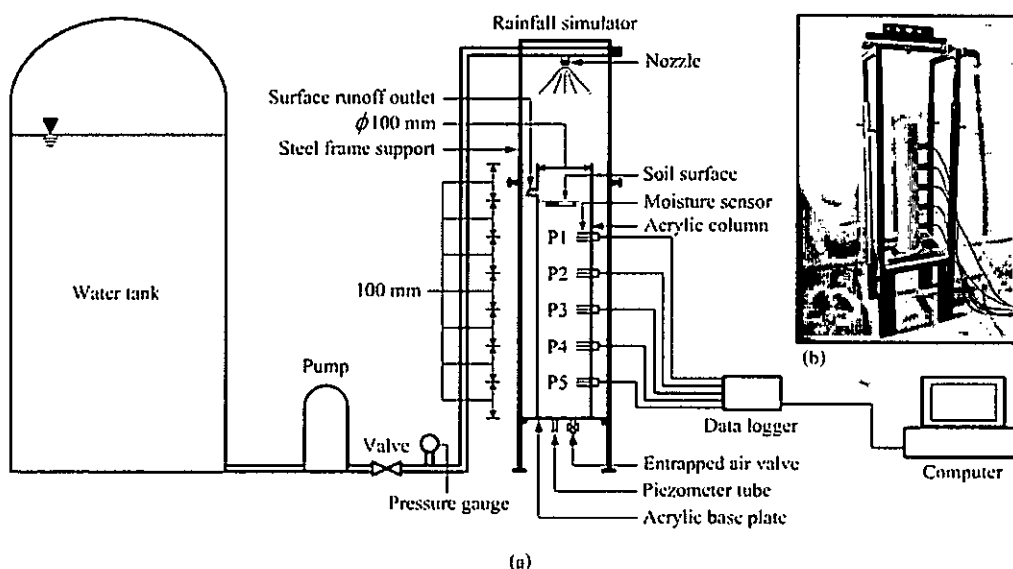


Figure 1 Schematic diagram (a) and photograph (b) of one-dimensional soil column apparatus used in this study.

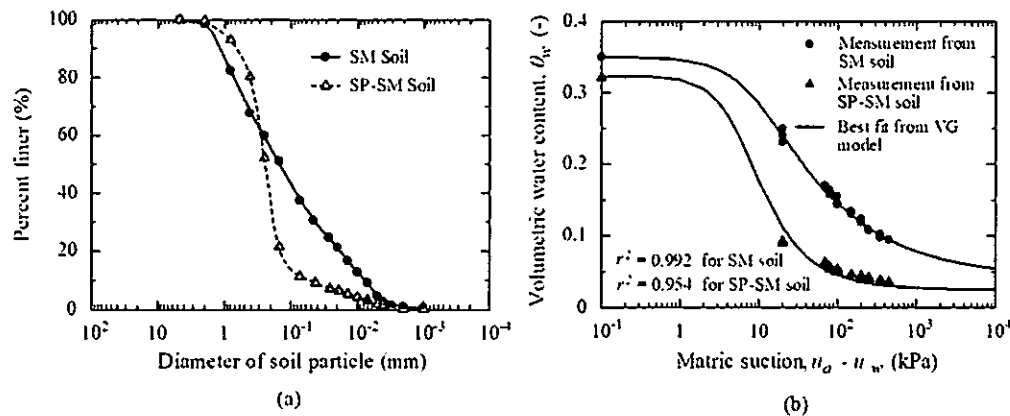


Figure 2 Properties of silty sand (SM) and poorly graded sand with silt (SP-SM) soils used in this study (a) grain size distribution curves and (b) soil water characteristic curves. (r^2 , coefficient of determination.)

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

where S_e is the effective degree of saturation, θ_w is water content, θ_r is water content at residual state, θ_{sat} is water content at saturated state, $u_a - u_w$ is matric suction, which is the difference between pore air pressure (u_a) and pore water pressure (u_w), and α and n are VG parameters relating to the inverse of air-entry pressure, and pore size distribution, respectively. The validated VG parameters for the tested soils are given in Table 2.

Table 2 Summary of properties of soils used in this study

Experiment No.	Soil used	γ_d (kN/m ³)	i (mm/hr)	i/k_s
1	SM	16.4	5	0.333
2	SM	16.4	10	0.667
3	SM	16.4	20	1.333
4	SM	16.4	45	3.000
5	SP-SM	17.5	10	0.154
6	SP-SM	17.5	20	0.308
7	SP-SM	17.5	45	0.692
8	SP-SM	17.5	70	1.077
9	SP-SM	17.5	100	1.538

Notes: γ_d , dry unit weight; i , rainfall intensity; k_s , saturated permeability; i/k_s , infiltration index.

Figures 3 and 4 respectively present the time series plots of θ_w and the development of the θ_w profile in the SM column subjected to various rainfall intensities. Test results obtained from the SP-SM column (Figures 5 and 6) were similar to

those from the SM column. The θ_w responses clearly depended on the magnitude of rainfall intensity and could be classified according to the i/k_s ratio. When $i/k_s < 1.0$, the response of θ_w could be categorized into infiltration and saturation phases. In the infiltration phase, the volumetric water content increased from its initial value (θ_{wi}) to the maximum volumetric moisture content, known as the volumetric water content behind the wetting front (θ_{wb}).

Figure 6 presents the θ_w profile in the SM-SP soil. The value of θ_w changed from θ_{wi} to θ_{wb} within two consecutive probes, which implied the presence of a sharp wetting front. The θ_w profile in SM soil (Figure 4) showed that the θ_w increased immediately from θ_{wi} to an intermediate magnitude of θ_w before slightly increasing again to a final value of θ_{wb} . These results indicated that the wetting front in the SM soil was not as distinct as it was in the SM-SP soil, although the various values of θ_w in the wet zone were very close to θ_{wb} . Soon after the wetting front reached the impervious bottom, the saturation phase began as θ_w , the volumetric water content, increased from θ_{wb} to the saturated water content ($\theta_{sat} = 0.35$). This increase in water content corresponded to the rising of the water table. When $i/k_s \geq 1.0$, θ_w increased from θ_{wi} to $\theta_{sat} = 0.35$ since water started infiltrating into the soil column. Once the

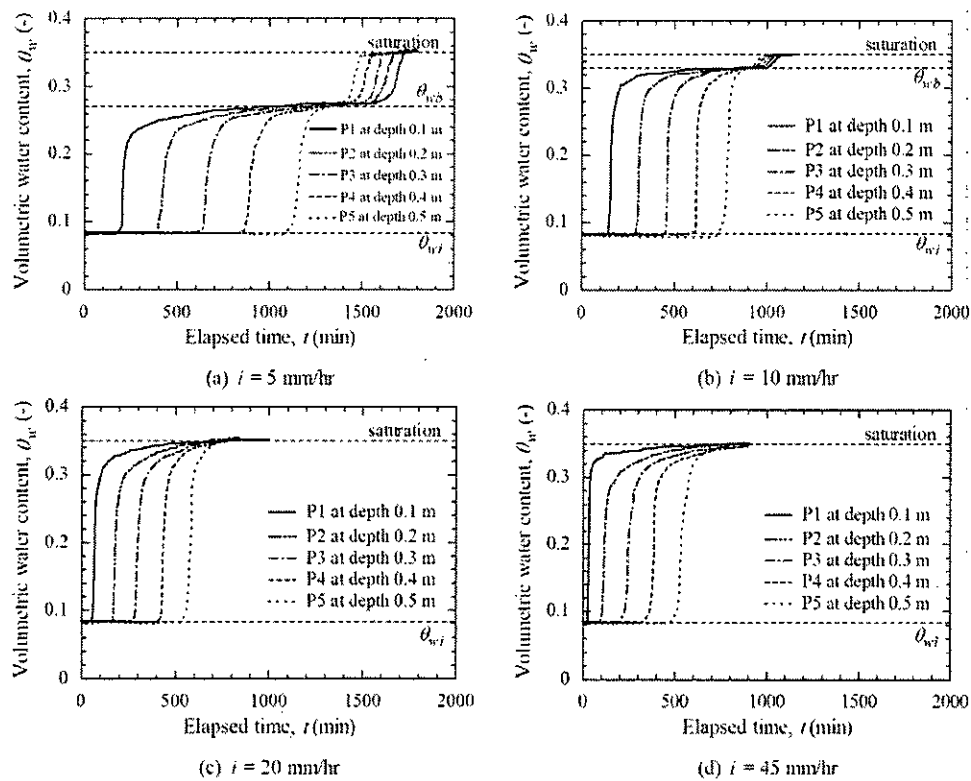


Figure 3 Time series plots of volumetric water content (θ_w) in the silty sand (SM) column for various magnitudes of rainfall intensity (i).

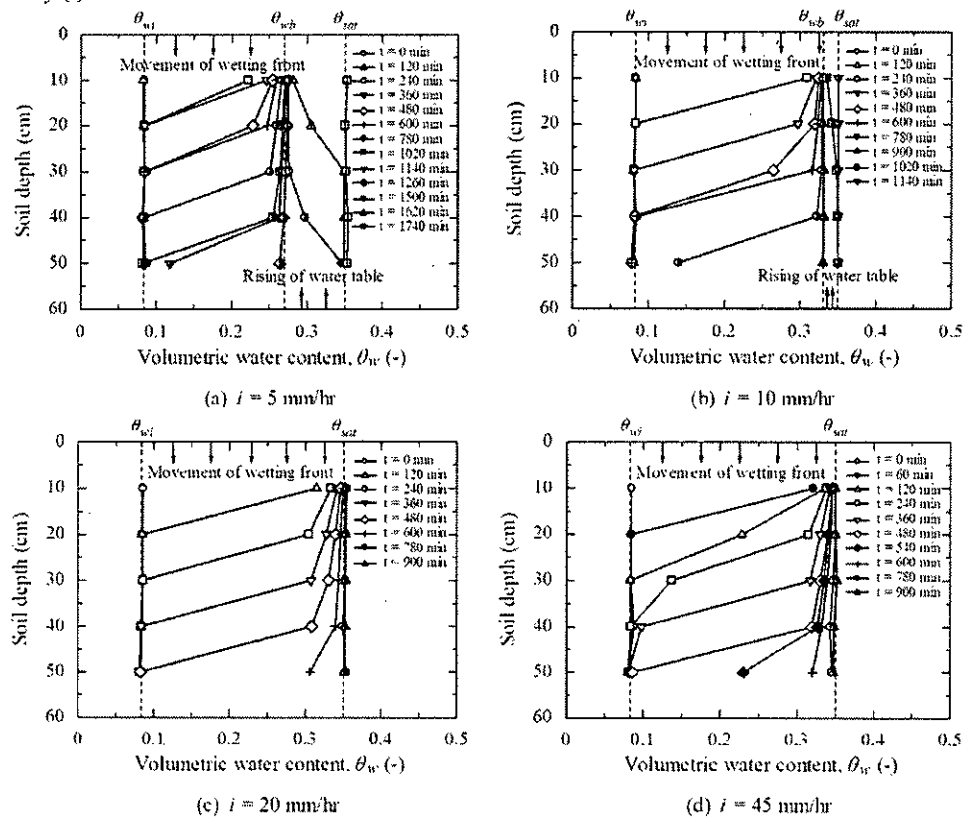


Figure 4 Development of volumetric water content (θ_w) profile in the silty sand (SM) column for various magnitudes of rainfall intensity (i).

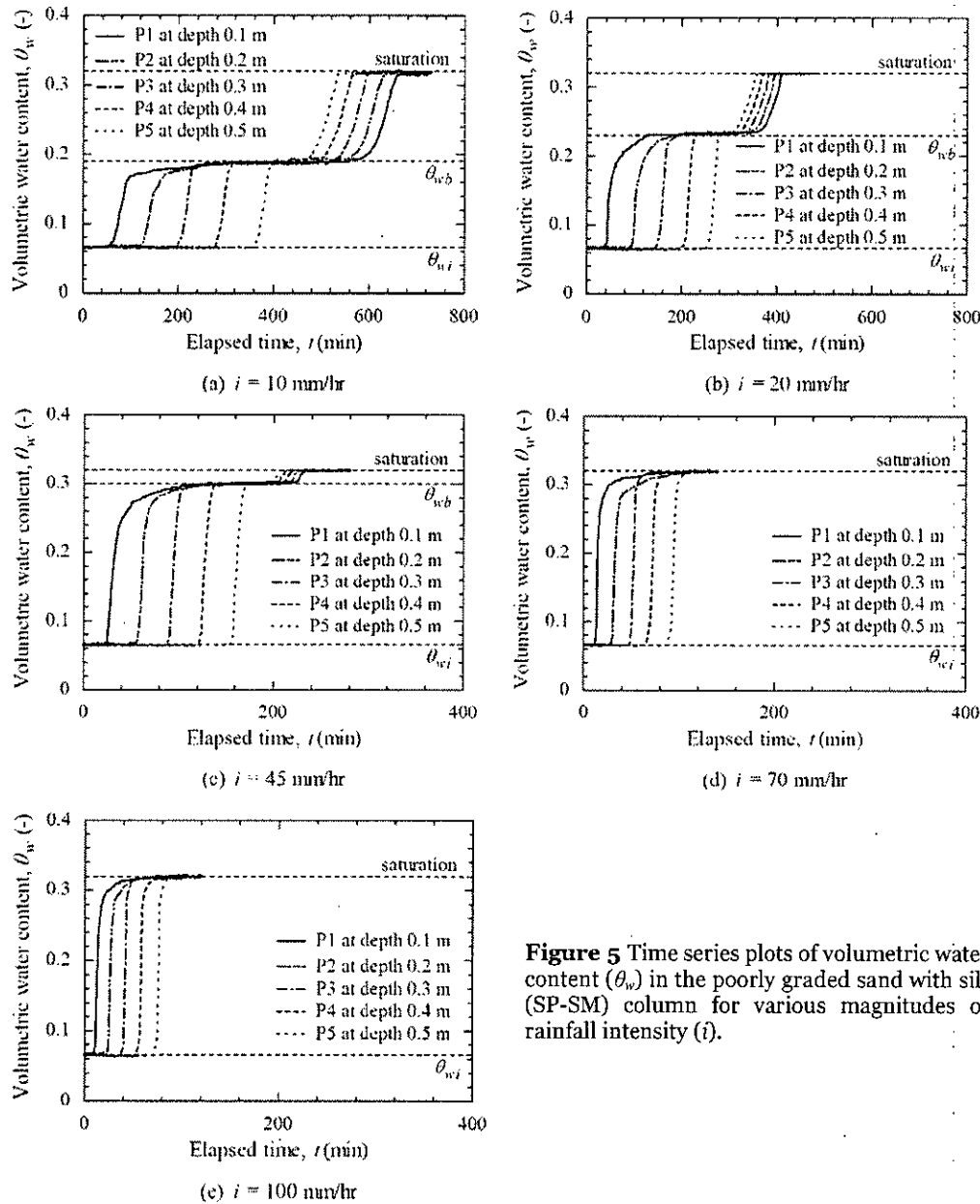


Figure 5 Time series plots of volumetric water content (θ_w) in the poorly graded sand with silt (SP-SM) column for various magnitudes of rainfall intensity (i).

void spaces were fully filled with water, no further increment of θ_w was observed.

1.3 Water Content behind the Wetting Front

As long as rainfall intensity is lower than the soil saturated permeability, the maximum water content during the infiltration process, namely the water content behind the wetting front (θ_{wb}), will be lower than the saturated water content. The unique relationship between θ_{wb} and i/k_s in sandy soil was reported in Chinkulkijniwat et al.

(2016) and modelled as

$$S_{eb} = \frac{\theta_{wb} - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + [-\ln(i/k_s)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad (2)$$

However, Chinkulkijniwat et al. (2016) validated this model only for a cohesionless sandy soil. Since previous research works (Lee et al. 2011; Chinkulkijniwat et al. 2016; Wu et al. 2017) revealed that the magnitude of θ_{wb} does not depend on the slope angle, we validated Eq. (2) with test data from a one-dimensional infiltration test. Figure 7 presents the relationship found in this

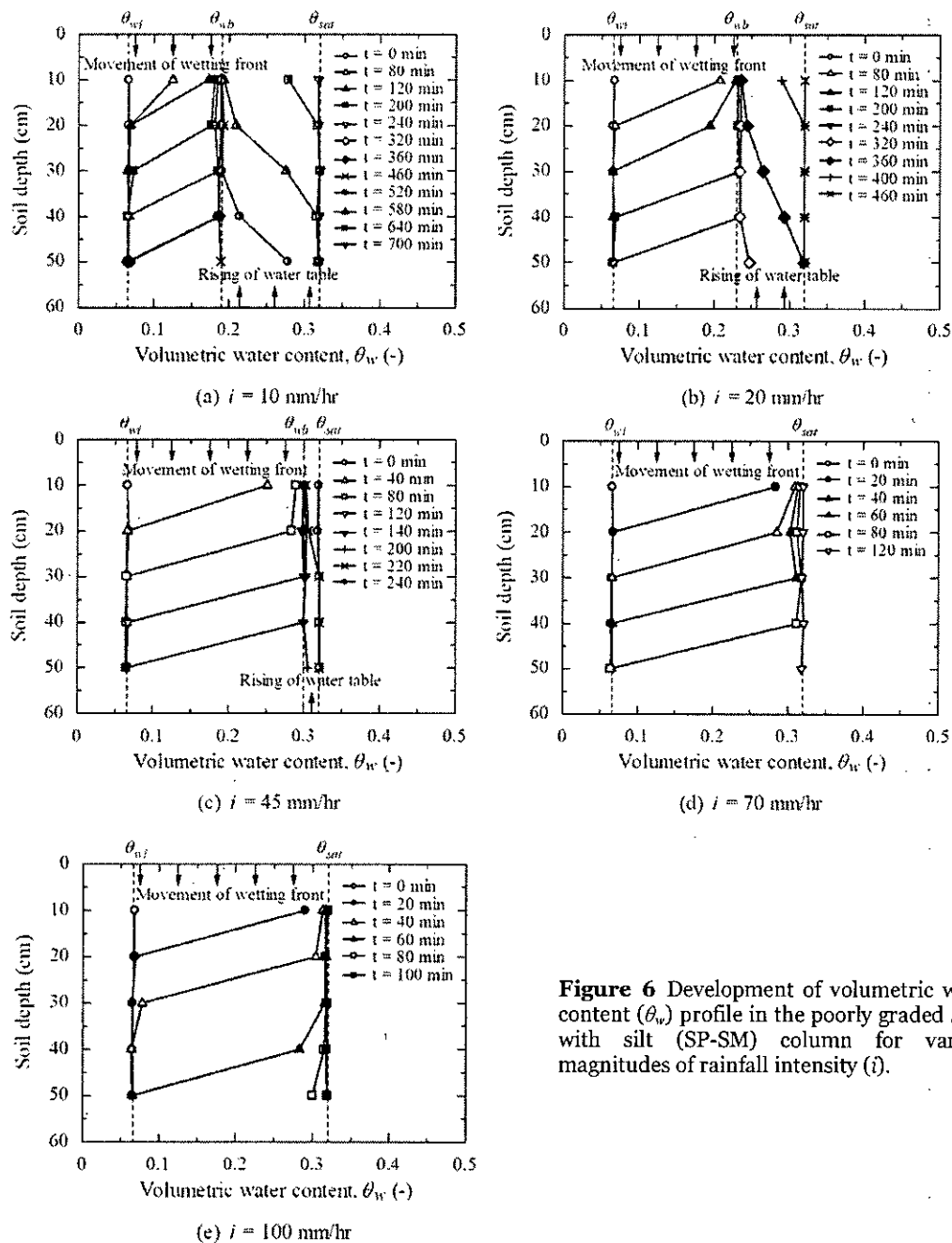


Figure 6 Development of volumetric water content (θ_w) profile in the poorly graded sand with silt (SP-SM) column for various magnitudes of rainfall intensity (i).

study between θ_{wb} and i for SM and SP-SM soils. There were 10 and 15 measurements taken in SM and SM-SP soils, respectively. The measured values, taken from 5 TRD probes at each rainfall intensity, were close to each other in both soils, which indicates a unique water content for a particular soil at a given rainfall intensity. Using the van Genuchten parameter values reported in Table 1, the measurements fitted well with Eq. (2), giving an r^2 of 0.996 and 0.997 for the SM and SP-SM soils,

respectively. Therefore, Eq. (2) is valid for the soils studied, which had a certain amount of fine fraction.

2 Analysis of Shallow Landslides

2.1 FS at the depth of wetting front's advance

In shallow landslides triggered by rainfall infiltration, the failure has a small depth to length ratio and forms a failure plane parallel to the slope

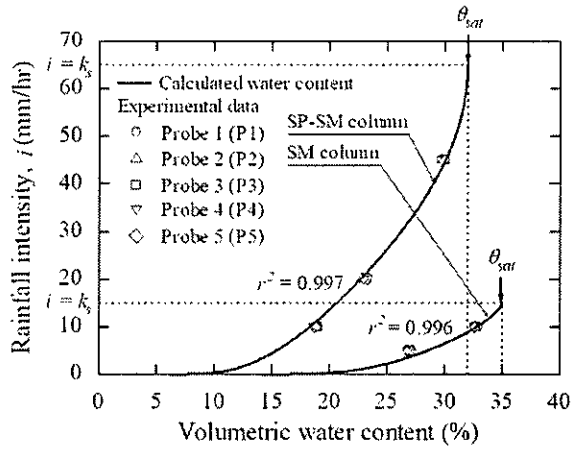


Figure 7 Relationship between volumetric water content behind wetting front (θ_{wb}) and rainfall intensity (i) for silty sand (SM) and poorly graded sand with silt (SP-SM) soils. (r^2 , coefficient of determination)

surface. Therefore, infinite slope analysis is justified when assessing the stability of a shallow landslide. The minimum FS is calculated from the depth of wetting penetration. Although the θ_w profile in SM soil did not exhibit a sharp wetting front, the value of θ_w in the wet zone varied very close to θ_{wb} . Therefore, for the sake of simplicity, this study assumes a magnitude of water content in the wet zone equal to θ_{wb} , and hence the minimum FS is at the wetting front.

The FS under vertical seepage and unsaturated conditions is written as (Duncan and Wright 2005)

$$FS = \frac{c' + [\gamma Z \cos^2 \beta - \sigma'_s] \tan \phi'}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta} \quad (3)$$

$$= \frac{c' - \sigma'_s \tan \phi'}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

where γ is the unit weight of soil above the wetting front, Z is the particular depth where FS is being calculated, c' is effective cohesion, ϕ' is the effective frictional angle, β is the inclined angle of the slope, and σ'_s is suction stress (Lu and Griffiths 2004; Lu and Likos 2006) defined as

$$\sigma'_s = -\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} (u_a - u_w) = -S_e (u_a - u_w) \quad (4)$$

Combining Eq. (2) with Eq. (1), the suction at

the wetting front (expressed as $(u_a - u_w)_b$) is

$$(u_a - u_w)_b = -\frac{1}{\alpha} \ln(i/k_s) \quad (5)$$

Since θ_{wb} can be approximated using Eq. (2), the suction stress at the wetting front can be written as

$$\sigma'_s = \left[-\frac{1}{\alpha} \ln(i/k_s) \right] \left[\frac{1}{1 + [-\ln(i/k_s)]^n} \right]^{1-1/n} \quad (6)$$

and, therefore, the magnitude of FS at the depth of the wetting front's advance, Z_w , can be calculated by substituting Eq. (3) for the expression of σ'_s in Eq. (6). Figures 8a and 8b respectively present the change of FS with the wetting front's advance Z_w , namely the $FS - Z_w$ plot, in SM and SP-SM soils for slopes of various gradients subjected to various magnitudes of infiltration index (i/k_s). In the SP-SM soil, at every value of i/k_s , the magnitude of FS decreased very rapidly with Z_w , and then leveled off to become asymptotic at the lower limit. In the SM soil, the reduction in FS was slower than in the SP-SM soil. This result suggests that when a wetting front advances at shallow depths, the FS value in SM soil will be higher than the FS value in SP-SM soil.

To investigate the influence of soil properties on the above mentioned characteristics, graphs of FS against Z_w were plotted using varying soil parameters. Figures 9a – 9d present the change of FS with Z_w for various values of the parameters c' , ϕ' , α , and n . The variation of the parameters c' and ϕ' is presented through lines of different symbols (Figures 9a and 9b), while the variation of the infiltration index is presented through different types of lines (full and dashed lines). At any particular depth of the wetting front's advance, Z_w , the lower the infiltration index was, the greater the FS was. Figure 9a shows clearly that cohesive strength governs the shape of the $FS - Z_w$ plot: the lower the cohesive strength, the sharper the reduction of FS with increasing depth. Thus, the FS value reached the asymptote earlier in soil of a

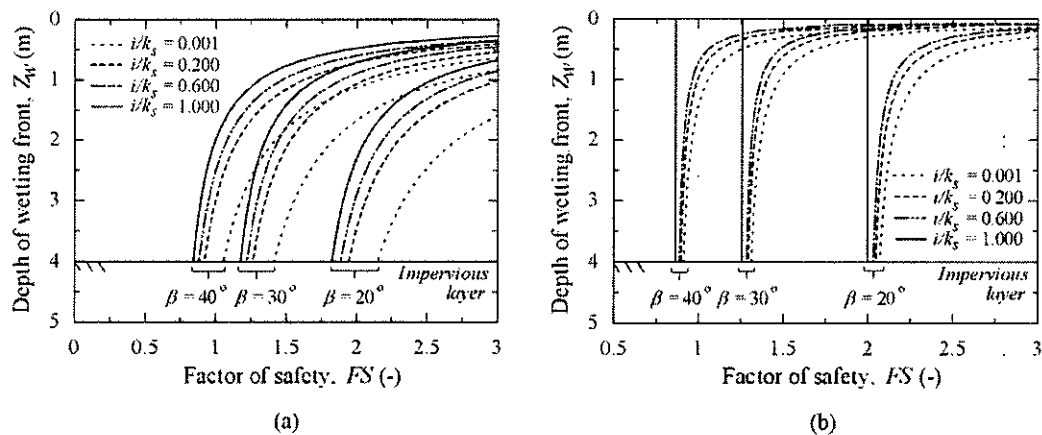


Figure 8 $FS-Z_w$ plots for various magnitudes of infiltration index i/k_s and inclined angle of the slope β in (a) silty sand (SM) soil and (b) poorly graded sand with silt (SP-SM) soil.

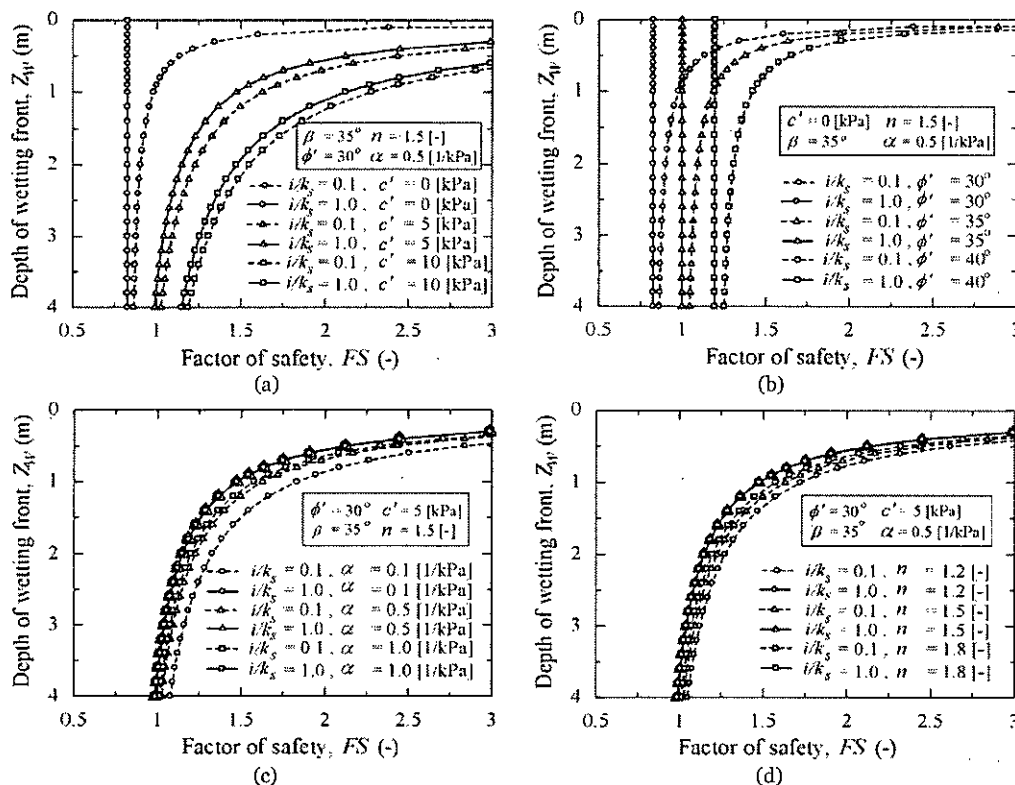


Figure 9 The $FS-Z_w$ plots for various values of the parameters: (a) cohesive strength c' , (b) soil frictional angle ϕ' , (c) van Genuchten (VG) parameter α , and (d) VG parameter n .

lower cohesive strength than in soil of a higher cohesive strength. With regard to the soil frictional angle, the plots reveal that this factor played no role in the shape of the $FS-Z_w$ plot, changes in the value of the soil frictional angle only resulted in a sideways shift of the plot.

Figures 9c and 9d present the $FS-Z_w$ plots

produced by varying the van Genuchten parameters α and n , respectively. When $i/k_s \geq 1.0$ (full lines), changes of α and n did not affect the $FS-Z_w$ plot since the magnitude of θ_{wb} was equal to the saturated water content and, hence, suction stress, which is a function of the van Genuchten parameter α , and n was completely

eliminated. When $i/k_s < 1.0$ (dash lines), changes in the van Genuchten parameters had less effect on the $FS-Z_w$ plots than the strength parameters did. The greater α and n values yielded $FS-Z_w$ plots with smaller curvatures. Therefore, with identical strength parameters, a sloping ground possessing greater α and n values might exhibit a lower FS at the depth of the wetting front Z_w , particularly when advancing at shallow depths.

2.2 Analysis of critical depth

The critical depth is the depth at which a failure plane is likely to occur and it can be approximated by taking FS to equal 1.0 in Eq. (3). After rearranging the equation, the critical depth can be expressed as

$$Z_{cr} = \frac{c'}{\gamma(1-A)\sin\beta\cos\beta} - \frac{\sigma'_s \tan\phi'}{\gamma(1-A)\sin\beta\cos\beta} \quad (7)$$

where A is the stability index, expressed as $\tan\phi'/\tan\beta$, and Z_{cr} is the critical depth or the depth at which FS is equal to 1.0. Understanding the critical depth characteristic is vital for landslide mitigation and prevention measures, stability reinforcements and the installation of monitoring devices for landslide early warning systems. To characterize the depth of the failure plane, we analyzed a normalized critical depth as a ratio of the critical depth to the depth of the sloping ground (Z_i), as expressed in Eq. (8),

$$\frac{Z_{cr}}{Z_i} = \frac{c'}{\gamma Z_i(1-A)\sin\beta\cos\beta} - \frac{\sigma'_s \tan\phi'}{\gamma Z_i(1-A)\sin\beta\cos\beta} \quad (8)$$

Figure 10 presents the relationships between the normalized critical depth (Z_{cr}/Z_i) and the infiltration index (i/k_s) with various magnitudes of stability index (A) for different values of strength parameters (c' and ϕ') and van Genuchten parameters (α and n). All the plots of

Z_{cr}/Z_i against i/k_s indicate that steep slopes (low A values) yield critical planes at shallow depths (small values of Z_{cr}/Z_i). In cohesionless sloping ground, particularly moderately sloping ground where the gradient was little greater than the soil frictional angle, the critical depth was very sensitive to the rainfall intensity (i/k_s). In cohesive soil, on the other hand, the critical depth was less sensitive to the rainfall intensity. Even a small value of cohesive strength ($c' = 5$ kPa) in sloping ground could reduce the sensitivity of the critical depth to rainfall intensity.

A higher α value represents a lower air entry suction, and hence water entry suction. A larger n value represents a more uniform pore size distribution resulting in less suction loss with increments of water content. Typically, coarse grain soil possesses higher α and n values than fine grain soil. The plots of Z_{cr}/Z_i against i/k_s indicate that, for a given i/k_s in sloping ground with larger n and α values, the failure plane should occur at a shallower depth. For cohesive sloping ground, the plot of Z_{cr}/Z_i against i/k_s does not change much with n and α values, whereas the same plot for cohesionless sloping ground does change. For cohesionless sloping ground, larger values of n and α clearly result in a flatter plot of Z_{cr}/Z_i against i/k_s .

3 Conclusions

To verify the unique relationship between θ_{wh} and i/k_s , presented in Chinkulkijniwat et al. (2016), a series of one-dimensional infiltration tests was conducted with silty sand (SM) and poorly graded sand with silt (SP-SM). The stability of these soils in shallow slopes under various rainfall conditions was analyzed. The following conclusions can be made based on this research:

- The unique relationship between θ_{wh} and i/k_s can be formulated either in sandy soil or in soil with a certain amount of fine fraction.
- Strength parameters play a more important role than VG parameters in the variation of FS with the depth of the wetting front's advance.

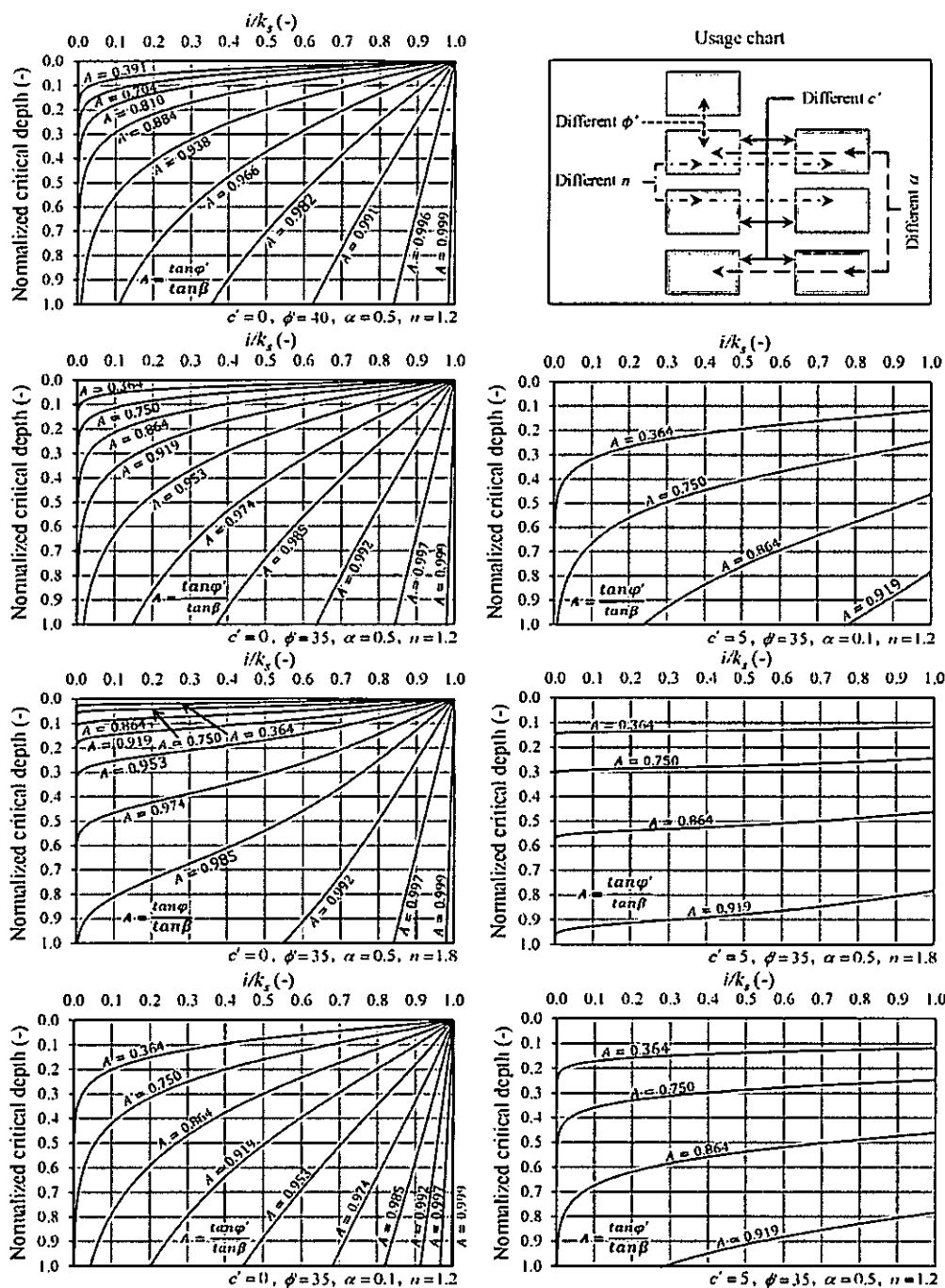


Figure 10 Z_{cr}/Z_i vs. i/k_s plots with various magnitudes of A for different values of strength parameters (c' , ϕ') and van Genuchten parameters (α , n).

- For a given i/k_s , lower values of the strength parameters c' and ϕ' result in failure planes at shallower depths.
- In cohesionless sloping ground having a gradient close to the soil frictional angle, when the

rainfall intensity approaches the value of the soil saturated permeability, the variation of rainfall intensity plays the major role in the eventual depth of the failure plane.

A little cohesive strength in sloping ground can reduce the influence of rainfall intensity on the depth of a potential failure plane.

Given two soils with identical strength parameters, the more uniformly grained soil which possesses the greater α and n values, tends to fail at a shallower depth.

References

- Ali A, Huang J, Lyamin AV, et al. (2014) Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modelled by infinite slopes. *Engineering Geology* 179: 102-116. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.06.024>
- Burylo M, Hudek C, Rey F (2011) Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). *Catena* 84: 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.09.007>
- Chaminda GPK (2006) Real-time prediction of rain-induced embankment by minimum measurements with back-analysis for SWCC parameters. The University of Tokyo Japan.
- Chinkulkijniwat A, Yubonchit S, Horpibulsuk S, et al. (2016) Hydrological responses and stability analysis of shallow slopes with cohesionless soil subjected to continuous rainfall. *Canadian Geotechnical Journal* 53(12): 2001-2013. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0143>
- Chu ST (1978) Infiltration during an unsteady rain. *Water Resources Research* 17(3): 461-466. <https://doi.org/10.1029/WR014i003p00461>
- Duncan JM, Wright SG (2005) Soil strength and slope stability. *Scitech Book News; Portland* 29(4): 297.
- Gabet EJ, Mudd SM (2006) The mobilization of debris flows from shallow landslides. *Geomorphology* 74: 207-218. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.08.013>
- Green WH, Ampt C A (1911) Studies on soil physics: flow of air and water through soils. *Journal of Agriculture Science* 4: 1-24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. (2008) The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* 5: 3-17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
- Lee LM, Kassim A, Gofar N (2011) Performances of two instrumented laboratory models for the study of rainfall infiltration into unsaturated soils. *Engineering Geology* 117: 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.007>
- Li WC, Lee LM, Cai H, et al. (2013) Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope. *Engineering Geology* 153: 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.11.017>
- Lu N, Griffiths DV (2004) Profiles of steady-state suction stress in unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(10): 1063-1076. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:10\(1063\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:10(1063))
- Lu N, Likos WJ (2006) Suction stress characteristic curve for unsaturated soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(2): 131-142. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:2(131))
- Mein RG, Larson CL (1973) Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research* 9(2): 384-394. <https://doi.org/10.1029/WR009i002p00384>
- Naidu S, Sajinkumar KS, Oommen T, et al. (2018) Early warning system for shallow landslides using rainfall threshold and slope stability analysis. *Geoscience Frontiers* 9(6): 1871-1882. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.10.008>
- Postance B, Hillier J, Dijkstra T, et al. (2018) Comparing threshold definition techniques for rainfall induced landslides: a national assessment using radar rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms* 43: 553-560. <https://doi.org/10.1002/esp.4202>
- Shimoma S, Orense R, Honda T, et al. (2002) Model tests on slope failures caused by heavy rainfall. *International Congress "INTERPRAEVENT 2002" in the Pacific Rim - Matsumoto, Japan*. 2: 547-557.
- Tohari A, Nishigaki M, Komatsu M (2007) Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133(5): 575-587. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:5\(575\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:5(575))
- Tosi M (2007) Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the northern Apennines (Italy). *Geomorphology* 87: 268-283. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.019>
- Trustrum NA, Gomez B, Page MJ (1999) Sediment production, storage and output: The relative role of large magnitude events in steepland catchments. *Schweizerbart and Borntraeger science publishers* 115: 71-86. <https://doi.org/10.1127/zfgsuppl/115/1999/71>
- Tsai TL, Chen HE, Yang, JC (2008) Numerical modeling of rainstorm-induced shallow landslides in saturated and unsaturated soils. *Environmental Geology* 55(6): 1269-1277. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1075-1>
- van Genuchten MT (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal* 44: 615-628. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Wu LZ, Zhou Y, Sun P (2017) Laboratory characterization of rainfall-induced loess slope failure. *Catena* 150: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.002>
- Yubonchit S, Chinkulkijniwat A, Horpibulsuk S, et al. (2016). Influence factors involving rainfall-induced shallow slope failure: numerical study. *International Journal of Geomechanics* 17(7): 04016158. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000865](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000865)
- Yumuang S (2006) 2001 debris flow and debris flood in Nam Ko area, Phetchabun province, central Thailand. *Environmental Geology* 51(4): 545-564. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0351-9>

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support from the Thailand Research Fund under the TRF Senior Research Scholar program (Grant No. RTA6080055), Suranaree University of Technology and the Office of Higher Education Commission under NRU project of Thailand.