



แบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์
เสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง

TREE ROOT REINFORCEMENT MODEL FOR STABILITY
ANALYSIS OF EARTH SLOPE

สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เชิงคำนวณ

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2554

©ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

แบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์
เสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง

TREE ROOT REINFORCEMENT MODEL FOR STABILITY
ANALYSIS OF EARTH SLOPE

สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เชิงคำนวณ

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

แบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์
เสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง
TREE ROOT REINFORCEMENT MODEL FOR STABILITY
ANALYSIS OF EARTH SLOPE

สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ

คุณูปนิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เชิงคำนวณ

2554

คณะกรรมการสอบคุณูปนิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ดร. อนันต์ อึ้งวิไลเชษฐ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. รุ่งโรจน์ นิลทอง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิตชัย อนันต์เสริมฐ์)

.....กรรมการ
(ดร. ชีรเดช หมูคำ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรากร ไม่เรียง)

©ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

©ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ดร.อนันต์ อึ้งวิเศษพันธ์ ประธานกรรมการสอบคณินิพนธ์ และ ดร.ธีรเดช หมูคำ และ รองศาสตราจารย์ ดร.วรการ ไม้เรียง กรรมการสอบคณินิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาร่วมเป็นกรรมการสอบคณินิพนธ์ตลอดจนให้คำแนะนำแก้ไขคณินิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.รุ่งโรจน์ นิลทอง ประธานกรรมการที่ปรึกษาหลักเป็นอย่างสูงที่ท่านได้สละเวลาอันมีค่า และเป็นผู้จุดประกายแนวคิดเกี่ยวกับการสร้างจำลองทางคณิตศาสตร์ แนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของคณินิพนธ์ฉบับนี้จนแล้วเสร็จ คณินิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารลงสำเร็จได้ ถ้าไม่ได้รับคำชี้แนะแนวทางในการจัดทำคณินิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตชัย อนันตเศรษฐ์ กรรมการที่ปรึกษาร่วมเป็นอย่างสูงที่ท่านได้สละเวลาอันมีค่า คอยช่วยเหลือและชี้แนะแนวทางแห่งความสำเร็จให้แก่ผู้เขียนจนกระทั่งผู้เขียนสามารถผ่านพ้นอุปสรรคต่าง ๆ และสามารถจัดทำคณินิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่สนับสนุนทุนพัฒนาบุคลากรของมหาวิทยาลัย รวมถึงความช่วยเหลือในทุกด้านจากสาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม เขตพื้นที่เชียงรายที่ผู้เขียนสังกัดอยู่และเพื่อน ๆ ชาววิชะทุกท่าน ที่มีส่วนสนับสนุนช่วยจนคณินิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ความดีงามของคณินิพนธ์ที่พึงมี ผู้เขียนขอยกให้กับมารดา บิดาผู้ล่วงลับและครอบครัว ที่คอยให้ความรัก ความเข้าใจ ตลอดจน เสียสละเวลา ที่คอยดูแลและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้เขียนจนสามารถมีวันนี้ได้

สุรชัย อำนวยพรเลิศ

ชื่อเรื่องคุณิพนธ์

แบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากคาน้ำที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง

ชื่อผู้เขียน

สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ

หลักสูตร

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตร์เชิงคำนวณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.รุ่งโรจน์ นิลทอง

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร.ชิตชัย อนันตเศรษฐ์

บทคัดย่อ

การศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากคาน้ำที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัยก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยรากคาน้ำภายใต้การไหลของน้ำผ่านมวลดิน ซึ่งใช้พื้นที่ศึกษาบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเขตพื้นที่เชียงราย เก็บข้อมูลและทดสอบในภาคสนามและห้องทดลองการจากจำนวนชุดตัวอย่างของดิน 3 ชุด หลังจากนั้น นำซอฟต์แวร์ COMSOL และ Matlab มาประยุกต์ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำผ่านมวลดิน ทั้งก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยรากคาน้ำ โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มของปริมาณน้ำฝน ค่าสมบัติของมวลดิน ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินและสภาพของเชิงลาด พบ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ปัจจัย ผลของการตอบสนองหลังจากที่มีการไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินจะมีความสำคัญมากควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มของน้ำฝนและสภาพเชิงลาด และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนปลอดภัยหลังจากที่ได้ทำการศึกษาการไหลซึมของน้ำผ่านมวลดินโดยให้ฝนตกอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 5 วัน พบว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจะมีค่าลดลง

หลังจากที่มีการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ภายใต้แบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเมื่อพิจารณาการไหลของน้ำซึมผ่านในมวลดินในสถานะที่ไม่อิ่มตัวบนพื้นที่ลาดเอียง ซึ่งจากการศึกษา พบว่า เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ทั้งหมด ผลของการตอบสนองหลังจากที่มีการไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินจะมีความสำคัญมากควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของน้ำฝน สภาพเชิงลาดและขึ้นอยู่กับ การเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ตามระยะการจัดวางที่กำหนด และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนปลอดภัย หลังจากที่ได้ทำการศึกษาการไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน โดยให้ฝนตกอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 5 วัน พบว่า หลังจากที่มีการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ตามระยะการจัดวางที่กำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ปัจจัย และระยะเวลาที่ฝนตก ตามลำดับ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้หลังจากการศึกษาร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินภายใต้การไหลซึมของน้ำผ่านมวลดินทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยมีการพัฒนาแนวโน้มที่มีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: แบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้/การวิเคราะห์เสถียรภาพของดิน/การไหลของน้ำผ่านในมวลดิน/อัตราส่วนปลอดภัย/ซอฟต์แวร์ COMSOL/ซอฟต์แวร์ Matlab

Dissertation Title	Tree Root Reinforcement Model for Stability Analysis of Earth Slope
Author	Surachai Amnuaypornlert
Degree	Doctor of Philosophy (Computational Science)
Advisor	Dr. Rungrote Nilthong
Co-Advisor	Associate Dr. Chetchai Ananthasert

ABSTRACT

The purpose of this study is to identify the safety factor value before and after the reinforcement of tree roots subjected to the seepage of water through the soil. A slope area in the Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Rai campus was used as the study area. The three types of soil were collected from the field and then the field and laboratory testing were conducted. The model of the seepage of water through the soil before and after tree roots reinforcement was created using COMSOL and Matlab computer software. The rainfall, soil property, seepage coefficient of water through the soil, and condition of slope area were considered as involving parameters. The results after the seepage of water through the soil, there are the change of seepage coefficient of water through the soil corresponding to the change of rainfall and the condition of slope area. Considering the situation of continuous raining for 5 days, the safety factor of the slope area has decreased.

Considering the situation of water seep through the unsaturated soil in the slope area which was reinforced by the tree roots, the results after the seepage of water through the soil, there are the change of seepage coefficient of water through the soil corresponding to the change

of rainfall and the condition of slope area. Considering the situation of continuous raining for 5 days, the safety factor of slope area has increased depending on the 4 parameters and duration of rainfall respectively. So, we can conclude that the stability of soil slope subjected to seepage of water through the soil has increased after being reinforced by the tree roots.

Keywords: Tree Root Reinforcement Model/Stability Analysis of Earth Slope/Seepage flow Model/Factor Safety/COMSOL Program/MATLAB Program



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	(3)
บทคัดย่อภาษาไทย	(4)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(6)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญภาพ	(13)
อักษรย่อและสัญลักษณ์	(18)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการศึกษา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ขอบเขตและสมมติฐานของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	7
2.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการไหลของน้ำในมวลดิน	19
2.3 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองรากต้นไม้	32
3 ระเบียบวิธีวิจัยและวิธีการศึกษา	42
3.1 ขั้นตอนและวิธีการศึกษาสร้างแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพ	44
3.2 ขั้นตอนวิธีการศึกษาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรากต้นไม้	50
3.3 ขั้นตอนวิธีการศึกษาสร้างแบบจำลองวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านมวลดิน	56

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการศึกษาแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน	63
4.1 การสร้างแบบจำลอง	63
4.2 การกำหนดตัวแปรเพื่อทดสอบแบบจำลอง	67
4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองเสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน	68
4.4 ผลการศึกษาแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน	71
4.5 อภิปรายผลการศึกษา	76
5 อภิปรายผลการศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน	77
5.1 การสร้างแบบจำลอง	77
5.2 การกำหนดตัวแปรเพื่อทดสอบแบบจำลอง	80
5.3 การวิเคราะห์แบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง	81
5.4 อภิปรายผลการศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง	83
5.5 อภิปรายผลการศึกษา	88
6 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา	90
6.1 สรุปผลการศึกษาแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง	90
6.2 สรุปผลการศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่	
6.3 สรุปผลการเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำผ่านมวลดิน บนพื้นที่ลาดเอียง	95
6.4 ข้อเสนอแนะ	96
รายการอ้างอิง	97
ภาคผนวก	104
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการกำหนดพิกัดของปัญหาที่ศึกษา	105
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้ การไหลของน้ำผ่านมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียงแบบ 2 มิติ	109
ภาคผนวก ค ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง	119
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบพื้นฐานและสมบัติเฉพาะทางกายภาพของมวลดิน	130
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบแรงดึงรากประสานดินในภาคสนาม	143
ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบการกระจายตัวของรากต้นไม้	144
ภาคผนวก ช ผลการทดสอบเพื่อกำหนดความหนาแน่นของรากต้นไม้ในแบบจำลอง	147
ภาคผนวก ซ รายละเอียดผลการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลของน้ำในมวลดิน ของก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยรากไม้บนลาดเอียง	149
ภาคผนวก ฌ รายละเอียดโปรแกรมสำหรับจำลองการไหลของน้ำผ่านมวลดิน และวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	152
ประวัติผู้เขียน	165

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 การคำนวณหาค่า C_R	55
3.2 การกำหนดขอบเขตรูปร่างด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาของแบบจำลอง	57
3.3 การกำหนดสมบัติของมวลดินที่เลือกใช้ในการศึกษาในแบบจำลอง	58
3.4 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดิน และปริมาณน้ำฝนที่เลือกใช้ในการศึกษา	61
3.5 สรุปรวมตัวแปรในสมการและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา	62
4.1 ช่วงของค่าพารามิเตอร์และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นในแบบจำลอง	67
4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อแบบจำลอง	68
4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลองโดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง	69
4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลองโดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำที่มีผลต่อแบบจำลอง	69
4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลองโดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด(มุมลาดเอียง) ที่มีผลต่อแบบจำลอง	70

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
5.1 ช่วงของค่าพารามิเตอร์และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นในแบบจำลอง	80
5.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อแบบจำลอง	81
5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง	82
5.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำที่มีผลต่อแบบจำลอง	82
5.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) ที่มีผลต่อแบบจำลอง	83

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินชนิดต่าง ๆ	8
2.2 ขอบเขตของความแข็งแรงของดิน	8
2.3 แรงที่กระทำในการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง	10
2.4 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรง	10
2.5 ประเภทของการบีบอัดของดิน	13
2.6 สมดุลแรงกระทำตั้งฉากกับผิวแนวตั้งชันส่วนมวลดินเหนือแนวพังทลาย	15
2.7 แรงที่กระทำตามแนวพังทลายสมดุลภายในชันส่วนตามทฤษฎีของลาตอแนนต์	16
2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normal Strength กับ Shear Strength ตามทฤษฎีของ Mohr - Coulumb Strength Envelope	17
2.9 การพิจารณารูปร่างของมวลดินตามกฎของอนุรักษ์มวลในทิศทาง X, Y และ Z	19
2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำในช่องว่างกับปริมาณน้ำในปริมาตรของดิน	24
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pore-Water Pressure กับ Actual Volumetric Water Content Functions ของทรายละเอียด ดินตะกอนและดินเหนียว	25
2.12 นิยามพารามิเตอร์ของเมทริกสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำในระนาบ	29
2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อคำนวณค่า storage term, m_w	30
2.14 (ก) ลักษณะรูปร่างชันส่วนแบบสามเหลี่ยมที่ไม่มีจุดค่อภายใน	31
2.14 (ข) ลักษณะรูปร่างชันส่วนแบบสามเหลี่ยมที่มีจุดค่อภายใน	31
2.15 รูปแบบลักษณะการจำลองการเสริมกำลังด้วยรากพืช แบบตั้งฉากและ แบบเอียงช่วงพื้นที่รับแรงเฉือน	33
2.16 การสร้างแบบจำลองความเครียดเฉือน	33
2.17 ระบบรากพืชแบบ Tap Root System และ Fibrous System และรูปแบบการแผ่ขยายของรากพืช	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
2.18 ลักษณะการกระจายตัวของรากคันทิ้งที่ใช้ในการศึกษาในจังหวัดเชียงราย	38
2.19 ป่าไม้เต็ง	39
2.20 เครื่องทดสอบแรงดึงในสนาม	41
3.1 ขั้นตอนการศึกษาทดสอบและเก็บข้อมูลในพื้นที่เป้าหมาย	43
3.2 ขั้นตอนภาพรวมทั้งหมดของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	43
3.3 แผนที่จังหวัดเชียงราย	44
3.4 พื้นที่ศึกษาในบริเวณขอบเขตเส้นประในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย	45
3.5 เส้นชั้นความสูงและจำลองพื้นที่ผิวบริเวณที่ศึกษาโดยโปรแกรม Digital Terrain Model	45
3.6 ตำแหน่งจุดที่ทำการทดสอบ	46
3.7 พื้นที่จุดที่ทำการทดสอบในภาคสนาม	46
3.8 การเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาค่า c, ϕ, γ	47
3.9 เครื่องมือการทดสอบรับแรงเฉือนโดยตรง	48
3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normal Strength กับ Shear Strength จากการทดสอบวิธีแรงเฉือนโดยตรง	48
3.11 ลักษณะการกระจายตัวของรากคันทิ้งที่ใช้ในการศึกษาในจังหวัดเชียงราย	50
3.12 ขั้นตอนการวัดความยาวของรากคันทิ้งไม้ที่ระยะ 10 เซนติเมตร	51
3.13 ลักษณะการกระจายตัวของรากคันทิ้ง	51
3.14 สร้างบล็อกการกระจายตัวของรากในแต่ละชั้น	52
3.15 บล็อกการกระจายตัวของรากคันทิ้งไม้	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
3.16 บล็อกการกระจายตัวของรากที่เฉลี่ยแล้ว	53
3.17 บล็อกการกระจายตัวของรากที่เฉลี่ยทุกความลึก 0.50 เมตร	54
3.18 การกำหนดขอบเขตรูปร่างของแบบจำลองที่ศึกษาการไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดิน	57
3.19 การกำหนดสมบัติต่าง ๆ ของรูปร่างลาดดินและข้อมูลต่าง ๆ ในแบบจำลอง	58
3.20 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มและเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง	60
3.21 การกำหนดตาข่าย (Mesh) ของปัญหาในแบบจำลองที่ศึกษา	61
4.1 แผนที่แสดงขอบเขตของอำเภอพาน จังหวัดเชียงราย	64
4.2 พื้นที่ศึกษาในบริเวณขอบเขตเส้นประ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย	65
4.3 ภาพตัดตามขวางแสดงการเก็บตัวอย่างมวลดินตามความลึกเพื่อพิจารณาหา ค่าพารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	66
4.4 ระดับความลึกของปริมาณน้ำที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองในแต่ละพารามิเตอร์ ของปริมาณน้ำฝน ระหว่าง 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน	71
4.5 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของปริมาณน้ำฝน ที่ศึกษาในแบบจำลองที่มีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน	72
4.6 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแบบจำลองที่ศึกษาลักษณะสมบัติของมวลดินที่ แตกต่างกันภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน	73
4.7 ค่าระดับความลึกของน้ำฝนตกอย่างต่อเนื่องเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวันของ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินที่แตกต่างกันของแบบจำลองที่ศึกษา	74
4.8 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินที่แตกต่างกัน ของแบบจำลองที่ศึกษาภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝน เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.9 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของสภาพเชิงลาดที่แตกต่างกันของแบบจำลองที่ศึกษาภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน	75
5.1 ภาพตัดตามขวางแสดงการเก็บตัวอย่างของมวลดินและรากต้นไม้ตามความลึกเพื่อพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	79
5.2 ระดับความลึกของปริมาณน้ำที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองในแต่ละพารามิเตอร์ของปริมาณน้ำฝนระหว่าง 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน	84
5.3 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ตามระดับความลึกของปริมาณน้ำฝนที่ศึกษาในแบบจำลองที่มีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน	84
5.4 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแบบจำลองที่ศึกษาลักษณะสมบัติของมวลดินที่แตกต่างกันภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน	86
5.5 ค่าระดับความลึกของน้ำฝนตกอย่างต่อเนื่องเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวันของค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินที่แตกต่างกันของแบบจำลอง	87
5.6 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินที่แตกต่างกันของแบบจำลองที่ศึกษาภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝน เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน	87
5.7 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของสภาพของเชิงลาดที่แตกต่างกันของแบบจำลองที่ศึกษาภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝน เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.1 ผลการของแบบจำลองก่อนการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลง ของค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ขึ้นอยู่กับความเข้มของปริมาณน้ำฝน	91
6.2 ผลการของแบบจำลองก่อนการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับอัตราการ เปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ ของน้ำผ่านมวลดิน	92
6.3 ผลการของแบบจำลองก่อนการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับอัตราการ เปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ขึ้นอยู่กับสภาพเชิงลาด	92
6.4 ผลการของแบบจำลองหลังการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับอัตราการ เปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ขึ้นอยู่กับความเข้มของปริมาณน้ำฝน	94
6.5 ผลของแบบจำลองก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนความลึกของน้ำฝนต่อความลึกของการพัง	95

อักษรย่อและสัญลักษณ์

ชื่อเต็ม

สัญลักษณ์

หน่วยแรงเฉือนที่จุดพังทลาย (ค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของดิน)	τ
แรงยึดเหนี่ยวหรือแรงเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน	c
หน่วยแรงกดหรือแรงตั้งฉาก (Normal Stress) ทั้งหมดบนระนาบแรงเฉือน	σ
มุมเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction)	ϕ
น้ำหนักของมวลดินเหนือเส้นแนวเคลื่อนพังแต่ละชั้นส่วน	W
แรงตั้งฉากประสิทธิผลของชั้นส่วน	N'
มุมของลาดเอียงที่ฐานของชั้นส่วน	
แรงดันน้ำภายในชั้นส่วนของมวลดิน	U
ความยาวของส่วนโค้งที่ฐานของชั้นส่วน	l
แรงเฉือนประสิทธิผลที่ฐานของชั้นส่วนตามแนวการเคลื่อนพัง	T
มุมเสียดทานภายในของมวลดิน (Total Internal Friction)	ϕ
มุมเสียดทานภายในแบบประสิทธิผลของมวลดิน (Effective Internal Friction)	ϕ'
ความลึกของปริมาณน้ำฝนเหนือแนวเคลื่อนพัง	h_w
หน่วยน้ำหนักของน้ำ	γ_w
หน่วยน้ำหนักของมวลดินในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ	γ_{sat}
หน่วยน้ำหนักของมวลดินในสภาพความชื้นตามธรรมชาติ	γ
หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของมวลดิน	γ'
ความลึกของแนวเคลื่อนพังบนระนาบลาดเอียง	Z
อัตราส่วนความลึกของปริมาณน้ำฝนเหนือแนวเคลื่อนพังต่อความลึกของแนวเคลื่อนพังบนระนาบลาดเอียง	m

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ชื่อเต็ม

สัญลักษณ์

อัตราการไหลของน้ำผ่านหน้าตัดมวลดิน (Specific discharge)	q
ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านมวลดิน (Hydraulic conductivity)	k
เส้นลาดความต่างศักย์ของระดับความสูงของน้ำผ่านในมวลดิน	i
ความเร็วของดาร์ซี (Known as the Darcian velocity)	v
ค่าศักย์รวมของน้ำ (Total head)	H
ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านในทิศทางแกน x	k_x
ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านในทิศทางแกน y	k_y
ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านในทิศทางแกน z	k_z
ปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดิน (volumetric water content)	—
เวลา (Time)	t
อัตราการไหลของน้ำผ่านในมวลดิน	Q
ปริมาตรของน้ำในปริมาตรทั้งหมด (Volume of Water)	V_w
ปริมาตรทั้งหมด (Total Volume)	V
เส้นโค้งความชันของปริมาตรกักเก็บ (Slope of the storage curve)	m_w
แรงดันน้ำในช่องว่างของมวลดิน	u_w
หน่วยน้ำหนักของน้ำในช่องว่างของมวลดิน	γ_w
ค่าความต่างระดับความสูงของลาดเอียง	y
หน่วยแรงรวม (Total Stress)	$\pm$
ลิกวิดลิมิต (Liquid Limit)	L.L.
ตะกอนทรายอินทรีย์ มีทรายละเอียดหินฝุ่นปนมีความเหนียวเล็กน้อย	ML
พลาสติกลิมิต (Plastic Limit)	P.L.

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ชื่อเต็ม

สัญลักษณ์

พลาสติกอินเด็ก (Plastic Index)

P.I.

ความต้านทานแรงเฉือน

S

ความดันน้ำในตัวอย่าง

u

แรงปฏิกิริยาโดยแรงดันน้ำในโพรงดิน (Pore Pressure)

u_w

มุมเสียดทานภายในทั้งหมดของดิน (Total Internal Friction)

α

มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน (Effective Internal Friction)

α'

มุมระนาบวิบัติของทางเดินหน่วยแรง

$\sim'$

หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress)

$\pm'$

หน่วยแรงตั้งฉาก (Normal Stress)

$\pm_n$

หน่วยแรงเฉือน (Shear Stress)

z

มุมที่ระนาบการวิบัติการกระทำกับแนวนอน

—

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่มีการเสริมด้วยราก

C_{SR}

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมด้วยราก

C

ต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยการเสริมราก

C_R

กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของรากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

t_R

กำลังรับแรงดึงของราก

T_R

พื้นที่หน้าตัดของรากที่อยู่ในพื้นที่หน้าตัด

A_R

พื้นที่หน้าตัดของดิน

A

เมทริกซ์เกรเดียน (the gradient matrix)

$[B]$

เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านชั้นส่วนมวลดิน

$[C]$

เวกเตอร์ของค่าศักย์ของน้ำ (the vector of nodal heads)

$\{H\}$

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ชื่อเต็ม

สัญลักษณ์

เวกเตอร์ของฟังก์ชันประมาณค่าภายในชิ้นส่วน

$\langle N \rangle$

อัตราปริมาณการไหลผ่านหน้าตัดบริเวณขอบของชิ้นส่วน

q

ความหนาของชิ้นส่วน (the thickness of an element)

z

สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ความซึมได้ของมวลดินสำหรับการไหลที่ขึ้นกับเวลา
ในสภาวะไม่อยู่ตัว

a

พื้นที่หน้าตัดภายในของชิ้นส่วน

A

ความยาวของชิ้นส่วนระหว่างจุดต่อใดๆ

L

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

μ

ค่าศักย์ของน้ำที่จุดสุดท้ายของเวลาที่เพิ่มขึ้น

H_1

ค่าศักย์ของน้ำที่จุดเริ่มต้นของเวลาที่เพิ่มขึ้น

H_0

ปริมาณฟลักซ์ที่จุดสุดท้ายของเวลาที่เพิ่มขึ้น

Q_1

ปริมาณฟลักซ์ที่จุดเริ่มต้นของเวลาที่เพิ่มขึ้น

Q_0

ค่าเริ่มต้นของการอินทิเกรต (an integration point)

j

ค่าจำนวนทั้งหมดของการอินทิเกรต (the numerical of integration points)

n

เมทริกซ์สัมสิทธิ์ความซึมได้ของชิ้นส่วนมวลดินที่จุดอินทิเกรต

$[C_j]$

เมทริกซ์ชิ้นส่วนภายในที่จุดอินทิเกรต

$[B_j]$

ดีเทอร์มิแนนของเมทริกซ์จาโคบี (the determinant of the Jacobian matrix)

$\det|J_j|$

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวถ่วงน้ำหนัก (weighting factors)

$W_{1j}W_{2j}$

ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมรากพืช (kPa)

Δs

มุมของรากพืชที่ทำมุมกับแกนตั้งในช่วงพื้นที่รับแรงเฉือนของดิน (องศา)

—

ค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของรากพืชต่อหน่วยพื้นที่ของดินบริเวณราก (kPa)

t_r

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ข้อเติม

สัญลักษณ์

ค่ากำลังรับแรงดึง โดยเฉลี่ยของรากพืชกับดิน (kPa)	t_r
อัตราส่วนพื้นที่รากพืชต่อพื้นที่หน้าตัดดินบริเวณที่มีรากพืช	$\frac{A_R}{A}$
มุมเริ่มต้นก่อนเคลื่อนตัวของรากพืชที่อยู่ในช่วงพื้นที่ ระนาบรับแรงเฉือน (องศา)	—
มุมสุดท้ายหลังเคลื่อนตัวของรากพืชที่อยู่ในช่วงพื้นที่ ระนาบรับแรงเฉือน (องศา)	—
ช่วงพื้นที่ระนาบรับแรงเฉือน (หน่วยความยาว)	z
ระยะเคลื่อนตัวของรากพืชที่อยู่ในช่วงพื้นที่ ระนาบรับแรงเฉือน (หน่วยความยาว)	x
กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่มีการเสริมด้วยราก	C_{SR}
กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมด้วยราก	C
ต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยการเสริมราก	C_R
กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของรากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่	t_R
กำลังรับแรงดึงของราก	T_R
พื้นที่หน้าตัดของรากที่อยู่ในพื้นที่หน้าตัดดิน	A_R
พื้นที่หน้าตัดของดิน	A
มุมของแรงเฉือนที่บิดไปของราก หรือเท่ากับ $\tan^{-1}(X/Z)$	$^{-1}$
ค่ากำลังรับแรงดึงของรากพืชกับดิน (kPa)	T_R
ค่าหน่วยแรงยึดเกาะสูงสุดระหว่างรากพืชกับดิน (kPa)	2_R
เส้นผ่านศูนย์กลางที่สม่ำเสมอของรากพืช (mm)	d_R
ค่าหน่วยแรงยึดเกาะสูงสุดระหว่างรากพืชกับดิน (kPa)	2_b

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ชื่อเต็ม

สัญลักษณ์

ค่าโมดูลัสแรงดึงของรากพืช (kPa)

E_R

เส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช (mm)

d

มุมเริ่มต้นก่อนเคลื่อนตัวของรากพืชที่อยู่ในช่วงพื้นที่

ระนาบรับแรงเฉือน (หน่วยองศา)

—

ช่วงความลึกจากระดับผิวดินลงไป (หน่วยความยาว)

z

ค่าความหนาแน่นของดิน (kPa)

γ

ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานระหว่างรากพืชกับดิน

f



บทที่ 1

บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงภาพรวมของการศึกษาทั้งหมด โดยแบ่งออกเป็น 5 ส่วนที่สำคัญ คือ ความสำคัญและที่มาของการศึกษา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และนิยามศัพท์เฉพาะ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการศึกษา

ภัยพิบัติจากธรรมชาติในโลกไม่ว่าจะมีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ก็ตาม ย่อมส่งผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งโดยตรงและทางอ้อม ด้วยภัยพิบัติที่เกิดขึ้นนักวิทยาศาสตร์ได้พยายามลงเครื่องมือและแบบจำลองเหตุการณ์ต่าง ๆ โดยอาศัยข้อมูลจากอดีตจนถึงปัจจุบันเพื่อหาแนวทางในการป้องกันภัยพิบัติที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ของข้อมูลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองต้องอาศัยเทคโนโลยีและเทคนิคทางวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ เพื่อศึกษาอธิบายถึงเหตุการณ์ภัยพิบัติที่เกิดขึ้นอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดมา

ในประเทศไทย การเกิดพังทลายของดินนับเป็นภัยพิบัติจากธรรมชาติอีกประเภทที่สามารถจำแนกเหตุที่เกิดได้ 2 ลักษณะคือ การเกิดจากผลของแผ่นดินไหวและฝนตก ซึ่งเหตุภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นซึ่งในประเทศไทยมีโอกาสดังกล่าวไม่บ่อยมากนัก ดังนั้น ส่วนใหญ่เหตุของการพังทลายของดินเกิดขึ้นมาจากฝนตกเป็นเวลานาน ๆ และมีปริมาณความเข้มข้นน้ำฝนที่เพียงพออันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของพายุลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จากทะเลอันดามันที่พัดผ่านในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม และในช่วงเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคมจากทะเลจีนใต้พัดเข้าหาชายฝั่งทางทวีปเอเชีย มีผลจนทำให้สมบัติทางกายภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียงที่มีความชันสูงมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้มวลดินเกิดการเคลื่อนตัวภายใต้แรงดึงดูดของโลกและเกิดการเคลื่อนตัวขององค์ประกอบทางธรณีวิทยาบริเวณดังกล่าวจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ จนกระทั่งมวลดินอุ้มน้ำไว้นานเกิดสภาพอิ่มตัว และทำให้เกิดการพังทลายของดินในเวลาต่อมา ดังเช่นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ราบสูง อำเภอเชียงแสน จังหวัดเชียงราย ซึ่งเกิดจากพายุฝนแต่ละลูกที่มีความเข้มข้นของปริมาณน้ำฝน

จนทำให้เกิดการพังทลายของดินลงมาทับถมร้านค้าไม่น้อยกว่า 5 หลังคาเรือน ทำให้สินค้าที่มีชื่อเสียงประจำอำเภอรวมไปถึงเครื่องประดับเกิดความเสียหาย เป็นอย่างมากในปี พ.ศ.2552 และสืบเนื่องมาจากการตัดไม้ทำลายป่า ขาดต้นไม้ปกคลุมหน้าดิน ในปัจจุบันการพังทลายเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายต่อบริเวณพื้นที่ ๆ เป็นภูเขาที่มีความชันในประเทศไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่งเขตทางภาคเหนือ ภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีโอกาสเกิดการพังทลายของดิน ปัญหาดังกล่าวส่วนใหญ่เกิดหลังจากฝนตกบริเวณภูเขาที่มีความชันมากและเป็นพื้นที่ทางรับน้ำ และเป็นพื้นที่ทำการเกษตรเชิงเขาบริเวณตอนบนของประเทศไทย ทำให้เกิดความเดือดร้อนต่อชุมชนและเกิดความเสียหายต่อบ้านเรือน รวมถึงพื้นที่ทำการเกษตร ทางคมนาคม (พานิช วุฒิพฤกษ์ และคณะ, 2547)

การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพังทลายของดิน นักวิจัยโดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางวิศวกรรมของดินสำหรับงานก่อสร้างและ/หรือการเสริมด้วยระบบรากพืชแบบผสมผสานในความลึกระดับตื้น (ธนภุญณ์ ทิพย์มนตรีและคณะ, 2546) และเพื่อหาแนวทางปรับปรุงสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินที่เสริมโดยระบบ รากพืชแบบผสมผสานรูปสี่เหลี่ยมสำหรับงานป้องกันลาดชันดินกรณีศึกษาจากกระถินเทพาและหญ้าแฝก โดยเน้นทำแปลงเพาะปลูกในลาดดินที่มีความชันที่จัดเตรียมไว้ในลักษณะแตกต่างกัน เพื่อหาความสามารถในการรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น (ชัยชนะ อนุศิลป์ และคณะ, 2546) รวมไปถึงงานวิจัยที่ศึกษาการเพิ่มเสถียรภาพในลาดดินคันทางสูงชันด้วยระบบรากต้นไม้แบบผสมผสาน เพื่อศึกษาระบบ รากต้นไม้แบบผสมผสานระหว่างรากกระถินเทพาและหญ้าแฝก ที่ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงและเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดิน และการจัดรูปแบบการปลูกพืชเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของ ดิน โดยทำการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินถล่มและทำการทดสอบหาค่าความเชื่อมั่นของดินเพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยของดิน ก่อนและหลังการปลูกพืช (ศิริวสุ สงสุทิต และคณะ, 2545 และ พานิช วุฒิพฤกษ์ และคณะ, 2546) ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าว ส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารากพืชความลึกระดับตื้นจากแปลงทดลองที่จัดเตรียมไว้

ดังนั้น ในการศึกษาวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่เน้นศึกษาพัฒนาแบบจำลองเกี่ยวกับการเสริมกำลังรากต้นไม้ร่วมกับแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้เงื่อนไขสภาพดินที่ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณน้ำฝนที่เวลาฝนตก เพื่อหาอัตราส่วนปลอดภัยของดินบนพื้นที่ลาดเอียงในเขตป่าไม้ที่ศึกษา โดยอาศัยตัวแปรที่ได้จากการเก็บข้อมูลสมบัติของมวลดินในสถานที่จริง และจากการทดสอบในพื้นที่จังหวัดเชียงราย โดยนำรากของต้นไม้ประจำท้องถิ่นศึกษาลักษณะและรูปร่างการกระจายตัวของรากต้นไม้ และนำมาเปรียบเทียบกับพื้นที่ ๆ ไม่มีต้นไม้ เพื่อเป็นแนวทางข้อมูลเปรียบเทียบและสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ประสานดินเพื่อ

วิเคราะห์เสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียงเพื่อเป็นแนวทางป้องกันการพังทลายของดินและช่วยลดความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินที่เกิดขึ้นจากภัยพิบัติดังกล่าวได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสองมิติภายใต้เงื่อนไขสภาพดินที่มีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจากปริมาณน้ำฝน เพื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ตำแหน่งและเวลาใด ๆ

1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ประสานดินแบบสองมิติร่วมกับแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้เงื่อนไขสภาพดินที่มีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจากปริมาณน้ำฝน เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนปลอดภัยที่ตำแหน่งและเวลาใด ๆ

1.2.3 เพื่อเป็นแนวทางในการเตือนภัยบริเวณพื้นที่ลาดเอียงในเขตป่าไม้

1.3 ขอบเขตและสมมติฐานของการศึกษา

การศึกษาพัฒนาแบบจำลองเกี่ยวกับการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ร่วมกับแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้เงื่อนไขสภาพดินที่มีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณน้ำฝน เพื่อหาอัตราส่วนปลอดภัยของดินบนพื้นที่ลาดเอียงในเขตป่าไม้ จำเป็นต้องกำหนดขอบเขตในการศึกษาและสมมติฐาน ดังนี้

1.3.1 การพังทลายของดินบนลาดเอียง เกิดจากสมบัติเฉพาะทางกายภาพของดินที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องจากระดับน้ำจากผิวดินที่ไหลซึมเพิ่มขึ้นด้วยปริมาณน้ำฝนและสภาพความไม่อิ่มตัวของดินเท่านั้น

1.3.2 การศึกษาคำนึงถึงผลจากปริมาณของน้ำฝนโดยตรงต่อการพังทลายของดิน แต่ไม่พิจารณาผลอันเกิดจากแรงจากแผ่นดินไหวและลม

1.3.3 การพังทลายของดินจะเกิดในระนาบที่วิเคราะห์เท่านั้นและสมบัติของมวลดินโดยรอบพื้นที่ที่ศึกษาในระดับความลึกที่เท่ากันมีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทางและภายใต้เงื่อนไขทฤษฎีอีลาสโตพลาสติก (Elasto - Plastic Theory)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสองมิติภายใต้เงื่อนไขสภาพดินที่มีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณน้ำฝน ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย ตำแหน่ง และเวลาต่าง ๆ และนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายเวลาการเกิดการพังทลายของมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง เพื่อพัฒนาระบบการเตือนภัยดินถล่มเนื่องจากเหตุฝนตกได้

1.4.2 สร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ประสานดินแบบสองมิติร่วมกับแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้เงื่อนไขสภาพดินที่มีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจากปริมาณน้ำฝนช่วงเวลาฝนตก ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ตำแหน่ง และเวลาต่าง ๆ และนำไปใช้ประโยชน์เพื่อวางแผนการจัดการปลูกป่าไม้ได้

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

หมายถึง การใช้ทฤษฎีและหลักการทางวิทยาศาสตร์ในการอธิบายระบบ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายสิ่งที่เกิดขึ้นในระบบนั้น ๆ

1.5.2 แบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน (Mathematical Model of Slope Stability Analysis)

หมายถึง การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายเสถียรภาพของลาดดินโดยอาศัยหลักการสมดุลแรงและโมเมนต์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่เกิดขึ้นในระบบ

1.5.3 แบบจำลองการไหลของน้ำในมวลดิน (Seepage Flow Model)

หมายถึง การใช้แบบจำลองในการอธิบายการไหลของน้ำผ่านมวลดินว่ามีการเคลื่อนที่ผ่านมวลดินอย่างไร ที่ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ กัน โดยอาศัยหลักการของดาร์ซีและสมการของริชาร์

1.5.4 แบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ประสานดิน (Tree Roots Reinforcement Model)

หมายถึง การใช้แบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ประสานดินเพื่ออธิบายสมบัติทางกายภาพของมวลดินที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ตำแหน่งแตกต่างกัน โดยอาศัยชุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการกำหนดกรอบแนวคิดสำหรับสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง โดยอาศัยศึกษาจากแหล่งข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหลากหลายแขนง เพื่อให้สอดคล้องกับเป้าหมายวัตถุประสงค์ที่ศึกษา ซึ่งต้องอาศัยนำทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องภายใต้สมมติฐานที่กำหนด โดยมีรายละเอียดสามารถแยกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้

ส่วนที่หนึ่ง ซึ่งอยู่ในหัวข้อที่ 2.1 เป็นการสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอธิบายภาพรวมของการศึกษาสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ศึกษา และได้กล่าวถึงการนำเอาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของ ดิน รวมถึงการอธิบายตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ

ส่วนที่สอง ซึ่งอยู่ในหัวข้อที่ 2.2 เป็นการนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการไหลของน้ำในมวลดินอธิบายภาพรวมของการศึกษาสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำในมวลดินร่วมกับแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน รวมถึงการอธิบายตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ที่นำมาสร้างแบบจำลองในส่วนนี้

ส่วนสุดท้าย ซึ่งอยู่ในหัวข้อที่ 2.3 เป็นการสรุปงานวิจัยและการนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับรากต้นไม้อธิบายภาพรวมเพื่อสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับปรับปรุงเสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง โดยพิจารณาผลกระทบเนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ไหลผ่านในมวลดิน ณ เวลาต่าง ๆ รวมถึงการอธิบายตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ที่นำมาสร้างแบบจำลองในขั้นสุดท้าย

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

2.1.1 ทฤษฎีอีลาสติคมอร์คูลอมป์ (Mohr Coulomb Elastic Theory) และกำลังของดิน (Soil Strength)

กำลังของดิน หมายถึง ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของดิน (shearing resistance) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 ประการ คือ

2.1.1.1 มุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (Internal friction angle)

2.1.1.2 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion)

สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น เช่น กรวด ทราย ค่ากำลังต้านทานของแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับมุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามปริมาณน้ำในดิน ขนาดของเม็ดดินและความหนาแน่นของดิน ค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของดินสามารถพิจารณาในรูปของสมการที่ (2.1) ของมอร์คูลอมป์ ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงดังนี้

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.1)$$

โดยที่

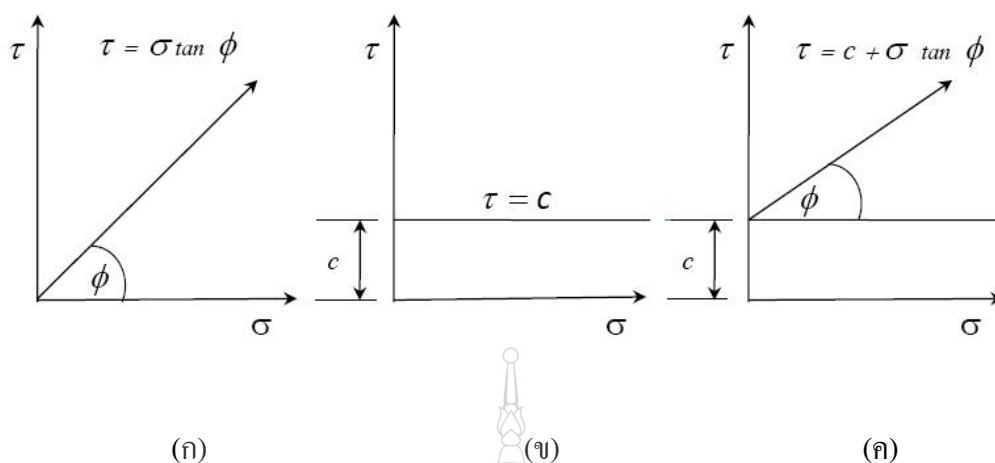
τ = หน่วยแรงเฉือนที่จุดพังทลาย (นั่นคือ ค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของดิน)

c = แรงยึดเหนี่ยวหรือแรงเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน

σ = หน่วยแรงกดหรือแรงตั้งฉาก (Normal Stress) ทั้งหมดบนระนาบแรงเฉือน

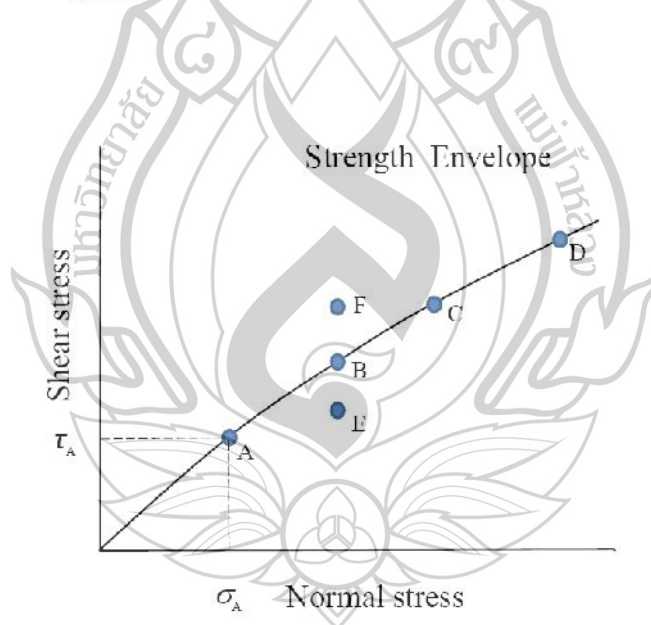
ϕ = มุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) หรือมุมต้านทานต่อแรงเฉือน

เราสามารถจำแนกชนิดของดินตามค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 และเมื่อนำตัวอย่างดินมาอัดในแนวตั้งด้วยความเค้นคงที่และให้น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินถูกระบาย ออกจนหยุด หลังจากนั้นให้ตัวอย่างดินให้ได้รับความเค้นอีกครั้ง ซึ่งความเค้นนี้จะทำให้ตัวอย่างดินเกิดการวิบัติโดยแรงเฉือน (Shear Failure) ที่ระนาบใด ๆ นำค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) และความเค้นในแนวตั้งฉาก (Normal Stress) มาพล็อตลงในกราฟโดยให้แกน X เป็นความเค้นในแนวตั้งฉากและแกน Y เป็นความเค้นเฉือนซึ่งจะได้จุด A ดังในภาพที่ 2.2 จากนั้นนำตัวอย่างดินอีกชุดหนึ่ง (ดินชนิดเดิม) มาทำการทดสอบเหมือนเดิมที่กล่าวมาข้างต้น โดยเพิ่มความเค้นในแนวตั้งฉากจะได้ค่าความเค้นเฉือนและความเค้นในแนวตั้งฉากต่าง ๆ กัน นำค่าความเค้นทั้งสองมาพล็อตลงในกราฟดังภาพที่ 2.2 ได้จุด B, C และ D เส้นที่ผ่านจุด ABCD เหล่านี้จะเรียกว่า ขอบเขต



- หมายเหตุ. (ก) ดินชนิดที่มีแรงเสียดทานภายใน
 (ข) ดินชนิดที่ความเชื่อมแน่นสภาพไม่ระบายน้ำ
 (ค) ดินชนิดที่มีทั้งความเชื่อมแน่นและแรงเสียดทานภายใน

ภาพที่ 2.1 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินชนิดต่าง ๆ



จาก ชินะวัฒน์ มุกตะพันธ์. (2548). ปรุพิภพศาสตร์ (พิมพ์ครั้งที่ 1). ขอนแก่น:
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ภาพที่ 2.2 ขอบเขตของความแข็งแรงของดิน

ความแข็งแรงของมอร์(Mohr strength envelop) ซึ่งเส้นดังกล่าวนี้จะเป็นตัวบอกถึงขอบเขตของความแข็งแรงของวงกลมมอร์ ซึ่งค่าความเค้นเฉือน (envelop) น้อยกว่าค่าความต้านทานแรงเฉือนได้ความเค้นในแนวตั้งฉาก อันเดียวกัน (คือจุด B) ดังนั้นค่าความเค้นเฉือนนี้จะไม่ทำให้ดินเกิดการวิบัติ แต่ถ้าพิจารณาจุด F ซึ่งอยู่เหนือ เส้นโค้งค่าความเค้นเฉือนนี้จะไม่มีทางเกิดขึ้นในดินชนิดนี้ ทั้งนี้ดินจะวิบัติเนื่องจากความเค้นเฉือนที่เท่ากับจุด B ตามทฤษฎีความแข็งแรงของดินโดยมอร์/ Mohr Strength Theory เป็นทฤษฎีที่มีประโยชน์มากเมื่อใช้ในการศึกษาความแข็งแรงของดิน โดยทฤษฎีนี้ได้กล่าวว่า การวิบัติของดินไม่ได้เกิดขึ้นที่ค่าความเค้นเฉือนมากที่สุด แต่จะเกิดขึ้นในระนาบที่วิกฤติเนื่องจากผลของความเค้นในแนวตั้งฉากและความเค้นเฉือนรวมกันดังจุดบนเส้นโค้ง ABCD

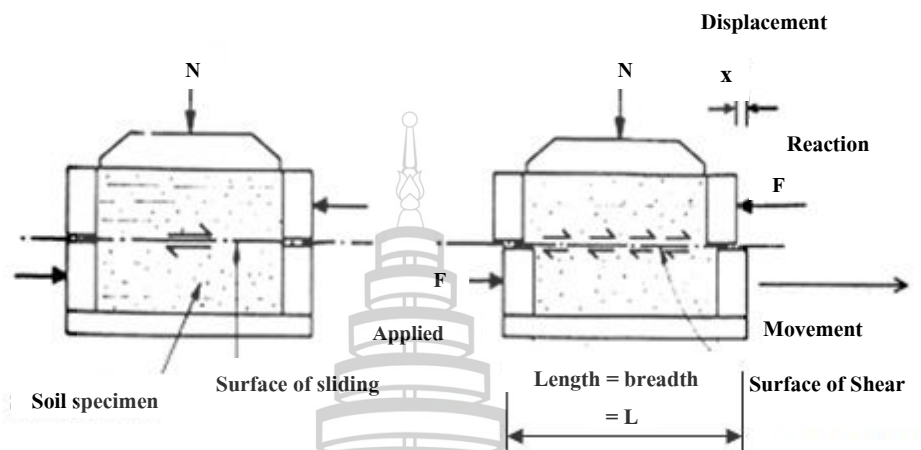
2.1.2 ค่ากำลังแรงเฉือนของดินโดยวิธีการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test)

การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงเป็นการทดสอบหาแรงเฉือนของมวลวัสดุทั้งทราย และดินเหนียวรวมทั้งหินผุบางชนิด วิธีการทดสอบเป็นวิธีที่ปฏิบัติได้ง่าย สามารถทดสอบกับตัวอย่างดินได้ตั้งแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.50 มิลลิเมตร ขนาด 30.0×30.0 มิลลิเมตรจนถึงขนาด 60.0×60.0 มิลลิเมตร ที่ออกแบบเครื่องมือเป็นพิเศษ การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง การทดสอบแบบนี้จะถูกบังคับให้วิบัติในระนาบที่กำหนด โดยปกติจะเป็นแนวอนประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงตัวอย่าง ซึ่งในความเป็นจริง การวิบัติของดินจะไม่เกิดขึ้นตามระนาบที่กำหนด

การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะเป็นการทดสอบดินที่ต้องการอุปกรณ์ในการทดสอบหรือมีขั้นตอนในการทดสอบยุ่งยาก จึงจำเป็นต้องจำลองให้มีความใกล้เคียงมากที่สุด โดยขึ้นอยู่กับคุณภาพของตัวอย่างดิน และอุปกรณ์ในการทดสอบ ซึ่งการทดสอบเกี่ยวกับกำลังของดินของลาดดินทั่วไป (Residual Soil) นิยมการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง ทั้งแบบทดสอบในสนาม และทดสอบในห้องปฏิบัติการดังภาพที่ 2.3 และ 2.4

2.1.3 ลักษณะการทดสอบ Direct Shear Test

ลักษณะการทดสอบ Direct Shear Test สามารถแบ่งออกได้ 3 แบบคือ



จาก นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์. (2546). คุณสมบัติของดินไม่อิ่มตัวเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน: ธรณีศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำก้อ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ภาพที่ 2.3 แรงที่กระทำในการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง



ภาพที่ 2.4 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

2.1.3.1 Unconsolidated–Undrained Test (*UU*) เป็นลักษณะการทดสอบแบบไม่ให้ตัวอย่างดินยุบอัดตัวคายน้ำออกไป (unconsolidated) เนื่องจากหน่วยแรงกดที่เกิดจากการใส่ น้ำหนัก ทับลงบนตัวอย่างดินก็คือไม่ให้ดินมีโอกาสได้ Consolidated น้ำออกไป (โดยสังเกตจากเข็มของ vertical dial gauge ยังไม่หยุดการเคลื่อนที่แต่จะเคลื่อนที่แบบช้ามาก) โดยจะทดสอบทันที และอีก ลักษณะหนึ่งควบคู่กันไป คือ ในขณะที่ทดสอบ จะไม่ให้น้ำในตัวอย่างดินระบายออกไป (undrained) โดยจะปิดทางที่น้ำจะสามารถระบายออกไปได้ทั้งหมดและดำเนินการเฉือน จนกระทั่งตัวอย่างดิน วิกฤติซึ่งการทดสอบแบบ *UU*-Test ก็เปรียบเสมือนกับดินในธรรมชาติถูกแรงกดจำนวนหนึ่งกระทำ ทันที โดยดินยังไม่มีโอกาส Consolidated และ Drained น้ำออกไป การทดสอบแบบนี้สามารถ ทดสอบได้รวดเร็วกว่า 2 แบบหลังมาก

2.1.3.2 Consolidated–Undrained Test (*CU*) เป็นลักษณะการทดสอบแบบยอมให้ ตัวอย่างดินยุบอัดตัวคายน้ำออกไปไม่ได้ (consolidated) เนื่องจากหน่วยแรงกดเหมือนข้อที่ 2.1.3.1 ก็คือ น้ำหนักกดค้างไว้จนกระทั่งตัวอย่างดินสิ้นสุดการยุบตัว (โดยสังเกตจากเข็มของ vertical dial gauge หยุดการเคลื่อนที่) ซึ่งจะใช้เวลาค่อนข้างนานและเมื่อตัวอย่างดินสิ้นสุดการยุบตัวแล้ว จึงจะ เริ่มทำการเฉือนต่อไปโดยไม่ให้น้ำในตัวอย่างดินระบายออกไปได้ (undrained) โดยจะปิดทาง ระบายของน้ำทั้งหมดและดำเนินการเฉือน จนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการวิกฤติ

2.1.3.3 Consolidated–Drained Test (*CD*) เป็นลักษณะการทดสอบแบบยอมให้ ตัวอย่างดินยุบอัดตัวคายน้ำออกไปได้ (consolidated) เนื่องจากหน่วยแรงกดเหมือนข้อ 2.1.3.2 และ เมื่อตัวอย่างดินสิ้นสุดการยุบตัวแล้วจึงจะเริ่มทำการเฉือนต่อไป โดยยอมให้น้ำในตัวอย่างดินระบาย ออกไปได้ (drained) โดยจะเปิดทางระบายน้ำทั้งหมดไว้ซึ่งในขณะที่เฉือนอยู่นั้นตัวอย่างดินก็ยัง คง Consolidated และ Drained น้ำออกได้ตลอดเวลาทำให้การทดสอบแบบ *CD* นี้ต้องให้แรงกับ ตัวอย่างดินแบบช้ามาก (slow test) จึงทำให้ต้องใช้เวลามากในการทดสอบจนกระทั่ง ตัวอย่างดินวิกฤติ

จากวิธีการทดสอบ Direct Shear Test ในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อนำตัวอย่างดินมาศึกษา ร่วมกับการวิเคราะห์ขั้นพื้นฐาน จึงทำให้การทดสอบดิน จำเป็นต้องทดสอบแบบ Consolidated– Undrained Test (*CU*) เป็นลักษณะการทดสอบแบบยอมให้ตัวอย่างดินยุบอัดตัวคายน้ำออกไปไม่ได้ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของดิน เป็นดิน ตะกอนมีสภาพพลาสติกต่ำ และทำให้ตัวอย่างดินไม่ สามารถทดสอบแบบ Unconsolidated–Undrained Test และ Consolidated–Drained Test ได้ ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้ จึงเน้นศึกษาเฉพาะแบบ Consolidated–Undrained Test

2.1.4 การจำแนกประเภทของการพิบัติของลาดดิน

การจำแนกลักษณะการพิบัติของลาดดินถูกเสนอโดย Varnes (1978) สามารถจำแนกชนิดของการพังทลายที่นิยมแบ่งได้เป็น 6 ประเภท คือ

2.1.4.1 การร่วงหล่น (Falls) เป็นการพิบัติในลักษณะที่ชิ้นส่วนของมวลดิน แดกออกจากริมหน้าดินแล้วร่วงหล่นอย่างอิสระ หรือกลิ้งลงมาตามแนวลาดที่มีความชันสูง มีอัตราการเคลื่อนตัวมากกว่า 1 เมตรต่อวินาที

2.1.4.2 แบบกลิ้งไปข้างหน้า (Topples) เป็นการพิบัติที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของหน้าผาของมวลดินที่เกิดการเอียงตัว โดยที่มวลดินนั้นยังไม่เกิดการพังทลาย เมื่อมวลวัสดุคว่ำลงจะหมุนตัวลงสู่ลาดเอียงอย่างรวดเร็ว กรณีนี้จะเกิดเมื่อวัสดุที่มีความแข็งแรงวางตัวอยู่เหนือวัสดุที่แข็งแรงน้อยกว่า

2.1.4.3 แบบเลื่อนไถล (Slides) เป็นการเคลื่อนตัวของมวลดินผ่านแนวระนาบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด โดยอัตราการเคลื่อนตัวอยู่ในช่วง 0.06 เมตรต่อวินาที ถึง 0.30 เมตรต่อวินาที โดยสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้

- 1) แบบ Rotational Slides แนวการพิบัติจะมีลักษณะเป็นส่วนโค้งของวงกลม
- 2) แบบ Translation Slides แนวการพิบัติไม่เป็นส่วนโค้งของวงกลม แต่จะมีแนวของการพิบัติเกือบอยู่ในระนาบ โดยทั่วไปทิศทางของการเคลื่อนตัวจะถูกจำกัดไปตามระนาบของผิวดินอ่อน

2.1.4.4 แบบเคลื่อนตัวขยายไปด้านข้าง (Lateral spreads) มีลักษณะการเคลื่อนตัวเป็นการขยายตัวไปด้านข้างของมวลดิน การเคลื่อนที่แบบนี้จะพบในมวลดินประเภท Sensitive Silt and Clay

2.1.4.5 แบบไหล (Flows) ลักษณะการเคลื่อนตัวของมวลดินจะพบในวัสดุที่ไม่มีการยุบอัดแน่นเช่น ก้อนหิน กรวด ทราย และเม็ดดิน โดยจะไหลลงตามแนวลาดเอียงของเชิงเขาเป็นผิวนานกับผิวหน้าของลาดที่มีความชันสูง โดยมีอัตราการเคลื่อนตัว 0.30 เมตรต่อวินาทีถึงมากกว่า 3.0 เมตรต่อวินาที

2.1.4.6 แบบผสม (Complex) ลักษณะการเคลื่อนตัวที่ประกอบด้วยหลายรูปแบบรวมกันเช่น การเคลื่อนพังที่ประกอบด้วย Rock Slide, Rock fall, Earth flow เป็นต้น

ในกรณีนี้กำลังรับแรงเฉือนตลอดทั้งและเกิดรอยแตกขึ้นบริเวณบนลาดที่มีความลึก ทำให้ ส่วนของดินที่ช่วยรับแรงเฉือนตามแนวผิวที่เกิดการวิบัติช่วยด้านการเคลื่อนตัวมีค่าลดลง และเกิดมี น้ำขึ้นในรอยแตก แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในรอยแตกจะเป็นตัวเพิ่มแรงดันให้ลาดตลิ่งเกิดการเคลื่อนตัว พังทลาย โดยที่หน่วยน้ำหนักดินเป็นกลุ่ม Bulk Unit Weight หรือ หน่วยน้ำหนักรวม Total Unit Weight แรงดันน้ำที่ส่วนล่างของลาดดินจะเป็นตัวเพิ่มแรงด้านการเคลื่อนตัว และจากแรงดันน้ำที่ ส่วนล่างของลาดดินจะมีความสมดุลกับมวลของน้ำในโครงสร้างระหว่างมวลดินส่วนที่อยู่ใต้ระดับ น้ำและอยู่เหนือแนวผิวที่เกิดการวิบัติ (Rupture Surface) ดังนั้นน้ำหนักดินส่วนที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำ ใต้ดินจึงคำนวณโดยใช้หน่วยน้ำหนักรวมของดินลบด้วยหน่วยน้ำหนัก ของน้ำ ($\gamma - \gamma_w$) หรือ Submerged Unit Weight ทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินตามธรรมชาติ ส่วนใหญ่เป็นไป ตามทฤษฎีของ Infinite Slope

ตามทฤษฎีของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน จะเกิดการพังทลายแบ่งออกเป็น สอง ลักษณะ คือ การพังทลายเป็นส่วนวงกลมและไม่เป็นส่วน โค้งของวงกลม ส่วนมากจะนิยมใช้วิธี แบ่งชั้นดินตามแนวดิ่ง (principle of slices) โดยวิธีนี้จะสมมติให้ชั้นส่วนในแนวดิ่งพังทลายแยก เป็นชั้น ๆ และสถานะสมดุลของแต่ละชั้นจะถูกพิจารณา วิธีนี้ ขอมให้มีรูปแบบการพังทลายมีความ ซับซ้อนได้ และขอมให้มีการแปรผันได้ตามลักษณะของชนิดดินตลอดจนสภาพแรงดันน้ำ ช่องว่าง (pore water pressure) ที่เกิดจากระดับน้ำใต้ดิน อันเนื่องมาจากฝนตกเป็นเวลานาน ๆ ซึ่ง ปัจจุบันมีวิธีที่นิยมใช้กันสามารถแยกดังนี้

2.1.5.1 Fellenius Method (1936)

2.1.5.2 Simplified Bishop Method (1955)

2.1.5.3 Janbu Method (1954)

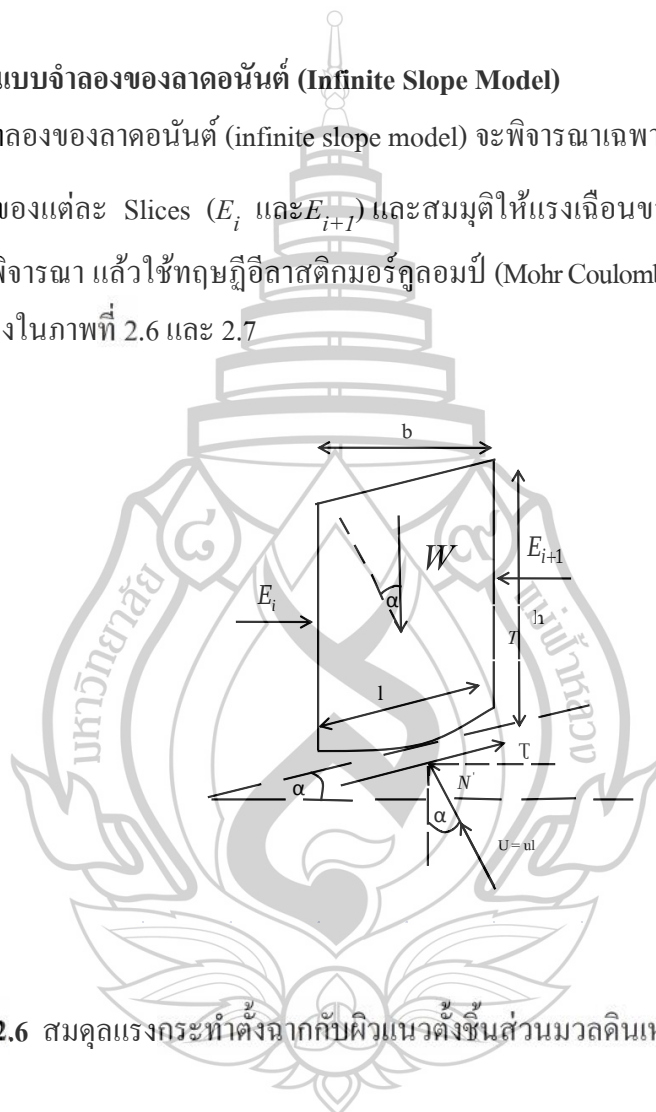
2.1.5.4 Morgenstern and Price Method (1967)

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพตามทฤษฎีของลาดอนันต์ (infinite slope) สามารถจำแนกแนว ระนาบการพังทลายที่เป็นส่วนหนึ่งของวงกลม (circular slips) และแบบไม่เป็นส่วน โค้งของวงกลม (non - circular slips) การพิจารณาแนวพังทลายเป็นส่วน โค้งของวงกลม (circular slips) เป็นที่นิยม มากเนื่องจากทำการคำนวณได้สะดวกและมีความผิดพลาดไม่มากยอมรับได้ แต่จะมีความซับซ้อน ในการกำหนดแนวจุดหมุนที่ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่ำสุด ส่วนการพังทลายที่ไม่เป็นส่วน โค้งของวงกลมจะกำหนดให้ใช้กรณีที่สมมติเห็นหรือทราบลักษณะการวางตัวของรอยเลื่อนที่เด่นชัดในสนาม หรือ มีการพังทลายในระดับดิน ๆ

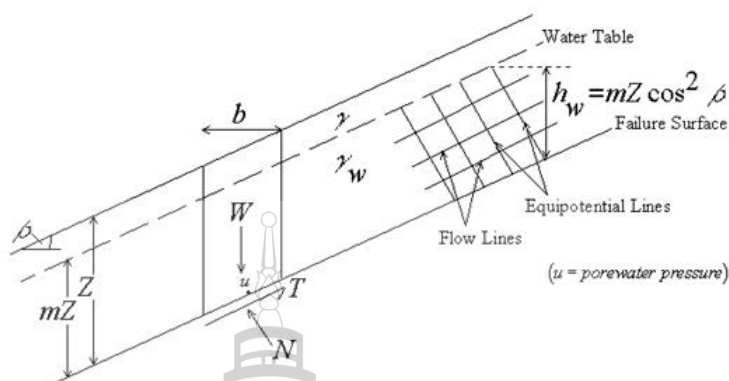
ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้เริ่มต้นนำเอาแบบจำลองตามทฤษฎีของลาดอนันต์ (infinite slope) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินตามธรรมชาติ เนื่องจากการคำนวณได้สะดวกและมีความผิดพลาดไม่มากและเป็นที่ยอมรับ โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์โดยวิธีสมดุลแรงภายในชิ้นส่วนเหนือแนวทางการพังทลายสมมุติ ซึ่งต้องแก้ปัญหาดังแสดงในสมการสมดุลแรงในหัวข้อต่อไป

2.1.6 แบบจำลองของลาดอนันต์ (Infinite Slope Model)

แบบจำลองของลาดอนันต์ (infinite slope model) จะพิจารณาเฉพาะแรงที่กระทำดังฉากกับผิวแนวตั้งฉากของแต่ละ Slices (E_i และ E_{i+1}) และสมมุติให้แรงเฉือนของผิวในแนวตั้งที่ Slices ใด ๆ ไม่นำมาพิจารณา แล้วใช้ทฤษฎีอีลาสติคโมร์คูลอมบี้ (Mohr Coulomb Elastic Theory) พิจารณาร่วมกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.6 และ 2.7



ภาพที่ 2.6 สมดุลแรงกระทำดังฉากกับผิวแนวตั้งชิ้นส่วนมวลดินเหนือแนวพังทลาย



ภาพที่ 2.7 แรงที่กระทำตามแนวพังทลายสมมุติภายในชั้นส่วนตามทฤษฎีของลาคอนด์

ในการพิจารณาค่าการพังทลายของดินบนลาดเอียงตามทฤษฎีของลาคอนด์ สามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานของมวลดินเหนือเคลื่อนพังสมมุติกับแรงที่พยายามทำให้พังตามแนวลาดเอียง โดยที่ค่าแรงที่พยายามทำให้เกิดการเคลื่อนตัว (T) เมื่อนำมาหาอัตราส่วนปลอดภัย ภายใต้เงื่อนไขหลักการสมดุลของแรง จะได้ดังแสดงในสมการที่ (2.2) ถึง สมการที่ (2.13)

$$FS = \frac{\text{Resisting Force}}{\text{Driving Force}} \quad (2.2)$$

เมื่อพิจารณาจากหลักการสมดุลของแรงในแนวดิ่ง ดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$\sum F = 0 \quad (2.3)$$

จะได้ $N = W \cos$ (2.3)

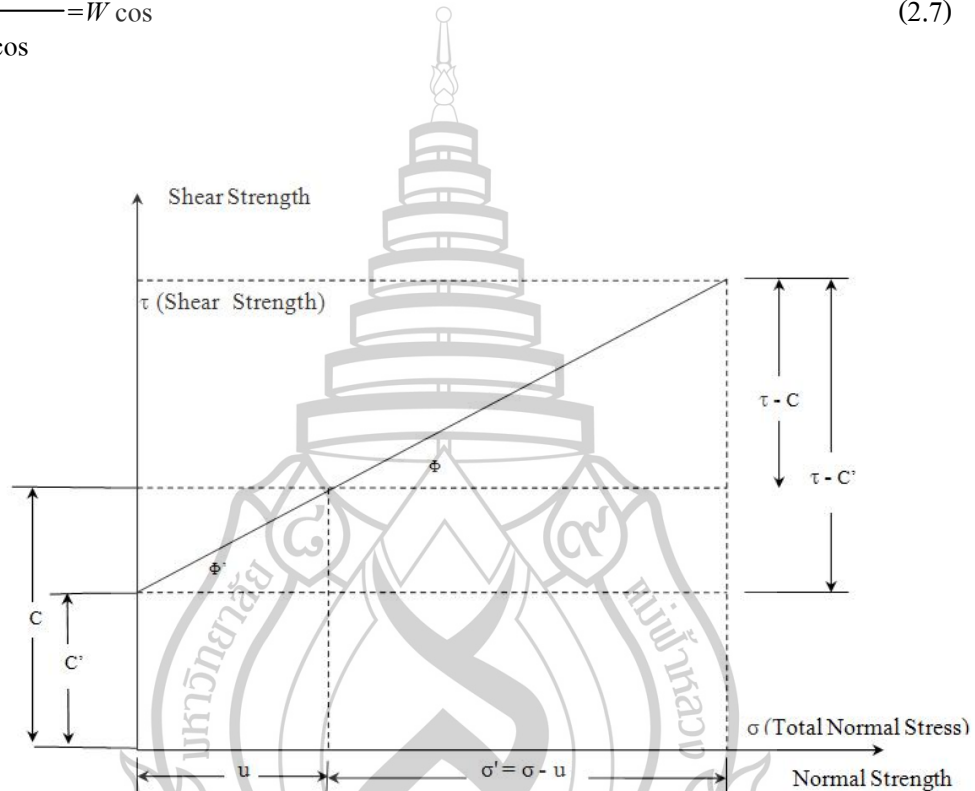
และ $T = W \sin$ (2.4)

เมื่อพิจารณาค่าแรงต้านทาน (resisting force) ตามทฤษฎีอีลาสติคมอร์คูลอมป์ (Mohr Coulomb Elastic Theory) สามารถพิจารณาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normal Strength กับ Shear Strength ดังแสดงในภาพที่ 2.8

$$2 = \frac{1}{FS} \left[c' + (\pm u) \tan \alpha' \right] \quad (2.5)$$

$$T = 2 \frac{b}{\cos} = \frac{1}{FS} \left[\frac{c' b}{\cos} + \left[\frac{cb}{\cos} - \frac{ub}{\cos} \right] \tan \alpha' \right] \quad (2.6)$$

$$N = \frac{c' b}{\cos} = W \cos \quad (2.7)$$



$$W \sin = T = \frac{1}{FS} \left[\frac{c' b}{\cos} + \left[W \cos - \frac{ub}{\cos} \right] \tan \alpha' \right] \quad (2.8)$$

ภาพที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normal Strength กับ Shear Strength ตามทฤษฎี

Mohr-Coulomb Strength Envelope

$$FS = \frac{c' + b \left(W \cos^2 \alpha - ub \right) \tan \alpha'}{W \sin \alpha} \quad (2.9)$$

$$W = mZb\gamma_{sat} + (1-m)Zb\gamma = Zb \left[m\gamma_{sat} + (1-m)\gamma \right]$$

(2.10)

$$u = \gamma_w h_w = mZ\gamma_w \cos^2 \alpha \quad (2.11)$$

$$FS = \frac{c' + b \left[Zb \cos^2 \alpha \left(m\gamma_{sat} + (1-m)\gamma \right) - mb\gamma_w Z \cos^2 \alpha \right] \tan \alpha'}{Zb \sin \alpha \cos \alpha \left[m\gamma_{sat} + (1-m)\gamma \right]} \quad (2.12)$$

$$FS = \frac{c' + Z \cos^2 \alpha \left[m\gamma_{sat} + (1-m)\gamma - m\gamma_w \right] \tan \alpha'}{Z \sin \alpha \cos \alpha \left[m\gamma_{sat} + (1-m)\gamma \right]}$$

(2.13)

โดยที่

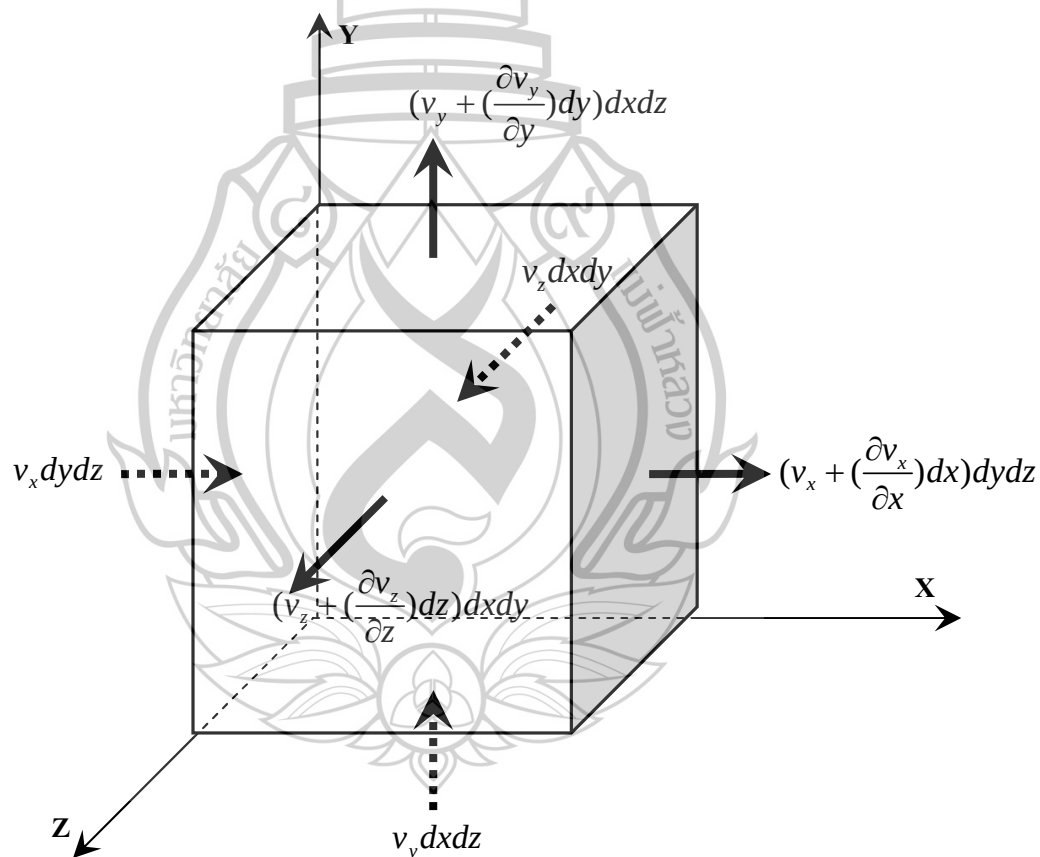
W	คือ น้ำหนักของมวลดินเหนือเส้นแนวเคลื่อนพังแต่ละชั้นส่วน
N'	คือ แรงตั้งฉากประสิทธิผลของชั้นส่วน
	คือ มุมของลาดเอียงที่ฐานของชั้นส่วน
$U = ul$	คือ แรงดันน้ำภายในชั้นส่วนของมวลดิน
l	คือ ความยาวของส่วนโค้งที่ฐานของชั้นส่วน
T	คือ แรงเฉือนประสิทธิผลที่ฐานของชั้นส่วนตามแนวการเคลื่อนพัง
α	คือ มุมเสียดทานภายในของมวลดิน (Total Internal Friction)
α'	คือ มุมเสียดทานภายในแบบประสิทธิผลของมวลดิน (Effective Internal Friction)
h_w	คือ ความลึกของปริมาณน้ำฝนเหนือแนวเคลื่อนพัง
γ_w	คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ
γ_{sat}	คือ หน่วยน้ำหนักของมวลดินในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ
γ	คือ หน่วยน้ำหนักของมวลดินในสภาพความชื้นตามธรรมชาติ
$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$	คือ หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของมวลดิน
Z	คือ ความลึกของแนวเคลื่อนพังบนระนาบลาดเอียง
$m = \frac{h_w}{Z}$	คือ อัตราส่วนความลึกของปริมาณน้ำฝนเหนือแนวเคลื่อนพังต่อความลึกของแนวเคลื่อนพังบนระนาบลาดเอียง

2.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการไหลของน้ำในมวลดิน

การศึกษาการไหลของน้ำผ่านมวลดินครั้งนี้จะอาศัยใช้ทฤษฎีของดาร์ซี (Darcy's theorem) และทฤษฎีการไหลของน้ำผ่านมวลดิน (seepage flow theory) ควบคู่กันและนำเอาเทคนิควิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งต้องอาศัยตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ โดยมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

2.2.1 สมการอนุพันธ์ย่อยการไหลของน้ำ (Partial Differential Water Flow Equations)

สมการของการไหลเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งที่ใช้พิจารณาหาอัตราการไหลของน้ำผ่านในมวลดินสามารถใช้ได้กับดินในสภาพไม่อิ่มตัวและสภาพอิ่มตัว ซึ่งพื้นฐานโดยทั่วไปใช้กฎของดาร์ซี (Darcy's Law) ในการพิจารณาหาการไหลของน้ำผ่านในมวลดิน ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การพิจารณารูปร่างของมวลดินตามกฎของอนุรักษมวลในทิศทาง X, Y และ Z

กฎของดาร์ซี (Darcy's Law) เป็นกฎพื้นฐานที่สำคัญเพื่อใช้แก้ปัญหาสำหรับดินที่มีสภาพอิ่มตัว แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าสมการของ Darcy สามารถนำมาใช้ได้กับดินที่มีลักษณะไม่อิ่มตัวได้ด้วย โดยในงานของริชาร์ด (Richards, 1931) ซาห์น และโคลลินส์ Childs & Collins-George (1950) ค่าความแตกต่างกันของสภาพความอิ่มตัวของดินจะถูกใช้เป็นสภาวะเงื่อนไขสำหรับการไหลของน้ำในมวลดินที่มีสภาพไม่อิ่มตัวซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (hydraulic conductivity) จะใช้เป็นค่าคงที่ซึ่งส่วนใหญ่จะแปรผันตามค่าปริมาณความชื้น (water content) และแปรผันตามค่าแรงดันน้ำในมวลดิน (pore-water pressure)

เมื่ออัตราการไหลเข้าและออกของน้ำผ่านมวลดิน มีความแตกต่างกันและเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำที่แปรผันตามเวลา ซึ่งจะขึ้นกับสภาพไม่อิ่มตัวในปริมาตรของมวลดินในสภาพตามธรรมชาติ เมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินเกิดเนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ซึมผ่าน ดังนั้นจึงสามารถใช้กฎของอนุรักษ์มวลสำหรับเพื่อพิจารณาการไหลของน้ำผ่านในมวลดิน ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.16) ถึง (2.20)

$$Q = A v \quad (2.14)$$

$$v = k i \quad (2.15)$$

$$Q_{\text{out}} - Q_{\text{in}} = \frac{dV_w}{dt} \quad (2.16)$$

$$\frac{dV_w}{dt} = (dx dy dz) \frac{\partial}{\partial t} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} & [(v_x + (\frac{\partial v_x}{\partial x})dx)dydz + (v_y + (\frac{\partial v_y}{\partial y})dy)dxdz + (v_z + (\frac{\partial v_z}{\partial z})dz)dxdy] + \\ & [(v_x dxdydz) + (v_y dxdydz) + (v_z dxdydz)] = (dxdydz) \frac{\partial}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$[\frac{\partial v_x}{\partial x} dxdydz + \frac{\partial v_y}{\partial y} dxdydz + \frac{\partial v_z}{\partial z} dxdydz] = (dxdydz) \frac{\partial}{\partial t} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t} \quad (2.20)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วของดาร์ซี (Known as the Darcian velocity)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของมวลที่นำมาพิจารณาในทิศทางระหว่างระนาบของ X Y Z

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity)

$$k = k(k_x, k_y, k_z)$$

i คือ เส้นลาดความต่างศักย์ของระดับความสูงของน้ำในมวลดิน (Gradient of fluid head or potential)

$$i = H(x,y,z) = \nabla H = \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z}$$

ค่าความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนตัวของน้ำผ่านในมวลดินซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จึงสามารถใช้ค่าความเร็วของดาร์ซี (darcian velocity) ได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความพรุนระหว่างมวลดิน การคำนวณหาค่าความซึมผ่านของน้ำในมวลดินสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.22) ดังนั้นสมการดังกล่าวเมื่อแทนค่า k และค่า i จะสามารถพิจารณาในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลของน้ำผ่านมวลดินในทิศทางต่าง ๆ ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.21)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right] + Q = \frac{\partial}{\partial t} \quad (2.21)$$

โดยที่ H คือ ค่าศักย์รวมของน้ำ (Total head)

k_x คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านในทิศทางแกน x
(Hydraulic conductivity in the x-direction)

k_y คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านในทิศทางแกน y
(Hydraulic conductivity in the y-direction)

k_z คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านในทิศทางแกน z
(Hydraulic conductivity in the z-direction)

θ คือ ปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดิน (volumetric water content)

t คือ เวลา (Time)

Q คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านในมวลดินเนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ซึมผ่าน

สมการที่ (2.23) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างอัตราการไหลผ่านเข้าไปของน้ำในมวลดิน (flux) และเป็นปัจจัยส่วนสำคัญที่จะพิจารณารูปของปริมาตรจุด ๆ หนึ่งในเวลาใด ๆ ซึ่งจะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในปริมาตรของการเปลี่ยนแปลงของการไหลที่แปรผันตามเวลา (the volumetric water content) ในทิศทางแกน x, y และ z

เมื่อพิจารณามวลดินที่มีลักษณะที่บ้น้ำ ทำให้การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดิน มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาวะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นต่ำภายใต้เงื่อนไขการไหลผ่านเข้าไปของ

น้ำในมวลดิน จึงทำให้การไหลของน้ำในมวลดินเกิดขึ้นอย่างช้าๆและไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (Steady state) จึงทำให้เทอม $\frac{\partial}{\partial t}$ ทางด้านขวาของในสมการที่ (2.21) มีค่าน้อยมาก และทำให้การ

คำนวณหาปริมาตร (volume) ในสมการดังกล่าวสามารถถูกลบลง ดังแสดงในสมการที่ (2.22)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right] + Q = 0 \quad (2.22)$$

และเมื่อมวลดินมีสภาพที่อิ่มตัวและไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำในมวลดิน ค่าประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินจึงไม่แปรผันตามเวลาในทิศทางแกน x, y และ z ดังนั้นจึงทำให้ค่า k_x , k_y และ k_z มีค่าเท่ากัน ในสมการที่ (2.22) สามารถสรุปได้ ซึ่งจะเรียกสมการดังกล่าวว่า สมการลาปลาซ (Laplace Equation) แสดงในสมการที่ (2.23)

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (2.23)$$

2.2.2 การหาฟังก์ชันปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดิน (Volumetric Water Content Functions)

การหาฟังก์ชันปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดินโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นหรือสภาพความไม่อิ่มตัวของมวลดิน และลักษณะช่องว่างระหว่างมวลดิน ดังนั้นค่าปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดิน (θ) ก็คืออัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำต่อปริมาตรของมวลดิน ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังในสมการที่ (2.24)

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (2.24)$$

โดยที่ θ คือ ปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดิน

(Volumetric Water Content)

V_w คือ ปริมาตรของน้ำในปริมาตรทั้งหมด (Volume of Water)

V คือ ปริมาตรทั้งหมด (Total Volume)

สถานะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นนั้นสำหรับทั้งสภาพเงื่อนไขดินแบบอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวสามารถอธิบายได้โดย 2 สถานะที่เปลี่ยนแปลงไป นำเสนอโดยเฟรดลุนด์ และมอร์แกนเทิร์น Fredlund and Morgenstern (1976) และ Fredlund and Morgenstern (1977) สถานะที่เปลี่ยนแปลงไป ก็คือ สถานะ

ของหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงทั้งค่า u_a และ $(u_a - u_w)$ โดยที่ $(u_a - u_w)$ คือ หน่วยแรงรวม (the total stress) , u_a คือหน่วยแรงดันอากาศในมวลดิน (the pore-air pressure) และ u_w ก็คือ หน่วยแรงดันน้ำในช่องว่างมวลดิน (pore water pressure)

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดินเกิดขึ้น สามารถสร้าง สมการความสัมพันธ์ในรูปของการเปลี่ยนแปลง ค่าแรงดันน้ำในช่องว่างของมวลดินได้ ดังในสมการที่ (2.25)

$$\frac{\partial}{\partial u_w} = m_w \quad (2.25)$$

โดยที่

m_w คือ เส้นโค้งความชันของปริมาตรกักเก็บ (Slope of the storage curve)

เพื่อให้สอดคล้องกับการแก้สมการของการไหลของน้ำผ่านมวล จึงอาศัยค่าศักย์รวมของน้ำ (Total hydraulic head) จะมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างค่าความต่างระดับความสูงของลาดเอียงและค่าความต่างเนื่องจากแรงดันของน้ำในมวลดินบนลาดเอียง ซึ่งจะใช้ในการอธิบายดังแสดงในสมการที่ (2.26)

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (2.26)$$

โดยที่

H คือ ค่าศักย์รวมของน้ำ (Total hydraulic head)

u_w คือ แรงดันน้ำในช่องว่างของมวลดิน

γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำในช่องว่างของมวลดิน

y คือ ค่าความต่างระดับความสูงของลาดเอียง

ดังนั้น สามารถเขียนสมการที่ (2.26) ใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของค่าแรงดันน้ำในช่องว่างของมวลดิน ดังแสดงในสมการที่ (2.27)

$$u_w = \gamma_w (H - y) \quad (2.27)$$

เมื่อเอาสมการที่ (2.27) แทนในสมการที่ (2.25) และจัดรูปแบบสมการใหม่สามารถนำมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดินในรูปของตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับแรงดันน้ำในช่องว่างของมวลดิน การไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดินเป็นสมการที่มีเงื่อนไขคงที่ของหน่วยแรงรวม ($\pm$) สำหรับมวลดินที่ไม่มีน้ำหนักรรทุก สมมติฐานอีกประการคือ ค่าความดันอากาศยังคงเหลือทำให้เป็นช่องว่างในความดันในบรรยากาศซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ตามเวลา ซึ่งหมายความว่า

ว่าค่าของ $(\pm - u_a)$ จะคงที่และไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงในปริมาณน้ำในปริมา การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำจึงขึ้นอยู่กับปริมาตร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงตัวแปรภายใต้สภาวะหน่วยแรง $(u_a - u_w)$ และเมื่อค่าหน่วยแรง u_a ที่เหลือมีสภาวะคงที่ การเปลี่ยนแปลงในปริมาณน้ำในปริมาตรจะเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันน้ำในมวลดิน สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในปริมาตรในรูปแบบความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำในมวลดิน ดังแสดงในสมการที่ (2.28)

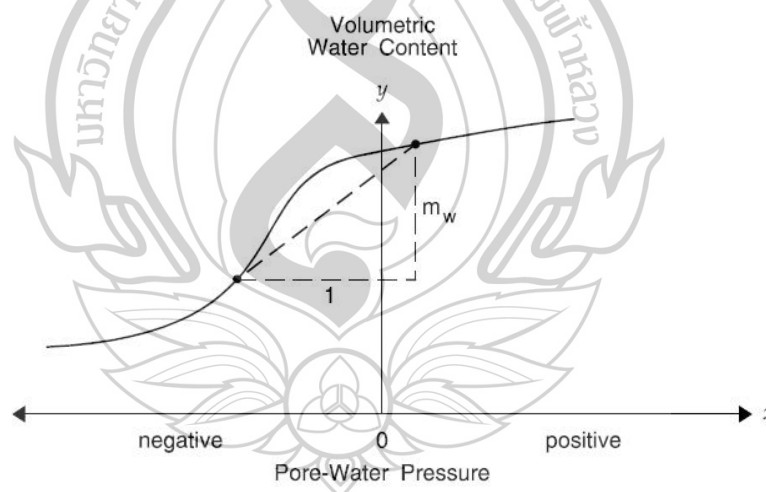
$$\sigma = m_w \epsilon_w \frac{\partial(H-y)}{\partial t} \quad (2.28)$$

ซึ่งจากสมการที่ (2.28) นำไปแทนค่าในสมการที่ (2.22) จะได้ดังสมการที่ (2.29)

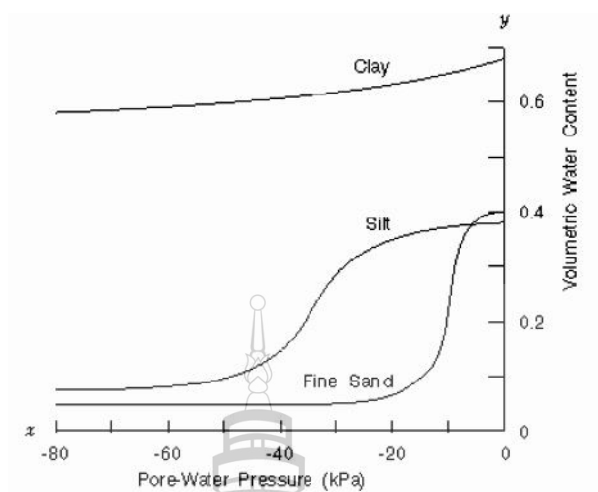
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right] + Q = m_w \epsilon_w \frac{\partial(H-y)}{\partial t} \quad (2.29)$$

จนกระทั่งค่าระดับความสูงของน้ำมีค่าคงที่ ทำให้ค่าตัวแปร $y = 0$ ที่เวลาใด ๆ ดังนั้นสมการที่ (2.29) จึงสามารถลดรูปเป็นดังสมการที่ (2.30)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right] + Q = m_w \epsilon_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.30)$$



ภาพที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำในช่องว่างกับปริมาณน้ำในปริมาตรของดิน



ภาพที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pore-Water Pressure กับ Actual Volumetric Water Content Functions ของทรายละเอียด ดินตะกอนและดินเหนียว

โดยทั่วไปดินตามธรรมชาติจะมีลักษณะโครงสร้างของมวลดินที่แตกต่าง ฉะนั้นจึงทำให้การหาค่าปริมาณน้ำในปริมาตรมวลดินจึงขึ้นอยู่กับแรงดันน้ำในมวลของดินซึ่งค่า m_w สามารถหาได้จากทดสอบโดย Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993, pp 136-140) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังในภาพที่ 2.10 และ 2.11

2.2.3 การประยุกต์หลักการเทคนิคทางไฟฟ้าในอิลิเมนต์สำหรับการไหลของน้ำผ่านมวลดิน

เมื่อนำสมการที่ (2.21) และ (2.22) มาพิจารณาสำหรับการวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านมวลดินในระนาบสองมิติ ซึ่งมีค่าคงที่ในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำ k_x และ k_y ในทิศทางแกน x และ y ตามลำดับ สามารถลดรูปสมการดังแสดงในสมการที่ (2.31) และ (2.32)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial (H - y)}{\partial t} \quad (2.31)$$

จนกระทั่งค่าระดับความสูงของน้ำมีค่าคงที่ ทำให้ค่าตัวแปร $y = 0$ ที่เวลาใด ๆ ดังนั้นสมการที่ (2.31) จึงสามารถลดรูปเป็นดังสมการที่ (2.32)

$$\frac{\partial}{\partial x} [k_x \frac{\partial H}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [k_y \frac{\partial H}{\partial y}] + Q = m_w \nabla_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.32)$$

ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์นำเอาหลักการของ Galerkin โดยวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Galerkin method of weighted residual) นำมาใช้ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาการไหลของน้ำผ่านมวลดินแบบสองมิติ สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (2.33)

$$^2 \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \{H\} + ^2 \int_A ({}^a \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \{H\}, t = q^2 \int_L (\langle N \rangle^T) dL \quad (2.33)$$

- โดยที่ [B] คือ เมทริกซ์เกรเดียน (the gradient matrix)
- [C] คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านชั้นส่วนมวลดิน (the element hydraulic conductivity matrix)
- {H} คือ เวกเตอร์ของค่าศักย์ของน้ำ (the vector of nodal heads)
- $\langle N \rangle$ คือ เวกเตอร์ของฟังก์ชันประมาณค่าภายในชั้นส่วน (the vector of interpolating function)
- q คือ อัตราปริมาณการไหลผ่านหน้าตัดบริเวณขอบของชั้นส่วน (the unit flux across the edge of an element)
- z คือ ความหนาของชั้นส่วน (the thickness of an element)
- t คือ เวลา (time)
- a คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ความซึมได้ของมวลดินสำหรับการไหลที่ขึ้นกับเวลาในสถานะไม่อยู่ตัว (storage term for a transient seepage equal to $m_w \nabla_w$)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดภายในของชั้นส่วน (a designation for summation over the area of an element)
- L คือ ความยาวของชั้นส่วนระหว่างจุดใด ๆ (a designation for summation over the edge of an element)

2.2.3.1 การปริพันธ์แบบเชิงเงื่อนไขของเวลา (Time integration)

สำหรับการศึกษาครั้งนี้จะเป็นการวิเคราะห์ภายใต้การไหลของน้ำที่ขึ้นอยู่กับเวลาในเงื่อนไขการไหลของน้ำแบบไม่อัดตัวในโครงสร้างของมวลดิน เมื่อนำเทคนิคทางไฟไนต์อีลิเมนต์ช่วยในการแก้ปัญหของสมการ อีกทั้ง: ญหาดังกล่าวจะเป็นการไหลในมวลดินอย่างช้า ๆ ตามสภาพตามธรรมชาติ จึงพิจารณาสมการปริพันธ์แบบเชิงเงื่อนไขของเวลา โดยวิธีการประมาณ

ผลต่างสลับเนื่อง (finite difference approximation) ให้อยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับเวลา ดังแสดงในสมการที่ (2.34) ถึง (2.35)

$$(\mu\Delta t[K]+[M])\{H_1\} = \Delta t((1-\mu)\{Q_0\} + \mu\{Q_1\}) + ([M] - (1-\mu)\Delta t[K])\{H_0\} \quad (2.34)$$

โดยที่

t คือ เวลาที่เพิ่มขึ้นภายใต้การเปลี่ยนเงื่อนไขของปัญหา (the time increment)

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณคมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

H_1 คือ ค่าศักย์ของน้ำที่จุดสุดท้ายของเวลาที่เพิ่มขึ้น (the head at end of time increment)

H_0 คือ ค่าศักย์ของน้ำที่จุดเริ่มต้นของเวลาที่เพิ่มขึ้น (the head at start of time increment)

Q_1 คือ ปริมาณฟลักซ์ที่จุดสุดท้ายของเวลาที่เพิ่มขึ้น

(the nodal flux at end of time increment)

Q_0 คือ ปริมาณฟลักซ์ที่จุดเริ่มต้นของเวลาที่เพิ่มขึ้น

(the nodal flux at start of time increment)

ในการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาทางไฟไนต์อีลิเมนต์จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น อีกทั้งได้ใช้สมการผลรวมภายใต้เงื่อนไขของเวลาโดยวิธีการประมาณผลสลับเนื่องแบบย้อนกลับ (Backward difference method) จึงทำให้ μ มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น สมการจึงสามารถลดรูป ดังแสดงในสมการที่ (2.35)

$$(\Delta t[K]+[M])\{H_1\} = \Delta t\{Q_1\} + [M]\{H_0\} \quad (2.35)$$

2.2.3.2 การปริพันธ์แบบเชิงตัวเลข (Numerical integration)

ในการคำนวณหาเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ความซึมได้ของชิ้นส่วน $[K]$ และเมทริกซ์ของปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดิน $[M]$ จะต้องอาศัยเทคนิคการปริพันธ์เชิงตัวเลข ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีเชิงตัวเลขของเกาส์ (Gaussian numerical integration) ช่วยในพิจารณาจุดใด ๆ ภายในชิ้นส่วนของปัญหาที่ศึกษา ดังแสดงในสมการที่ (2.36) และ (2.37)

$$[K] = 2 \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \quad (2.36)$$

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.36) ประยุกต์ใช้กับปัญหาที่ศึกษาสามารถเปลี่ยนรูปแบบสมการให้อยู่รูปของผลรวมปริพันธ์เชิงตัวเลขแบบอย่างง่าย ดังแสดงในสมการที่ (2.37)

$$[K] = 2 \sum_{j=1}^n [B_j]^T [C_j] \det |J_j| W_{1j} W_{2j} \quad (2.37)$$

โดยที่ j คือ ค่าเริ่มต้นของการอินทิเกรต (an integration point)

n คือ ค่าจำนวนทั้งหมดของการอินทิเกรต (the numerical of integration points)

$[C_j]$ คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ความซึมได้ของชั้นส่วนมวลดินที่จุดอินทิเกรต

(the element hydraulic conductivity matrix at the integration point)

$[B_j]$ คือ เมทริกซ์ชั้นส่วนภายในที่จุดอินทิเกรต

(the element matrix at the integration point)

$\det |J_j|$ คือ ดีเทอร์มิแนนของเมทริกซ์จาโคบี (the determinant of the Jacobian matrix)

$W_{1j} W_{2j}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวถ่วงน้ำหนัก (weighting factors)

2.2.3.3 การหาเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในมวลดิน

(Hydraulic conductivity matrix)

สำหรับการแก้สมการของปัญหาการไหลของน้ำผ่านมวลภายในชั้นส่วนต่าง ๆ ของโดเมนที่ศึกษาด้วยเทคนิคทางไฟไนต์อีลิเมนต์ จำเป็นต้องหาสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในมวลดินบนระนาบที่ศึกษา สามารถแสดงรูปแบบสมการทั่วไปดังแสดงในสมการที่ (2.38) และภาพที่ 2.12

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

โดยที่ C_{11} คือ $k_x \cos^2 \sim + k_y \sin^2 \sim$

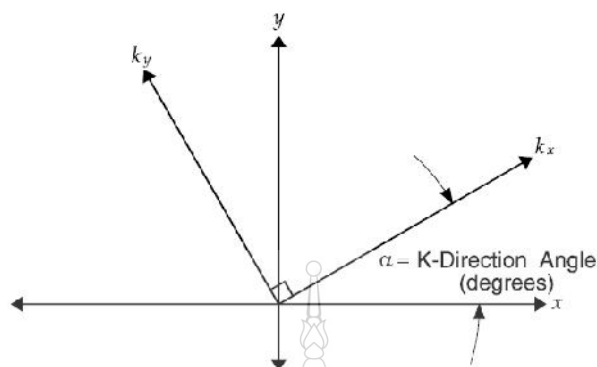
C_{22} คือ $k_x \sin^2 \sim + k_y \cos^2 \sim$

C_{12} คือ $k_x \sin \sim \cos \sim + k_y \sin \sim \cos \sim$

C_{21} คือ C_{12}

โดยที่ k_x คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินในระนาบทิศทางแกน x

k_y คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินในระนาบทิศทางแกน y



ภาพที่ 2.12 นิยามพารามิเตอร์ของเมทริกสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในระนาบ

2.2.3.4 การหาเมทริกซ์ของปริมาณน้ำในปริมาตรมวลดิน (Mass matrix)

เมื่อพิจารณาจากในสมการที่ (2.33) การหาค่าเมทริกซ์ของปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดินสำหรับปัญหาแบบสองมิติ สามารถหาค่าได้โดยแสดงในสมการที่ (2.39)

$$[M] = 2 \int_A (a \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \quad (2.39)$$

ในการแก้ปัญหาและผลเฉลยของปริพันธ์สามารถนำสมการที่ (2.39) นำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาที่ศึกษาซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปแบบสมการให้อยู่รูปการปริพันธ์เชิงตัวเลขแบบอย่างง่าย ดังแสดงในสมการที่ (2.40) และสามารถหาค่าได้โดยพิจารณาจากภาพที่ 2.13

$$[M] = 2 \sum_{j=1}^n a_j \langle N \rangle^T \langle N \rangle \det |J_j| W_{1j} W_{2j} \quad (2.40)$$

โดยที่ j คือ ค่าเริ่มต้นของการอินทิเกรต (an integration point)

n คือ ค่าจำนวนทั้งหมดของการอินทิเกรต (the numerical of integration points)

a คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ความซึมได้ของมวลดินสำหรับการไหลที่ขึ้นกับเวลาในสถานะไม่อยู่ตัว (storage term for a transient seepage equal to $m_w \neq w$)

2 คือ ความหนาของชิ้นส่วน (the thickness of an element)

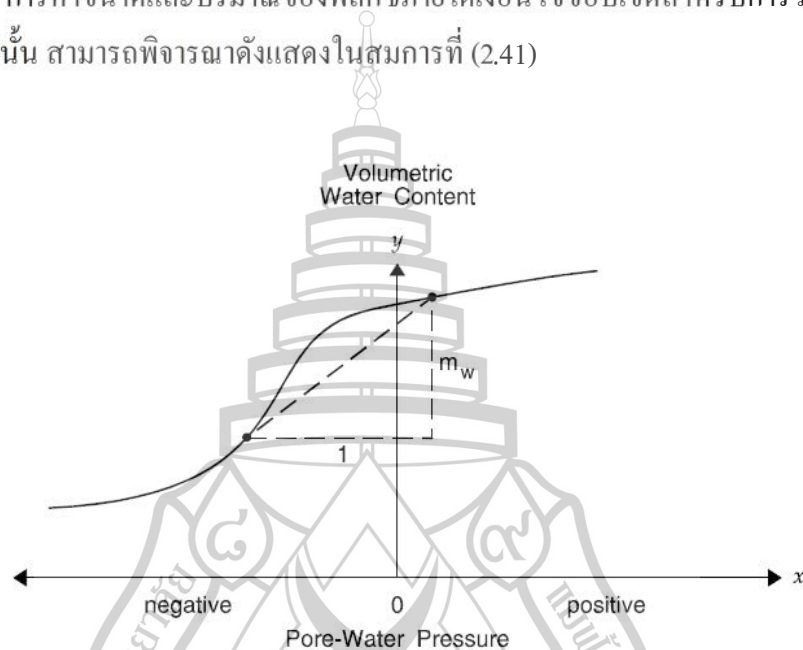
$\langle N \rangle$ คือ เวกเตอร์ของฟังก์ชันประมาณค่าภายในชิ้นส่วน
(the vector of interpolating function)

$\det|J_j|$ คือ ดีเทอร์มิแนนของเมทริกซ์จาโคบี (the determinant of the Jacobian matrix)

$W_{1j}W_{2j}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวถ่วงน้ำหนัก (weighting factors)

2.2.3.4 การหาขนาดและปริมาณของฟลักซ์ภายใต้เงื่อนไขขอบเขต (Flux boundary vector)

การหาขนาดและปริมาณของฟลักซ์ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาแบบสองมิตินั้น สามารถพิจารณาดังแสดงในสมการที่ (2.41)



ภาพที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อคำนวณค่า storage term, m_w

$$\{Q\} = q^2 \int_L (<N>^T) dL \quad (2.41)$$

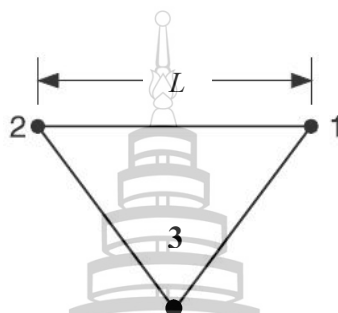
โดยที่ $<N>$ คือ เวกเตอร์ของฟังก์ชันประมาณค่าภายในชิ้นส่วน
(the vector of interpolating function)

q คือ อัตราปริมาณการไหลผ่านหน้าตัดบริเวณขอบของชิ้นส่วน
(the unit flux across the edge of an element)

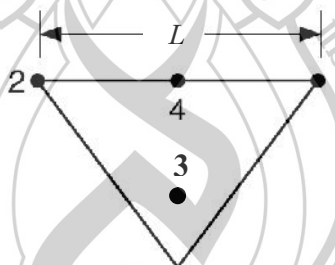
2 คือ ความหนาของชิ้นส่วน (the thickness of an element)

L คือ ความยาวของชิ้นส่วนระหว่างจุดใด ๆ (a designation for summation over the edge of an element)

โดยทั่วไปวิธีการอินทิกรัลขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของปัญหา สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาในลักษณะปัญหาการไหลของน้ำผ่านในมวลดินแบบสองมิติ ซึ่งสามารถนำแบบการจำลองเชิงตัวเลขที่มีลักษณะรูปร่างสามเหลี่ยมและเหมาะกับการนำวิธีการของ Gauss เพื่อหาปริพันธ์เชิงตัวเลขของชิ้นส่วนได้ ดังแสดงลักษณะรูปร่างดังภาพที่ 2.14(ก) และ 2.14(ข)



ภาพที่ 2.14(ก) ลักษณะรูปร่างชิ้นส่วนแบบสามเหลี่ยมที่ไม่มีจุดต่อภายใน



ภาพที่ 2.14(ข) ลักษณะรูปร่างชิ้นส่วนแบบสามเหลี่ยมที่มีจุดต่อภายใน

2.3 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองรากต้นไม้

2.3.1 แบบจำลองการเสริมกำลังทางกลศาสตร์ของรากต้นไม้ (Mechanical Tree Root Reinforcement Models)

วู (Wu, 1976) ได้ทำการศึกษาพัฒนาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากพืชแบบตั้งฉากทำมุมกับระนาบของแรงเฉือน นอกจากนั้น เกรย์และไลซ์เซอร์ (Gray & Leiser, 1982) ได้ทำการศึกษาพัฒนาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากพืชแบบเอียงทำมุมกับระนาบของแรงเฉือน ซึ่งแบบจำลองทั้งสองได้ถูกกำหนดสมมุติฐานภายใต้แรงยึดเกาะและกำลังรับแรงดึงระหว่างรากพืชกับดิน โดยที่แบบจำลองดังกล่าวจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ของการกระจายตัวของรากพืชและกำลังรับแรงดึงระหว่างรากพืชกับดินด้วย ซึ่งสามารถแสดงสมการที่ (2.42) ในรูปของค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นภายใต้กำลังต้านทานแรงดึงระหว่างรากพืชกับดิน

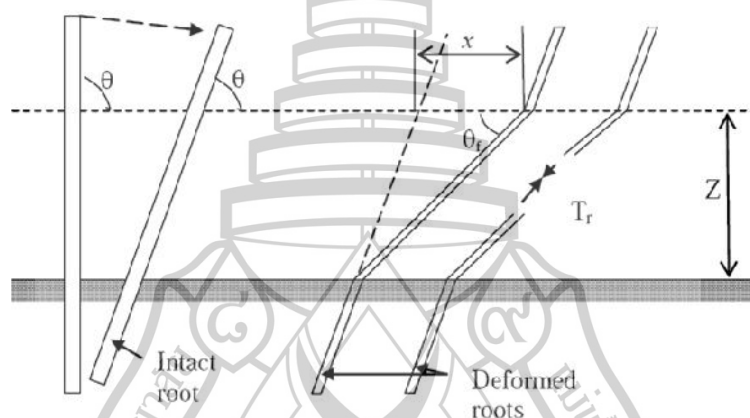
$$\Delta s = t_r (\cos^{-1} \tan \alpha + \sin^{-1}) \quad (2.42)$$

โดยที่ Δs คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมรากพืช (kPa)
 — คือ มุมของรากพืชที่ทำมุมกับแกนตั้งในช่วงพื้นที่รับแรงเฉือนของดิน (องศา)
 α คือ มุมเสียดทานภายในระหว่างโครงสร้างมวลดิน (องศา)
 t_r คือ ค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของรากพืชต่อหน่วยพื้นที่ของดินบริเวณราก (kPa)
 ค่ากำลังรับแรงดึงโดยเฉลี่ยของรากพืชกับดินต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการที่ (2.43)

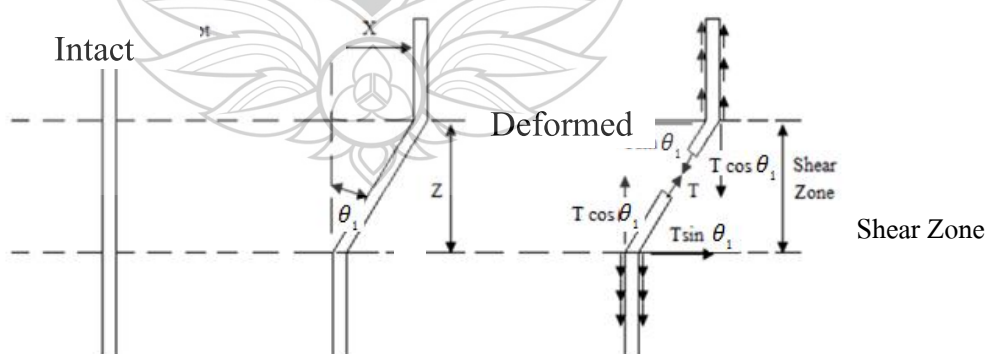
$$t_r = T_r \frac{A_r}{A} \quad (2.43)$$

โดยที่ T_r คือ ค่ากำลังรับแรงดึงโดยเฉลี่ยของรากพืชกับดิน (kPa)
 $\frac{A_r}{A}$ คือ อัตราส่วนพื้นที่รากพืชต่อพื้นที่หน้าตัดดินบริเวณที่มีรากพืช
 — คือ มุมเริ่มต้นก่อนเคลื่อนตัวของรากพืชที่อยู่ในช่วงพื้นที่ระนาบรับแรงเฉือน (องศา)
 — คือ มุมสุดท้ายหลังเคลื่อนตัวของรากพืชที่อยู่ในช่วงพื้นที่ระนาบรับแรงเฉือน (องศา)
 z คือ ช่วงพื้นที่ระนาบรับแรงเฉือน (หน่วยความยาว)
 x คือ ระยะเคลื่อนตัวของรากพืชที่อยู่ในช่วงพื้นที่ระนาบรับแรงเฉือน (หน่วยความยาว)

วาล์ดรอน (Waldron, 1977) วูและคณะ (Wu et al., 1979) ได้ทำการศึกษาค่ามุม θ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 45 ถึง 70 องศาที่อยู่ในช่วงพื้นที่ระนาบรับแรงเฉือน และจากผลการศึกษาพบว่าสามารถนำไปใช้กับแบบจำลองการเสริมกำลังของรากพืชที่ทำมุมตั้งฉากและประมาณค่าสำหรับรากพืชที่ทำมุมเอียงกับระนาบรับแรงเฉือน หลังจากนั้น แดงโจน (Danjon et al., 2007) ได้ทำการศึกษารากต้นไม้น้ำในหนองเดียนและพบว่าค่ามุม θ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 45 ถึง 70 องศาที่อยู่ในช่วงพื้นที่ระนาบรับแรงเฉือนจะมีความเป็นไปได้สูงสำหรับรากต้นไม้น้ำในป่าที่เกิดขึ้นบนแนวการเคลื่อนพังบนพื้นที่ลาดเอียงซึ่งสามารถพิจารณาได้ในสมการที่ (2.44) ถึง (2.46) และแสดงในภาพที่ 2.15 และ 2.16



ภาพที่ 2.15 รูปแบบลักษณะการจำลองการเสริมกำลังด้วยรากพืชแบบตั้งฉากและแบบเอียงช่วงพื้นที่รับแรงเฉือน



ภาพที่ 2.16 การสร้างแบบจำลองความเครียดเฉือน

$$C_{SR} = C + C_R \quad (2.44)$$

$$t_R = T_R (A_R / A) \quad (2.45)$$

$$C_R = t_R (\sin^{-1} + \cos^{-1} \tan \phi') \quad (2.46)$$

โดยที่	C_{SR}	คือ	กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่มีการเสริมด้วยราก
	C	คือ	กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมด้วยราก
	C_R	คือ	ต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยการเสริมราก
	t_R	คือ	กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของรากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
	T_R	คือ	กำลังรับแรงดึงของราก
	A_R	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรากที่อยู่ในพื้นที่หน้าตัดดิน
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของดิน
	ϕ'	คือ	มุมของแรงเฉือนที่บิดไปของราก หรือเท่ากับ $\tan^{-1}(X/Z)$

แบบจำลองเป็นรากฐานที่สำคัญของการค่ากำลังรับแรงดึงของรากพืช ในขณะที่

ทดสอบในภาคสนามจำเป็นต้องระมัดระวังเป็นอย่างมาก ซึ่งรากพืชต้องมีความยาวที่เพียงพอสำหรับยึดรั้งในช่วงของดินที่รับแรงเฉือนก่อนการพังทลาย ดังนั้น การประสานตัวของรากพืชกับดินจะให้ค่ากำลังรับแรงดึงของรากพืชเกินกว่าการทดสอบแบบ Pull out test หรือ การทดสอบแรงดึงแตกก่อนได้ค่าแรงดึงสูงสุดระหว่างการประสานตัวของรากพืชกับดินที่อึดด้วยน้ำ ซึ่งพิจารณาความยาวของรากที่ต่ำสุด (L_{min} , mm) สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางที่สม่ำเสมอของรากพืช (d_R , mm) เพื่อให้ได้ค่าแรงยึดถอนออกที่ต้องการก่อนการขาดออก ซึ่งสามารถพิจารณาได้ในสมการที่ (2.47)

$$L_{min} > \frac{T_R d_R}{2^2} \quad (2.47)$$

โดยที่	T_R	คือ	ค่ากำลังรับแรงดึงของรากพืชกับดิน (kPa)
	2_R	คือ	ค่าหน่วยแรงยึดเกาะสูงสุดระหว่างรากพืชกับดิน (kPa)
	d_R	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางที่สม่ำเสมอของรากพืช (mm)

ในขณะที่ทดสอบแรงดึงเมื่อรากพืชเกิดถูกดึงให้ตรงแล้วรากที่ทดสอบจะเพียงพอที่จะทำให้เกิดการยึดตัวจนทำให้สามารถทดสอบกำลังดึงของรากพืชได้จนขาดออกจากกัน ซึ่งค่ากำลังแรงดึงขณะที่รากพืชอยู่แนวตรง (t_{RS}) และจะพิจารณาได้จากจำนวนของรากที่ถูกยึดตัวออกและโมดูลัสแรงดึงของรากพืช (E_R) โดย Gray and Barker (2004) และ Waldron and Dakessian (1981) สามารถพิจารณาได้ในสมการที่ (2.48)

$$t_{RS} = (4z_b^2 \left(\frac{E_R}{d}\right))^{\frac{1}{2}} (\sec^{-1})^2 \left(\frac{A_R}{A}\right) \quad (2.48)$$

- โดยที่ z คือ ช่วงพื้นที่ระนาบรับแรงเฉือน (หน่วยความยาว)
 z_b คือ ค่าหน่วยแรงยึดเกาะสูงสุดระหว่างรากพืชกับดิน (kPa)
 E_R คือ ค่าโมดูลัสแรงดึงของรากพืช (kPa)
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช (mm)
 $-$ คือ มุมเริ่มต้นก่อนเคลื่อนตัวของรากพืชที่อยู่ในช่วงพื้นที่ระนาบรับแรงเฉือน (หน่วยองศา)

$$\frac{A_R}{A} \text{ คือ อัตราส่วนพื้นที่รากพืชต่อพื้นที่หน้าตัดดินบริเวณที่มีรากพืช}$$

ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างรากพืชกับดิน (z_b) สามารถหาได้จากการทดสอบหน่วยแรงที่กระทำกับรากพืชและค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานระหว่างรากพืชกับดิน สำหรับรากที่อยู่ในแนวตั้งหน่วยแรงที่ได้จะแปรผันขึ้นอยู่กับความลึก ซึ่งสามารถพิจารณาในรูปของสมการที่ (2.49)

$$z_b = \gamma (1 - \sin \alpha) f \tan \alpha \quad (2.49)$$

- โดยที่ z คือ ช่วงความลึกจากระดับผิวดินลงไป (หน่วยความยาว)
 γ คือ ค่าความหนาแน่นของดิน (kPa)
 α คือ ค่ามุมเสียดทานภายในของมวลดิน (องศา)
 f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานระหว่างรากพืชกับดิน
 ปกติสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานระหว่างไม้กับดิน จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.70 ถึง 0.90 โดย Gray and Barker (2004) ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงรากพืชโดยตรง สามารถพิจารณาในรูปสมการที่ (2.50) ได้ดังนี้

$$\Delta S = (4z_b^2 \left(\frac{E_R}{d}\right))^{\frac{1}{2}} (\sec^{-1})^2 \left(\frac{A_R}{A}\right) (\cos^{-1} \tan \alpha + \sin^{-1}) \quad (2.50)$$

2.3.2 ชนิดของรากต้นไม้และหน้าที่ของรากต้นไม้

2.3.2.1 ชนิดและระบบของรากต้นไม้

โดยทั่วไปสามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิดออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. Primary root เป็นรากที่มีกำเนิดและเจริญเติบโตมาจาก radical รากชนิดนี้ตอนโคนโตจะเรียวเล็กลงเรื่อย ๆ จนถึงปลายซึ่งคือ รากแก้ว (tap root) นั่นเอง

2. Secondary root เป็นรากที่มีกำเนิดและเจริญเติบโตออกมาจาก primary root อีกทีหนึ่ง เป็นรากที่เรียกกันทั่ว ๆ ไปว่า รากแขนง (lateral root) และแขนงต่าง ๆ ที่แยกออกไปเป็นทอด ๆ นั้นต่างมีกำเนิดมาจากเนื้อเยื่อ pericycle ในรากเดิมทั้งสิ้น

3. Adventitious root รากพิเศษ หรือ รากวิสามัญ เป็นรากที่ไม่ได้มีกำเนิดมาจาก radical และไม่เป็นแขนงของ Primary root จำแนกเป็นชนิดย่อย ๆ ลงไปตามรูปร่างและหน้าที่ของราก ได้ดังนี้คือ

1) รากฝอย (fibrous root) เป็นรากเส้นเล็ก ๆ มากมายขนาดสม่ำเสมอตลอดความยาวของราก งอกออกจากรอบ ๆ โคนต้นแทนรากแก้วที่ฝ่อไปพบในดินไม้ใบเลี้ยงเดี่ยวเป็นส่วนใหญ่ เช่น รากข้าว ข้าวโพด หญ้า หนาม มะพร้าว ตาล กระชาย และพบในดินไม้ใบเลี้ยงคู่บางชนิด เช่น รากต้อยติ่ง มันทะ มันทะแกว

2) รากค้ำจุน (prop root) เป็นรากที่แตกออกจากข้อของลำต้นที่อยู่ใต้ดินและเหนือดินเล็กน้อย แล้วพุ่งทแยงลงไปในดินเพื่อช่วยพยุงและค้ำจุนลำต้นได้ รากเตยลำเจียก ข้าวโพด ยางอินเดีย โกก้าง และไทรย้อย เป็นต้น

3) รากสังเคราะห์แสง (photosynthetic root) เป็นรากที่แตกออกจากข้อของลำต้นหรือกิ่งแล้วห้อยลงมาในอากาศ มีสีเขียวของคลอโรฟิลล์จึงสังเคราะห์แสงได้ ได้แก่ รากกล้วยไม้ ไทร โกก้าง ซึ่งจะมีสีเขียวเฉพาะตรงที่ห้อยอยู่ในอากาศเท่านั้น รากกล้วยไม้ นอกจากมีสีเขียวและช่วยในการสังเคราะห์แสงแล้ว พบว่ามีเยื่อพิเศษลักษณะนุ่มคล้ายฟองน้ำ เป็นเซลล์พวกพาราไคนิม่าเรียงตัวกันอย่างหลวม ๆ โดยมีช่องว่างระหว่างเซลล์มากเรียกว่า นวม (velamen) หุ้มอยู่ตามขอบนอกของรากช่วยดูดน้ำ รักษาความชื้นให้แก่ราก ตลอดทั้งช่วยในการหายใจด้วย

4) รากหายใจ (respiratory root or aerating root) เป็นรากที่ชูปลายรากขึ้นมาเหนือพื้นดินหรือบางทีก็ลอยตามผิวน้ำเพื่อช่วยในการหายใจ ได้มากเป็นพิเศษกว่ารากปกติทั่ว ๆ ไป ทั้งนี้เพราะโครงสร้างของรากประกอบด้วยเซลล์พาราไคนิม่าซึ่งเรียงตัวอย่างหลวม ๆ มีช่องว่างระหว่างเซลล์มาก ทำให้อากาศผ่านเข้าสู่เซลล์ชั้นในของรากได้ง่าย รากเหล่านี้อาจเรียกว่า รากทุ่นลอย (pneumatophore) ได้แก่ ลำพู แสม โกก้าง แพงพวยน้ำ และผักกระเฉด เป็นต้น

5) รากเกาะ (climbing root) เป็นรากที่แตกออกมาจากส่วนข้อของลำต้น แล้วเกาะติดกับสิ่งยึดเกาะ เช่น เสาหรือหลักเพื่อพยุงลำต้นให้ติดแน่นและชูส่วนของลำต้นให้สูงขึ้นได้ และให้ส่วนต่าง ๆ ของต้นไม่ได้รับแสงมากเกินไป ได้แก่ พุด่าง พริกไทย และกล้วยไม้ เป็นต้น

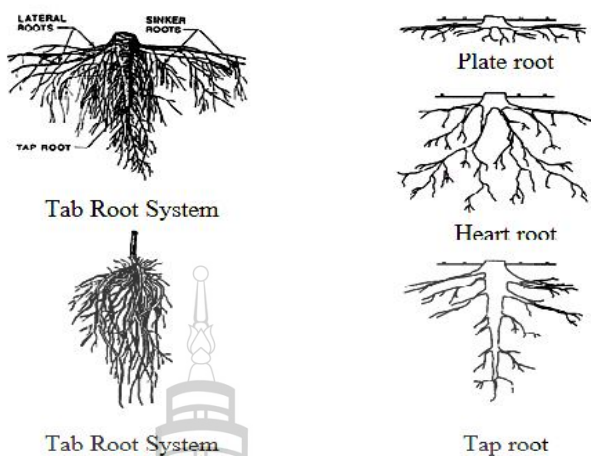
6) รากกาฝาก (parasitic root) เป็นรากของต้นไม้ที่ไปเกาะต้นไม้ชนิดอื่นแล้ว มีรากเล็ก ๆ แดกออกมาเป็นกระจุกแทงลงไปในลำต้นจนถึงท่อลำเลียงเพื่อแย่งอาหาร ได้แก่ รากฝอยทอง กาฝาก เป็นต้น

7) รากสะสมอาหาร (storage root) ทำหน้าที่สะสมอาหารพวกแป้ง ไขมัน และโปรตีน เช่น รากกระชายมันเทศ มันแกว มันสำปะหลัง เป็นต้น

8) รากหนาม (root thorn) เป็นรากที่มีลักษณะเป็นหนามงอกจากบริเวณโคนต้น ตอนงอกใหม่ ๆ เป็นรากปกติแต่ต่อมาเกิดเปลือกแข็งทำให้มีลักษณะคล้ายหนามแข็ง ช่วยป้องกันโคนต้นได้ เช่น ปาล์ม

การแผ่กระจายของรากต้นไม้ในมวลดินมีส่วนทำให้กำลังของดินเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการประสานยึดเกาะระหว่างรากต้นไม้กับมวลดิน (Wang & Nilaweera, 1994) ศึกษาของรากพืชแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ Tap Root System และ Fibrous System โดย Tap Root System จะเป็นระบบรากที่พบในไม้ยืนต้นทั่วไป ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ รากแก้ว (tap roots) ซึ่งเป็นศูนย์กลางที่ก่อให้เกิดการประสานของดินชั้นล่าง (ศูนย์วิจัยป่าไม้ และสำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, 2537) รากแขนง (lateral roots) เป็นรากที่แผ่ออกจากศูนย์กลางลำต้น ก่อให้เกิดการประสานของดินชั้นบนโดยปกติรากแขนงจะมีมากที่สุดที่ระดับความลึก 30.0 ถึง 50.0 เซนติเมตรจากผิวดิน รากฝอย (sinker roots) เป็นส่วนของรากที่แผ่ขยายจากรากแก้ว หรือ รากแขนง

เกรย์ และ โซทรี (Gray, & Sotir, 1996) ได้แบ่งลักษณะรูปแบบการแผ่ขยายของรากพืชออกเป็น 3 แบบ คือ Tap root, Heart root และ Plate root ดังแสดงในภาพที่ 2.17 และ 2.18 นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของรากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และการประสานกับดินอย่างแน่นหนาจะมีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของมวลดินมากกว่าพืชที่มีรากขนาดใหญ่แต่มีจำนวนของรากน้อย



จาก Wang, I.& Nilaweera, N.S. (1994) and Gray, D. H. & Sotir, R.B. (1996)

ภาพที่ 2.17 ระบบรากพืชแบบ Tap Root System และ Fibrous System และรูปแบบการแผ่ขยายของรากพืช

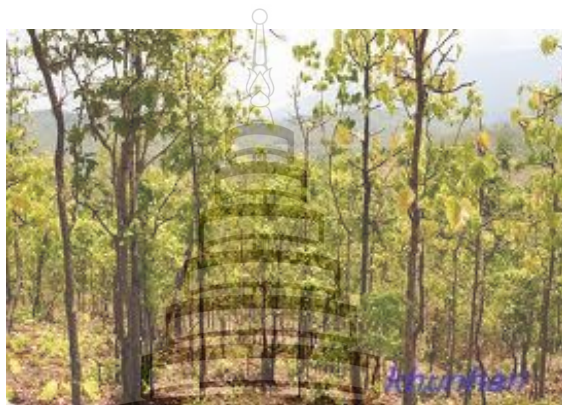


ภาพที่ 2.18 ลักษณะการกระจายตัวของรากต้นเต็งที่ใช้ในการศึกษาในจังหวัดเชียงราย

2.3.3 ชนิดรากต้นไม้ในการศึกษา

ต้นเต็งเป็นไม้ที่มีชื่อเสียงรู้จักกันแพร่หลายทั่วโลก ดังแสดงภาพที่ 2.18 เนื้อไม้สามารถใช้ประโยชน์ได้ ไม้เต็ง เป็นไม้เนื้อแข็งที่มาจากเศรษฐกิจมากเป็นอันดับต้น ๆ หาได้ไม่ยาก ไม้เต็ง มีอยู่หลายชนิด เช่น ไม้เต็งคง, ไม้เต็งลาว, ไม้เต็งมาเลย์, ไม้เต็งซาบ่า, ไม้เต็งแดง, ไม้เต็งอินโด, ไม้เต็งรัง เป็นต้น นิยมเรียกชื่อตามแหล่งกำเนิด ของไม้เพราะถึงแม้ว่าจะ มีสายพันธุ์ไม้เดียวกัน แต่มีสมบัติที่

ไม่เหมือนกันทีเดียวนัก เช่น ไม้เต็งลาวจะเป็นไม้ที่มีความหนาแน่นมากกว่า มีสีของไม้ออกเหลือง เพราะอยู่ในพื้นที่ไม่ร้อนชื้นเกินไป, ไม้เต็งมาเลย์ก็จะมีสมบัติใกล้เคียง แต่ไม้เต็งมาเลย์จะมีความชื้นมากกว่าไม้เต็งลาว แต่ไม้เต็งอินโด ก็จะมี ความชื้นมากกว่าจะทำให้ความหนาแน่นของไม้ น้อยกว่า เพราะอยู่ในสภาพอากาศป่าร้อนชื้น ดังแสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ป่าไม้เต็ง

2.3.3.1 ชื่อท้องถิ่นในประเทศไทย

กะเจ็ก พะเจ็ก (เขมรพระตะบอง) แะ (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) จิก (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) เจือ (ละว้าเชียงใหม่) ประจืด (เขมรบุรีรัมย์) ประเจ็ด (เขมรสุรินทร์) ลำไ้ เหลไ้ (กะเหรี่ยง) แลเน่ย (กะเหรี่ยงแม่ฮ่องสอน) อองเลียง (กะเหรี่ยงกาญจนบุรี) ชันต (ตราด) เน้าโน (แม่ฮ่องสอน)

2.3.3.2 ลักษณะของลำต้น ใบ ดอก และผล

ชื่อวิทยาศาสตร์ Shorea obtuse Wallex Blume ชื่อวงศ์ ยาง DIPTEROCAPACEAE ชื่อสกุลไม้ เต็งและสา Shorea Roxb.ex Gaertn.f. ชื่อสามัญ Siamese Sal, Burma Sal, Thitya เป็นไม้ต้น ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ความสูง 10.0 ถึง 20.0 เมตร ผลัดใบหมดต้น ลำต้นตรง มีขนาดใหญ่ เส้นรอบวงมากกว่า 250.0 เซนติเมตร แต่ที่พบในป่าเต็งรัง ปัจจุบันส่วนใหญ่คงอ ไม้สาวงามอาจ หลงเหลืออยู่บ้างเป็นบางแห่ง เปลือกนอก สีน้ำตาลปนเทา แตกเป็นร่อง และเป็นสะเก็ดหนา มักตก ชันสีเหลืองขุ่น เกาะเป็นก้อนตามรอยแตกของเปลือก เปลือกใน สีน้ำตาลแดง เรือนยอด เป็นพุ่ม กว้าง โปร่ง ไม่ค่อยเป็นระเบียบลักษณะใบเป็นใบเดี่ยว เรียงสลับ รูปขอบขนาน หรือรูปไข่กลับ ขนาดกว้าง 4.0 ถึง 7.0 เซนติเมตร และความยาว 10.0 ถึง 16.0 เซนติเมตร โคนและปลายมน เนื้อใบ หนา เป็นมันใบอ่อน มีขนประปราย เนื้อใบอ่อนสีน้ำตาลแดง ใบแก่ กลี้ยงเป็นมัน ก่อนหลุดร่วง

เปลี่ยนสีเป็นสีเหลือง ขอบใบเรียบหรือเป็นคลื่นเล็กน้อยดอก เล็ก ออกรวมกันเป็นช่อตามปลายกิ่ง ออกดอกระหว่างเดือน มีนาคม ถึง พฤษภาคม ก่อนออกดอกจะผลัดใบหมดต้น และจะผลิใบใหม่พร้อม ๆ กับช่อดอก เป็นผลระหว่างเดือน เมษายน ถึง มิถุนายน

2.3.3.3 การกระจายพันธุ์ของไม้เต็ง

เต็งมีการกระจายพันธุ์เป็นกลุ่มใหญ่ในป่าเต็งรังและป่าเบญจพรรณ ดินลูกรัง และเขาหินทรายทั่วทุกภาคของประเทศไทย ที่ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 150.0 ถึง 1,300.0 เมตร ในต่างประเทศพบที่พม่า ลาว กัมพูชา และเวียดนาม

2.3.3.4 ลักษณะทางนิเวศวิทยา (Ecological aspects)

ระบบนิเวศของป่าเต็งรังจัดได้ว่าเป็นระบบนิเวศที่มีการหมุนเวียนของสารแล การหลั่งไหลของพลังงานอย่างรวดเร็ว ความชื้นในช่วงฤดูฝนที่มีระยะเวลา ประมาณ 5 ถึง 6 เดือน นับว่าเพียงพอสำหรับการทำงานของผู้สลายอินทรีย์วัตถุที่จะทำลายซากพืชขนาดเล็ก เช่น กิ่ง และใบให้หมดไปได้ และกินธาตุอาหารสู่ดิน ในประเทศไทยพบขึ้นเป็นหมู่ใหญ่ ๆ อยู่ตามป่าแดง หรือป่าเบญจพรรณแล้งที่เป็นดินลูกรังและเขาหินทรายปะปนอยู่กับพวกไม้รังทั่วไป เว้นแต่ภาคใต้อาจพบขึ้นที่ระดับความสูงจากน้ำทะเลปานกลาง 100.0 ถึง 700.0 เมตร

2.3.3.5 ประโยชน์ของต้นเต็ง

ใช้ก่อสร้างแข็งแรงทนทาน เช่น เสา ตง ช่อ กระดานพื้น ไม้หมอนรถไฟ โครงเรือเดินทะเล ฯลฯ เปลือกใช้เป็นยาสมานแผล ห้ามเลือด รักษาแผลเรื้อรัง แผลพุพอง ชันไม้ผสมน้ำมันทาไม้ และยาแนวเรือ

2.3.4 การทดสอบแรงดึงของรากต้นไม้ในภาคสนาม

การทดสอบแรงดึงเป็นการวัดค่าความต้านทานสูงสุดเมื่อรากพืชถูกถอนออกจากดิน ความแข็งแรงในการดึงเป็นการยึดเกาะระหว่างดินกับรากพืช (adhesion) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการโค้งงอของราก รากแขนง รากฝอยและความสามารถในการรับแรงดึงขณะรากขาด เครื่องมือทดสอบแรงดึงในสนาม ดังแสดงรูปที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 เครื่องทดสอบแรงดึงในสนาม



บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัยและวิธีการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีวิจัยและวิธีการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง รวมถึงแหล่งที่มาและการอธิบายตัวแปรที่นำมาใช้ในแบบจำลองโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนที่สำคัญ คือ การนำหลักการสมดุลสร้างแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพ (slope stability analysis) ในส่วนที่สองเป็นการสร้างแบบจำลองรากต้นไม้ร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ (tree roots reinforcement model) และส่วนสุดท้ายเป็นการนำเอาเทคนิคทางไฟไนต์อีลิเมนต์ (finite element method) มาใช้ในการแก้สมการของการไหลของน้ำผ่านมวลดิน (seepage flow equations) อันเนื่องมาจากผลของปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นตามเวลาหลังจากฝนตก โดยมีรายละเอียดจะกล่าวต่อไป

ในขั้นตอนวิธีการศึกษาสร้างแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพ ได้นำเอาแบบจำลองของ Simplified Bishop เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ของการพังทลายของดินบนลาดเอียง ซึ่งมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง กล่าวคือ ค่าความเชื่อมแน่น (cohesion) ค่ามุมเสียดทานภายในของมวลดิน (internal friction angle) และหน่วยน้ำหนักของดิน ภายใต้เงื่อนไขและสมมติฐาน ที่จะกล่าวต่อไป

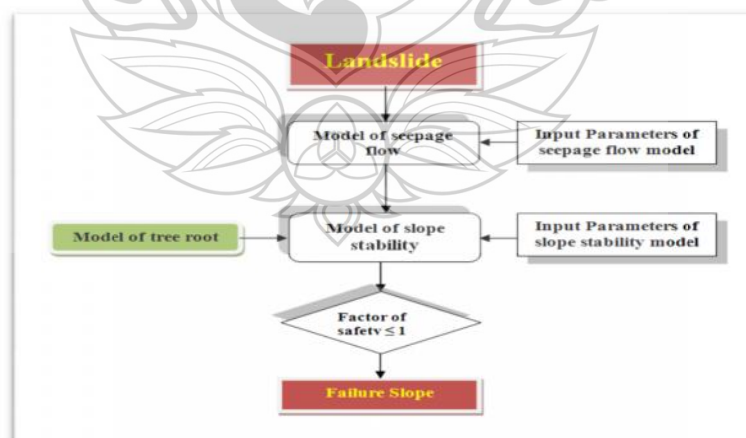
หลังจากนั้น เป็นขั้นตอนศึกษาสร้างแบบจำลองรากต้นไม้ โดยจะเน้นถึงการศึกษารูปร่างลักษณะการกระจายตัวของรากต้นไม้เพื่อนำมาพิจารณาเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของการพังทลายของลาดดิน โดยใช้ลักษณะรูปร่างการกระจายตัวและผลลัพธ์ค่าทดสอบแรงดึงของรากต้นไม้ในท้องถิ่นจังหวัดเชียงราย โดยกำหนดพื้นที่ในการเก็บตัวอย่าง คือ บริเวณเนินลาดหน้าอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย และพื้นที่ในจังหวัดเชียงราย ในการศึกษาทางผู้ดำเนินการวิจัยได้เสนอขั้นตอนเก็บข้อมูลพื้นฐานในภาคสนามเพื่อหาระดับความลาดชันของพื้นที่ที่ทำการทดสอบ หาดำแหน่งของตัวอย่างดินที่จะใช้ในการทดสอบจำนวน 4 จุด คือบริเวณที่มีความชันที่สุด จำนวน 3 จุดและบริเวณที่มีต้นไม้จำนวนอย่างละ 1 จุด โดยอยู่ในพื้นที่เป้าหมาย 70.0 x 130.0 ตารางเมตร โดยกำหนดเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึกสูงสุดเท่ากับ 4.0 เมตร หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินทำการทดสอบสมบัติพื้นฐาน เพื่อให้ทราบลักษณะทางกายภาพ ค่ากำลังรับแรงเฉือน

และค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติของดิน ต่อจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทดสอบในแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้น โดยแสดงขั้นตอนการดำเนินงานดังแสดงในรูปภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาทดสอบและเก็บข้อมูลในพื้นที่เป้าหมาย

ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองวิเคราะห์การไหลของน้ำในมวลดิน ซึ่งในศึกษาได้นำเอาเทคนิคทางไฟไนต์อีลิเมนต์ (finite element method) มาใช้ในการแก้สมการของการไหลของน้ำผ่านมวลดินอันเนื่องมาจากผลของปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นตามเวลา หลังจากฝนตก โดยมีรายละเอียด ซึ่งมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องและกล่าวต่อไป ในบทเกริ่นนำทั้งสามส่วนนี้ สามารถแสดงดังภาพที่ 3.2

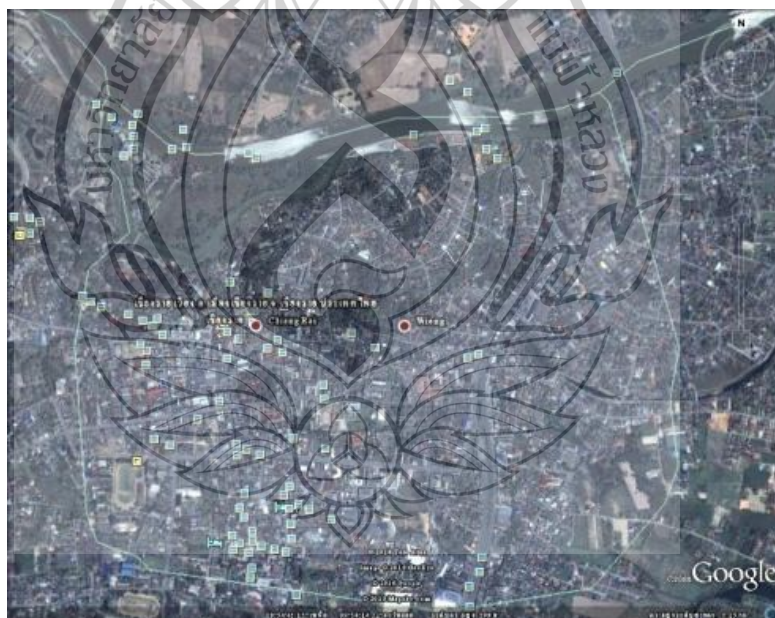


ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนภาพรวมทั้งหมดของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1 ขั้นตอนและวิธีการศึกษาสร้างแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพ

ในส่วนนี้เป็นขั้นตอนการสร้างแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อเป้าหมายในการสร้างแบบจำลองเสริมกำลังของรากต้นไม้เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียงนั้น มีความจำเป็นต้องหาที่มาของค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้สร้างแบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ก็คือ C, ϕ, γ ส่วนตัวแปร I และค่าแรงดันน้ำในมวลดินจะพิจารณาในข้อต่อไป เพื่อให้การหาค่าตัวแปรต่างๆดังกล่าวสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงตามธรรมชาติจึงจำเป็นต้องทำการออกสำรวจพื้นที่สำหรับเก็บข้อมูลพื้นฐานและสมบัติเฉพาะทางกายภาพ ในภาคสนาม เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ประกอบสำหรับสร้างแบบจำลอง ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

3.1.1 การเก็บค่าระดับสันชั้นความสูงในภาคสนามบริเวณเนินลาดหลังอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย และพื้นที่ในจังหวัดเชียงราย ดังแสดงในภาพที่ 3.3 และ 3.5 เพื่อเป็นกรอบแนวทางการศึกษาและกำหนดค่ามุมลาดเอียงในการศึกษา ()



จาก แผนที่ดาวเทียมจังหวัดเชียงราย สืบค้นเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม 2552, จาก [http://www. Google Earth.com](http://www.GoogleEarth.com)

ภาพที่ 3.3 แผนที่จังหวัดเชียงราย



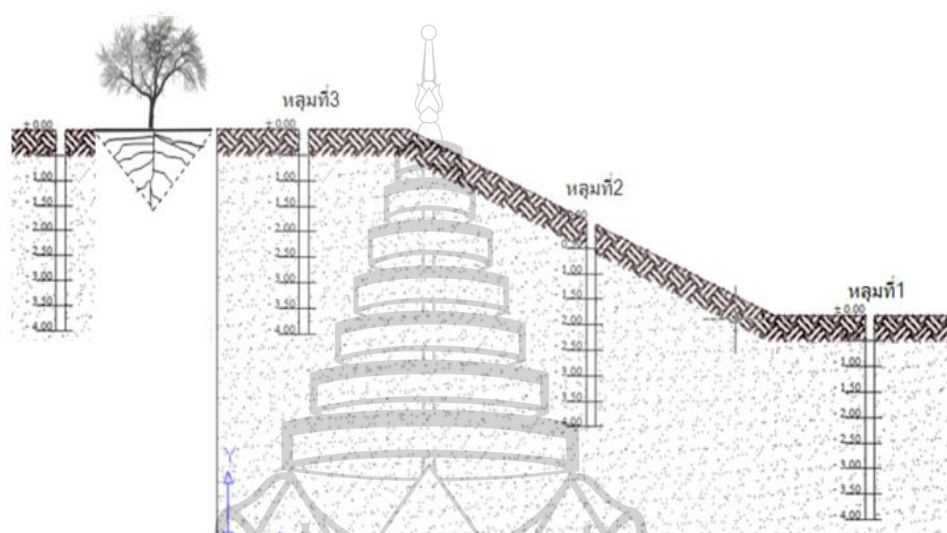
จาก แผนที่ดาวเทียมจังหวัดเชียงราย สืบค้นเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม 2552, จาก [http://www. Google Earth.com](http://www.Google Earth.com)

ภาพที่ 3.4 พื้นที่ศึกษาบริเวณในขอบเขตเส้นประใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย



ภาพที่ 3.5 เส้นชั้นความสูงและจำลองพื้นที่ผิวบริเวณที่ศึกษาโดยโปรแกรม Digital Terrain Model

3.1.2 การเจาะสำรวจชั้นดินและเก็บตัวอย่างดินในภาคสนาม จำนวน 3 จุดต่อพื้นที่ลาดเอียงที่ศึกษา และบริเวณที่มีต้นไม้ จำนวน 1 จุด ในพื้นที่ศึกษาขนาด 70.0 x 130.0 เมตร โดยเก็บที่ระดับความลึกสูงสุด เท่ากับ 4.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ถึง 3.8 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ทดสอบหาสมบัติพื้นฐานและเฉพาะทางกายภาพของดิน (c, ϕ, γ)



ภาพที่ 3.6 ตำแหน่งจุดที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3.7 พื้นที่จุดที่ทำการทดสอบในภาคสนาม



ภาพที่ 3.8 การเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาค่า c, ϕ, γ

3.1.3 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของดิน

การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของดิน เป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญ เพื่อใช้พิจารณาลักษณะทางกายภาพ ประเภทของดิน และหน่วยน้ำหนักของดิน โดยแสดงวิธีการและขั้นตอนต่ำ ๆ จะกล่าวในภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 3.1.3.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลดิน (Specific gravity)
- 3.1.3.2 การทดสอบการหาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรง (Sieve analysis)
- 3.1.3.3 การทดสอบหาค่าอัตราจำกัด (Atterberg's Limits)

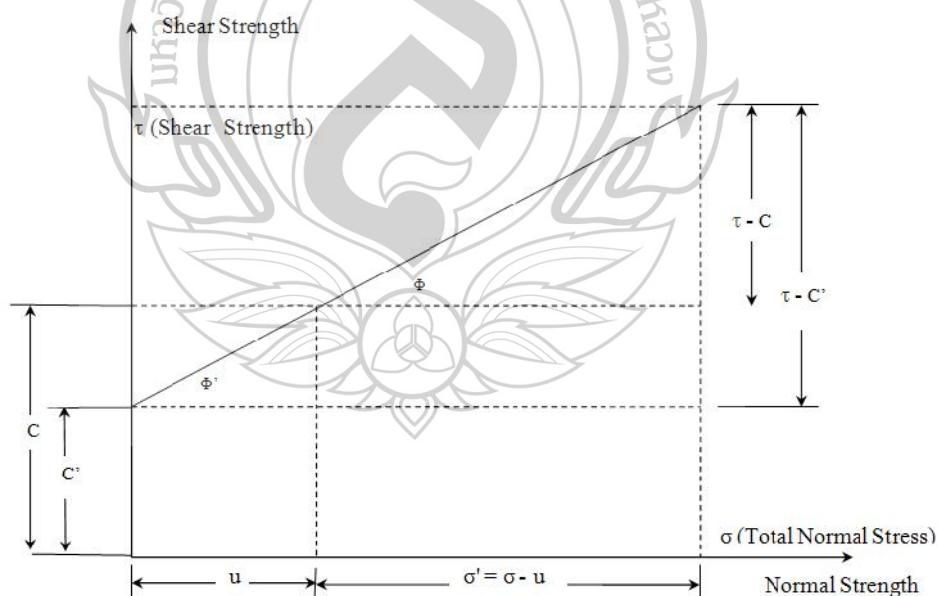
3.1.4 การทดสอบการรับแรงเฉือนโดยตรงของดิน (Direct Shear Test)

ในส่วนนี้เป็นขั้นตอนทดสอบหาค่ารับแรงเฉือนโดยตรงของดินโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบตัวแปรสำหรับนำมาสร้างแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพที่ศึกษาเพื่อเป้าหมายในการสร้างแบบจำลองเสริมกำลังของรากคันไม้สำหรับปรับปรุงเสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียงนั้น มีความจำเป็นต้องหาที่มาของตัวแปรที่นำมาใช้สร้างแบบจำลอง จึงขอนำสมการที่ 2.13 มาพิจารณา ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ก็คือ c' และ ϕ' ส่วนตัวแปร Z จะผันแปรขึ้นอยู่กับค่ามุม

ลาดเอียง ระยะความสูงของแนวการเคลื่อนพังที่ทราบค่าของลาดเอียง และค่าแรงดันน้ำในมวลดิน จะพิจารณาในข้อต่อไป ซึ่งตัวแปรที่ได้จากการทดสอบการรับกำลังแรงเฉือนโดยตรงของดิน ก็คือ ค่า c' และ ϕ' ในลักษณะคงสภาพ ส่วนรายละเอียดขั้นตอนวิธีการจะแสดงในภาพผนว ดัง แสดงในภาพที่ 3.9 ถึง 3.10 และสมการที่ 3.1 ซึ่งมีดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.9 เครื่องมือการทดสอบรับแรงเฉือนโดยตรง



ภาพที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normal Strength กับ Shear Strength จากการทดสอบวิธีแรงเฉือนโดยตรง

$$FS = \frac{c' + Z \cos^2 \alpha' \left[m \gamma_{sat} + (1-m) \gamma_w - m \gamma_w \right] \tan \alpha'}{Z \sin \alpha' \left[m \gamma_{sat} + (1-m) \gamma_w \right]} \quad (3.1)$$

โดยที่ W คือ น้ำหนักของมวลดินเหนือเส้นแนวเคลื่อนพังแต่ละชั้นส่วน

N คือ แรงตั้งฉากประสิทธิผลของชั้นส่วน

คือ มุมของลาดเอียงที่ฐานของชั้นส่วน

$U = ul$ คือ แรงดันน้ำภายในชั้นส่วนของมวลดิน (ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 3.3)

l คือ ความยาวของส่วนโค้งที่ฐานของชั้นส่วน

T คือ แรงเฉือนประสิทธิผลที่ฐานของชั้นส่วนตามแนวการเคลื่อนพัง

α คือ มุมเสียดทานภายในของมวลดิน (Total Internal Friction)

α' คือ มุมเสียดทานภายในแบบประสิทธิผลของมวลดิน (Effective Internal Friction)

h_w คือ ความลึกของปริมาณน้ำฝนเหนือแนวเคลื่อนพัง

γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ

γ_{sat} คือ หน่วยน้ำหนักของมวลดินในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ

γ คือ หน่วยน้ำหนักของมวลดินในสภาพความชื้นตามธรรมชาติ

$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ คือ หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของมวลดิน

Z คือ ความลึกของแนวเคลื่อนพังบนระนาบลาดเอียง

$m = \frac{h_w}{Z}$ คือ อัตราส่วนความลึกของปริมาณน้ำฝนเหนือแนวเคลื่อนพังต่อความลึกของ

แนวเคลื่อนพังบนระนาบลาดเอียง

FS คือ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเริ่มต้นที่ได้จากการสมมติก่อนการคำนวณ

หลังจากได้พิจารณาหาค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีลาดอนันต์ ก็คือ $c', \alpha', \gamma, \gamma_{sat}, \gamma_w$ ขึ้นตอนต่อไปจะต้องกำหนดค่า Z ซึ่งจะทราบจากการคำนวณในหัวข้อการไหลของน้ำผ่านมวลดินและเมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงไปในสมการที่ (3.1) จะได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ศึกษา (FS)

3.2 ขั้นตอนวิธีการศึกษาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรากต้นไม้

ในส่วนนี้จะศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งจะนำแบบจำลองดังกล่าวมาเพื่อปรับปรุงในสมการที่ 3.1 ในการสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังของรากพืชเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง นั้นต้องการที่มาของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อประกอบกับการสร้างแบบจำลอง สามารถแสดงด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2.1 การศึกษาลักษณะรูปร่างการกระจายตัวของรากต้นไม้

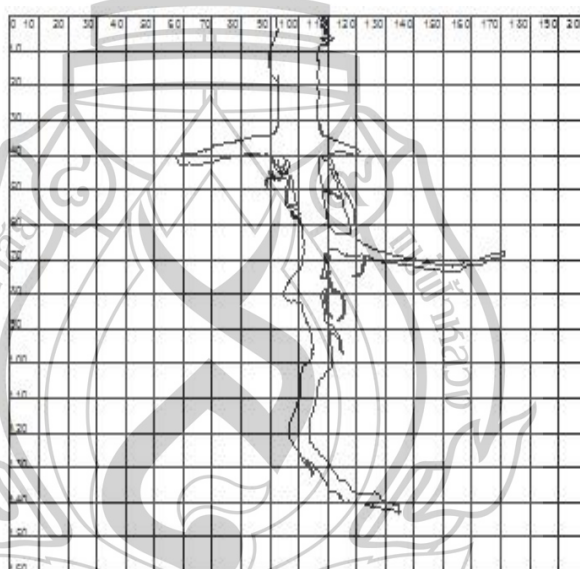
หลังจากเก็บลักษณะรูปร่างการกระจายตัวและวัดระยะต่างๆของรากต้นไม้ในภาคสนามเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำรากต้นไม้มาขึ้นรูปร่างด้วยโปรแกรม Autocad และทำการทดสอบแรงดึงของรากต้นไม้ในท้องถิ่นจังหวัดเชียงราย จำนวนอย่างละ 1 จุด ในพื้นที่ลาดเอียงที่ศึกษา เท่ากับ 70 x 130 เมตร ส่วนรายละเอียดทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ดังแสดงในภาพที่ 3.11 ถึง 3.12 และในตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.11 ลักษณะการกระจายตัวของรากต้นไม้แดงที่ใช้ในการศึกษาในจังหวัดเชียงราย

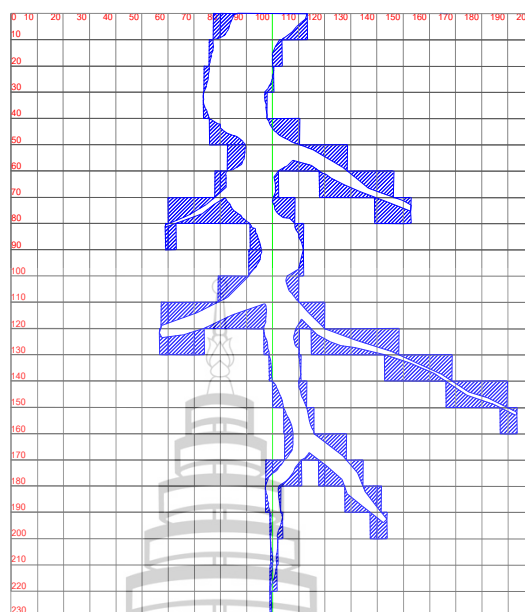


ภาพที่ 3.12 แสดงขั้นตอนการวัดความยาวของรากต้นไม้ที่ระยะ 10 เซนติเมตร

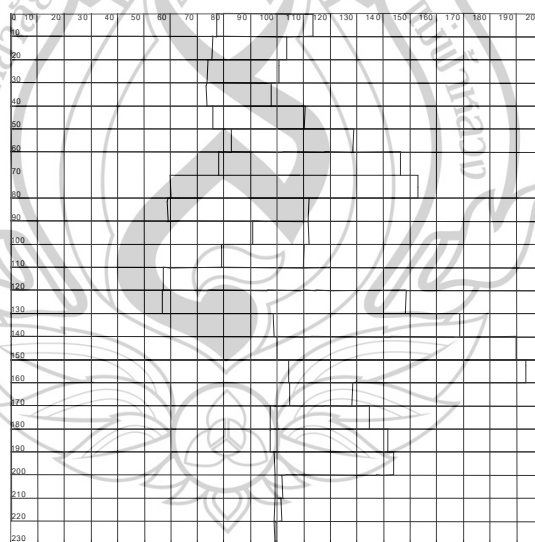


ภาพที่ 3.13 ลักษณะการกระจายตัวของรากต้นไม้ตั้ง

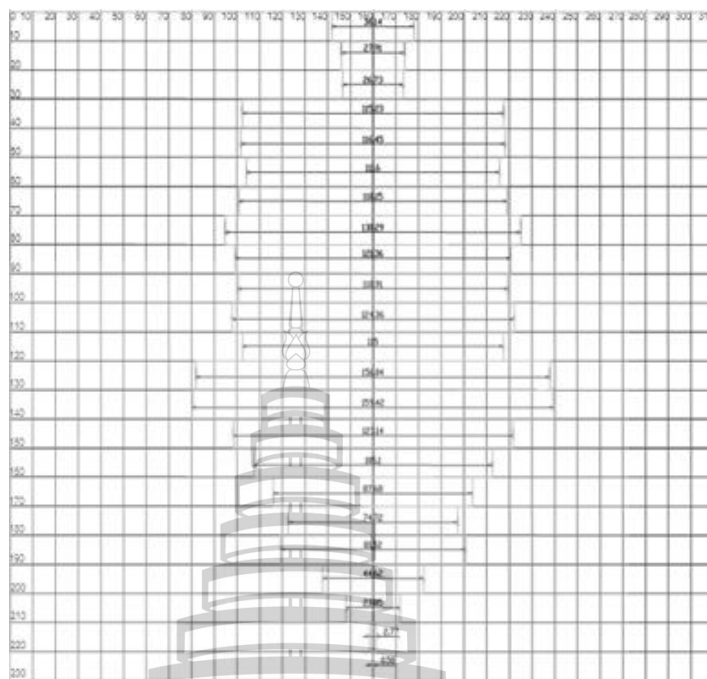
เมื่อได้ลักษณะของการกระจายตัวของรากต้นไม้แล้ว ทำการสร้างบล็อกการกระจายตัวของราก ในแต่ละช่วงความลึกและทำการเฉลี่ยบล็อกการกระจายตัวของรากในแต่ละชั้นของกระจายตัวทั้ง 4 ด้าน ดังรูปที่ 3.13 ถึง 3.15



ภาพที่ 3.14 สร้างบล็อกการกระจายตัวของรากในแต่ละชั้น



ภาพที่ 3.15 บล็อกการกระจายตัวของรากต้นไม้



ภาพที่ 3.16 บล็อกการกระจายตัวของรากที่เฉลี่ยแล้ว

เมื่อได้ลักษณะการกระจายตัวของรากต้นไม้หลังจากจำลองที่ระยะ 10.0 เซนติเมตรแสดงในภาพที่ 3.16 การนำแบบจำลองการกระจายของรากต้นไม้เพื่อนำไปประยุกต์กับแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินแบบอย่างง่ายเพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ได้ปรับลักษณะแบบจำลองการกระจายตัวของรากต้นไม้เพื่อให้สอดคล้องกับการลักษณะการเก็บตัวอย่างชั้นดินที่ทดสอบ ทำการเฉลี่ยที่ทุกความลึก 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.17

ในส่วนนี้เป็นขั้นตอนทดสอบหาค่าความเชื่อมั่นของดินประสานรากต้นไม้ (C_R) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบตัวแปรสำหรับนำมาสร้างแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพที่ศึกษาเพื่อเป้าหมายในการสร้างแบบจำลองเสริมกำลังของรากต้นไม้สำหรับปรับปรุงเสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียงนั้น จึงขอสมการที่ (2.44) ถึง (2.46) มาพิจารณาซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ก็คือ กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของรากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (t_R) จะผันแปรขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของรากที่อยู่ในพื้นที่หน้าตัดดิน (A_R) และพื้นที่หน้าตัดของดิน (A) โดยพิจารณาจากการทดสอบในภาคสนาม ส่วนรายละเอียดขั้นตอนวิธีการจะแสดงในภาคผนวก ดังแสดงในสมการที่ (3.2) และ (3.3) ซึ่งค่า C_R จะถูกนำไปใช้ในแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินต่อไป ซึ่งการคำนวณหาค่า C_R ได้แสดงดังตารางที่ 3.1

$$t_R = T_R (A_R / A) \quad (3.2)$$

$$C_R = t_R (\sin^{-1} + \cos^{-1} \tan \alpha') \quad (3.3)$$

โดยที่ C คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมด้วยราก

C_R คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยการเสริมราก

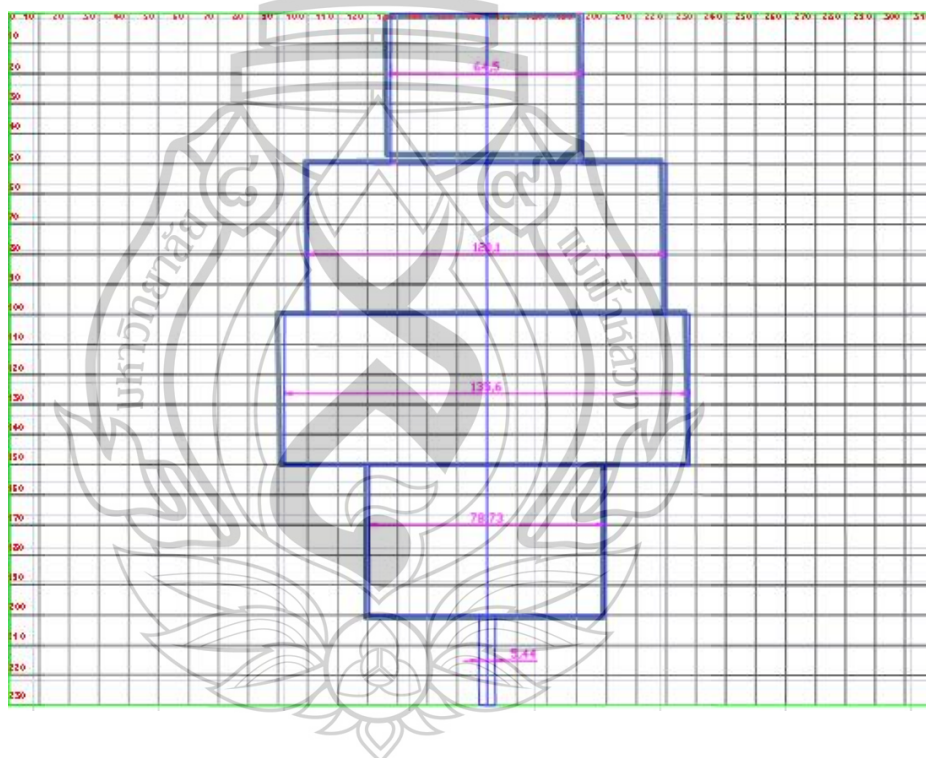
t_R คือ กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของรากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

T_R คือ กำลังรับแรงดึงของราก

A_R คือ พื้นที่หน้าตัดของรากที่อยู่ในพื้นที่หน้าตัดดิน

A คือ พื้นที่หน้าตัดของดิน

α' คือ มุมของแรงเฉือนที่บิดไปของราก หรือเท่ากับ $\tan^{-1}(X/Z)$



ภาพที่ 3.17 บล็อกการกระจายตัวของรากเฉลี่ยทุกความลึก 0.50 เมตร

ตารางที่ 3.1 การคำนวณหาค่า C_R

ระยะขีด	ค่าที่อ่านได้จากเกจความดัน	ค่าแรงที่สอบเทียบ	$A_R = \Sigma A_{Ri} (m^2)$	$A (m^2)$	$T_{Ri} (tonf/sq.m)$	$\tan \phi$	(RAR)	T_R	t_r	C_R $= t_r * RAR$
L(cm)	Pressure, p (ksc)	$F_{Ri} (tonf)$								
0	0	0.0000	1.0157	8.8125	0.0000	0.6368		0.0000	0.0000	0.0000
2	136	1.5420	1.0157	8.8125	1.5181	0.6368		0.1750	0.2100	0.0242
4	229	2.5966	1.0157	8.8125	2.5564	0.6368		0.2947	0.3536	0.0408
6	281	3.1863	1.0157	8.8125	3.1369	0.6368		0.3616	0.4339	0.0500
8	283	3.2090	1.0157	8.8125	3.1593	0.6368		0.3641	0.4370	0.0504
10	230	2.6080	1.0157	8.8125	2.5676	0.6368		0.2959	0.3551	0.0409
12	192	2.1771	1.0157	8.8125	2.1433	0.6368		0.2470	0.2965	0.0342
14	122	1.3833	1.0157	8.8125	1.3618	0.6368		0.1570	0.1884	0.0217
16	120	1.3606	1.0157	8.8125	1.3395	0.6368		0.1544	0.1853	0.0214
18	120	1.3606	1.0157	8.8125	1.3395	0.6368		0.1544	0.1853	0.0214
20	100	1.1338	1.0157	8.8125	1.1162	0.6368		0.1287	0.1544	0.0178
22	100	1.1338	1.0157	8.8125	1.1162	0.6368		0.1287	0.1544	0.0178
24	80	0.9070	1.0157	8.8125	0.8929	0.6368		0.1029	0.1235	0.0142
26	80	0.9070	1.0157	8.8125	0.8929	0.6368		0.1029	0.1235	0.0142
28	55	0.6235	1.0157	8.8125	0.6138	0.6368		0.0707	0.0849	0.0098
30	55	0.6235	1.0157	8.8125	0.6138	0.6368		0.0707	0.0849	0.0098
32	55	0.6235	1.0157	8.8125	0.6138	0.6368		0.0707	0.0849	0.0098
34	55	0.6235	1.0157	8.8125	0.6138	0.6368		0.0707	0.0849	0.0098
36	50	0.5668	1.0157	8.8125	0.5580	0.6368		0.0643	0.0772	0.0089
38	50	0.5668	1.0157	8.8125	0.5580	0.6368		0.0643	0.0772	0.0089
40	45	0.5101	1.0157	8.8125	0.5022	0.6368		0.0579	0.0695	0.0080
42	45	0.5101	1.0157	8.8125	0.5022	0.6368		0.0579	0.0695	0.0080
44	40	0.4534	1.0157	8.8125	0.4463	0.6368		0.0514	0.0617	0.0071
46	40	0.4534	1.0157	8.8125	0.4463	0.6368		0.0514	0.0617	0.0071
48	35	0.3967	1.0157	8.8125	0.3905	0.6368		0.0450	0.0540	0.0062
50	35	0.3967	1.0157	8.8125	0.3905	0.6368		0.0450	0.0540	0.0062
52	30	0.3400	1.0157	8.8125	0.3347	0.6368		0.0386	0.0463	0.0050
54	25	0.2833	1.0157	8.8125	0.2789	0.6368		0.0321	0.0386	0.0040
56	25	0.2833	1.0157	8.8125	0.2789	0.6368		0.0321	0.0386	0.0040
58	20	0.2266	1.0157	8.8125	0.2231	0.6368		0.0257	0.0309	0.0030
60	20	0.2266	1.0157	8.8125	0.2231	0.6368		0.0257	0.0309	0.0030
54	10	0.1132	1.0157	8.8125	0.1114	0.6368		0.0128	0.0154	0.0020
56	10	0.1132	1.0157	8.8125	0.1114	0.6368		0.0128	0.0154	0.0020
58	0	0.0000	1.0157	8.8125	0.0000	0.6368		0.0000	0.0000	0.0000
60	0	0.0000	1.0157	8.8125	0.0000	0.6368		0.0000	0.0000	0.0000
Select max. force	283	3.2090	1.0157	8.8125	3.1593	SUM	0.1153	3.1593	3.7911	0.4370

หมายเหตุ. ผลรวมค่า C_R เท่ากับ 0.893 ตันต่อตารางเมตร

3.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ประสานดิน (Tree Roots Reinforcement Model)

การสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังของรากต้นไม้ประสานดินร่วมกับแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน หลังจากที่ได้หาค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของมวลดินที่เพิ่มขึ้นด้วยการเสริมกำลังด้วยรากประสานดิน (c_R) สามารถแสดงในสมการที่ (3.4)

$$FS = \frac{(c' + c_R) + Z \cos^2 \left[\frac{m \gamma_{sat} + (1-m) \gamma - m \gamma}{m \gamma_{sat} + (1-m) \gamma} \right] \tan \alpha'}{Z \sin \cos} \quad (3.4)$$

3.3 ขั้นตอนวิธีการศึกษาสร้างแบบจำลองวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านมวลดิน

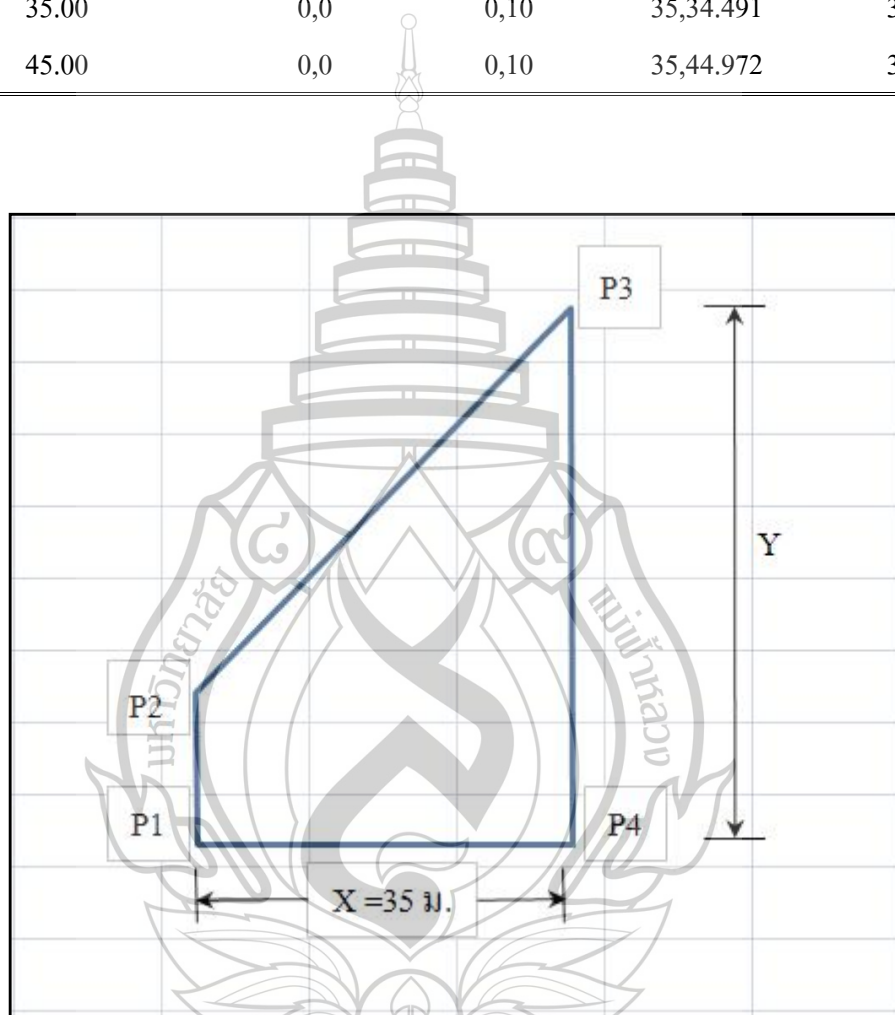
ในส่วนนี้จะเป็นส่วนสุดท้ายที่ศึกษาซึ่งได้นำเทคนิคทางไฟไนต์อีลิเมนต์ช่วยในการแก้ปัญหาโดยแทนค่าพารามิเตอร์ในสมการของแบบจำลองการไหลของน้ำผ่านมวลดิน ซึ่งเป็นการศึกษาปัญหาแบบสองมิติครั้งนี้ได้อาศัยโปรแกรม COMSOL ช่วยในการสร้างแบบจำลองที่กำหนดขึ้นเพื่อพิจารณาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียงนั้นซึ่งจะมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมของดิน (k_x, k_y) ค่าแรงดันน้ำในมวลดิน (u) สามารถพิจารณาในรูปแบบของตัวแปรค่าศักย์ของน้ำ (h) และค่าช่วงเวลาที่เกิดฝนตก (t) สามารถแสดงขั้นตอนรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 การกำหนดขอบเขตรูปร่างของปัญหาในแบบจำลองโดยโปรแกรม COMSOL

ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาการไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดิน ซึ่งมุมลาดเอียงที่มีความเสี่ยงในการเกิดการพังทลายอยู่ระหว่าง 22.0 ถึง 66.0 องศา (ชิดชัย อนันตเศรษฐ์, 2551) และในการศึกษาจึงได้ใช้ค่ามุมลาดเอียงดังแสดงในตารางที่ 3.2 และภาพที่ 3.18

ตารางที่ 3.2 การกำหนดขอบเขตรูปร่างด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาของแบบจำลอง

Slope study	P1(X,Y)	P2(X,Y)	P3(X,Y)	P4(X,Y)
25.00	0,0	0,10	35,26.311	35,0
35.00	0,0	0,10	35,34.491	35,0
45.00	0,0	0,10	35,44.972	35,0



ภาพที่ 3.18 การกำหนดขอบเขตรูปร่างของแบบจำลองที่ศึกษาการไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดิน

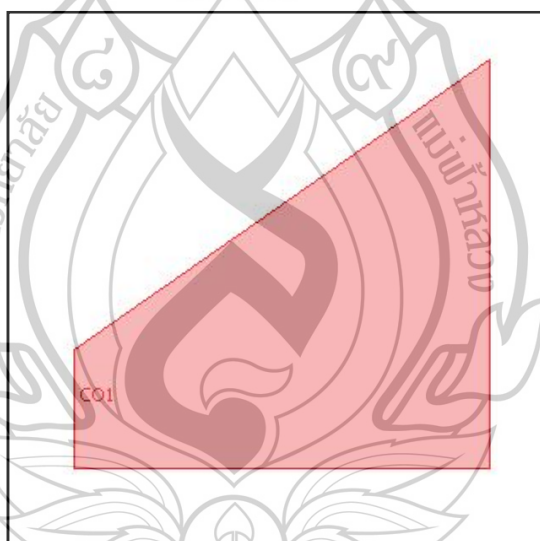
3.3.2 การกำหนดสมบัติของมวลดิน

ในแบบจำลองมีความจำเป็นอย่างยิ่งและเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการพังทลายของดินในการศึกษาครั้งนี้ได้เก็บชุดข้อมูลตัวอย่างมวลดินในภาคสนามเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความชื้นแน่น (C) , ค่ามุมเสียดทานภายในมวลดิน (ϕ) และหน่วยน้ำหนักของมวลดิน (γ) ซึ่งเป็น

ลักษณะทางกายภาพของดินที่เกิดขึ้นในภาคเหนือตอนบนของประเทศ (จิตชัย อนันตเศรษฐ์, 2551) ซึ่งข้อมูลต่างๆที่ได้สำหรับการจำลองจึงนิยามรายละเอียดบ่งบอกลักษณะทางกายภาพของดิน ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และภาพที่ 3.19

ตารางที่ 3.3 การกำหนดสมบัติของมวลดินที่เลือกใช้ในการศึกษาในแบบจำลอง

ชุดข้อมูล ดิน	C (ton/m ²)	ϕ (degree)	γ (ton/m ³)	นิยามรายละเอียดบ่งบอก- ลักษณะทางกายภาพของดิน
ชุดที่ 1	1.79	18.66	1.92	มวลดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ
ชุดที่ 2	2.76	19.74	1.93	มวลดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนปานกลาง
ชุดที่ 3	7.66	25.19	1.89	มวลดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนสูง



ภาพที่ 3.19 การกำหนดสมบัติต่าง ๆ ของรูปร่างลาดดินและข้อมูลต่าง ๆ ในแบบจำลอง

สมการของแวนด์เกนนูตเตน (Van Genuchten Equation) ในปี คศ.1980 เป็นสมการที่อาศัยตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จำนวน 4 ตัวแปรเพื่อสำหรับคำนวณหาค่าปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดิน (w_w) สามารถแสดงได้ดังในสมการที่ (3.5)

$$-w = -r + \left[\frac{(3.5) s - r}{1 + \left(\frac{\cdot}{a} \right)^n} \right]^{m_f} \quad (3.5)$$

โดยที่ $-w$ เท่ากับ ปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดิน

$-s$ เท่ากับ ปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดินสภาพอิ่มตัว

$\cdot$ เท่ากับ แรงดันน้ำในมวลดิน (negative pore water pressure)

a, n, m_f เท่ากับ พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ (curve fitting parameters)

ค่า a, n, m_f เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ (curve fitting parameters) สามารถหาค่าได้ โดย (Fredlund & Xing, 1994) ซึ่งค่าคงที่ a จะเป็นค่าที่หาได้จากจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดินและมีค่าไม่เกินปริมาตรของอากาศในมวลดิน ค่าคงที่ n หาได้จากความชันของฟังก์ชัน ปริมาณน้ำในปริมาตรของมวลดิน และค่าคงที่ m_f สามารถหาค่าได้จากปริมาณน้ำที่เหลือในปริมาตรของมวลดิน ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3.6) ถึง (3.8)

$$a = \cdot_i \quad (3.6)$$

$$m_f = 3.67 \ln \left(\frac{-s}{\cdot_i} \right) \quad (3.7)$$

$$n = \frac{1.31^{m_f+1}}{m_f \cdot s} 3.72 \cdot \cdot_i \quad (3.8)$$

การหาพารามิเตอร์ Hydraulic Conductivity ในปี ค.ศ.1980 แวนด์เกนนูต์เทน (Van Genuchten Equation) ได้หาสมการที่มีความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน Hydraulic Conductivity เพื่ออธิบายค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในมวลดินในรูปแบบของตาข่าย (mesh) และเมทริกซ์ suction ดังแสดงในสมการที่ 3.9

$$k_w = k_s \frac{[1 - (a \cdot n)^{(n-1)}(1 + (a \cdot n)^{-m_f})]^2}{[(1 + (a \cdot n)^n)^{\frac{m_f}{2}}]} \quad (3.9)$$

โดยที่ k_s เท่ากับ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในปริมาตรของมวลดินในสภาพอิ่มตัว

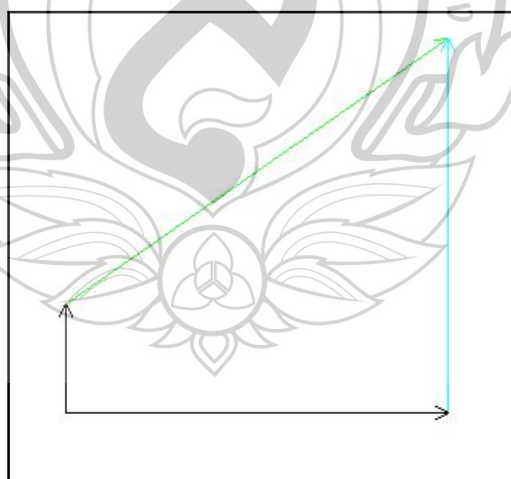
· เท่ากับ ค่าช่วงของแรงดูดน้ำในมวลดิน (required suction range)

a, n, m_f เท่ากับ พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ (curve fitting parameters)

n เท่ากับ $1/(1-m_f)$

3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มและเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

สำหรับการหาค่าศักย์ของน้ำบนพื้นที่ลาดเอียงที่สภาวะฝนตกที่ความเข้มต่าง ๆ กัน สามารถทำการวิเคราะห์แบบไม่คงที่ (transient analysis) เพื่อพิจารณาหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ลดลงเนื่องจากปริมาณความเข้มของฝน จากการเกิดดินพังทลายสืบเนื่องจากปริมาณความเข้มของฝน ค่ามากกว่า 100.0 มิลลิเมตรต่อวัน (จิตชัย อนันตเศรษฐ์, 2551) และความเข้มของฝนที่ส่งผลให้มีความเสี่ยงเกิดดินพังทลายในเกาะช่องกวมมีค่าเท่ากับ 1,200.0 มิลลิเมตรต่อวัน ซึ่งฝนตกติดต่อกันเกิน 5.0 ชั่วโมง (Kay, 1998) ในการกำหนดให้มีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่ใช้ศึกษาในแบบจำลองแบบไม่คงที่ (อภินิติ และอัศพัทธ์ สว่างสุริย์, 2551) ได้กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถแสดงได้ในตารางที่ 3.4 และดังแสดงในภาพที่ 3.20

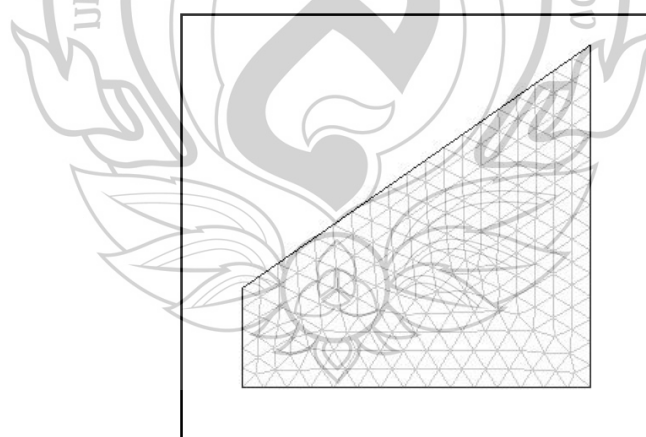


ภาพที่ 3.20 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มและเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

ตารางที่ 3.4 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดิน และปริมาณน้ำฝนที่เลือกใช้
ในการศึกษา

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดิน	
k_s (m/day)	k_s (m/sec)
0.02	2.3148E-07
0.20	2.3148E-06
2.00	2.3148E-05
ค่าปริมาณน้ำฝน	
ปริมาณน้ำฝน(mm/day)	ปริมาณน้ำฝน(m/sec)
100.00	1.15741E-06
200.00	2.31481E-06
300.00	3.47222E-06

3.3.4 การกำหนดตาข่าย (Mesh) และแก้ระบบสมการของปัญหาที่ศึกษา ดังแสดงในภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 การกำหนดตาข่าย (Mesh) ของปัญหาในแบบจำลองที่ศึกษา

ในบทนี้จึงได้อธิบายถึงระเบียบวิธีวิจัยและวิธีการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง รวมถึงแหล่งที่มาและการอธิบายค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในแบบจำลองที่ศึกษาทั้งหมด 3 ส่วนที่สำคัญ ดังนั้นจึงขอสรุปรวมตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาโดยแสดงตำแหน่งที่ปรากฏทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สรุปรวมตัวแปรในสมการและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา

ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ	ตำแหน่งที่ปรากฏ
สำหรับแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	
$FS, c', \phi', \gamma_{sat}, \gamma, \gamma_{wt}, Z, m$	สมการที่ 3.1 , ตารางที่ 3.3
C_R, t_R, T_R, A_R, A	สมการที่ 3.2 , 3.3 , ตารางที่ 3.1
k_s	สมการที่ 3.1 , ตารางที่ 3.2
ค่าปริมาณน้ำฝน	ตารางที่ 3.4
$\bar{w}$	ตารางที่ 3.4
a	สมการที่ 3.5
m_f	สมการที่ 3.6
n	สมการที่ 3.7
k_w	สมการที่ 3.8
	สมการที่ 3.9

บทที่ 4

ผลการศึกษาแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน

การดำเนินการศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียงแบบ 2 มิติ มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองใน 2 มิติ สำหรับคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัยภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน เนื่องจากปริมาณฝนตกบนพื้นที่ลาดเอียงที่ขึ้นอยู่กับลักษณะมุมลาดเอียง (slope angle) สมบัติของมวลดิน (soil property) และเวลา (time) ในพื้นที่ศึกษาจังหวัดเชียงราย บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย และทำการนำข้อมูลจริงที่ได้จากการทดสอบมากำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง โดยมีการศึกษาที่สำคัญ 4 ส่วน คือ การสร้างแบบจำลอง การกำหนดตัวแปรเพื่อทดสอบแบบจำลอง การวิเคราะห์แบบจำลอง และผลการศึกษา

4.1 การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียงแบบ 2 มิติ ในพื้นที่ศึกษาจังหวัดเชียงราย เพื่อกำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน ณ ตำแหน่งและเวลาใด ๆ มีรายละเอียดของขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองดังต่อไปนี้

4.1.1 การเลือกแบบจำลอง (Model Selection)

ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL ในการสร้างแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพและแบบจำลองการไหลของน้ำผ่านมวลดิน เนื่องจาก COMSOL เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถคำนวณหาการไหลของน้ำในมวลดินโดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ตามสมการที่ (2.33) และใช้เทคนิคทางไฟไนต์อีลิเมนต์ภายใต้สภาวะเงื่อนไขค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขต ตามสมการที่ (2.35) และเมื่อแก้สมการจะได้ผลลัพธ์ของตัวแปรที่อยู่ในรูปของค่าศักย์ของน้ำ (h) แล้วนำค่าดังกล่าวใช้เป็นค่าเริ่มในแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ณ ตำแหน่งและ

4.1.3 ข้อมูลเชิงพื้นที่ของลาดดิน (Slope Geometry)

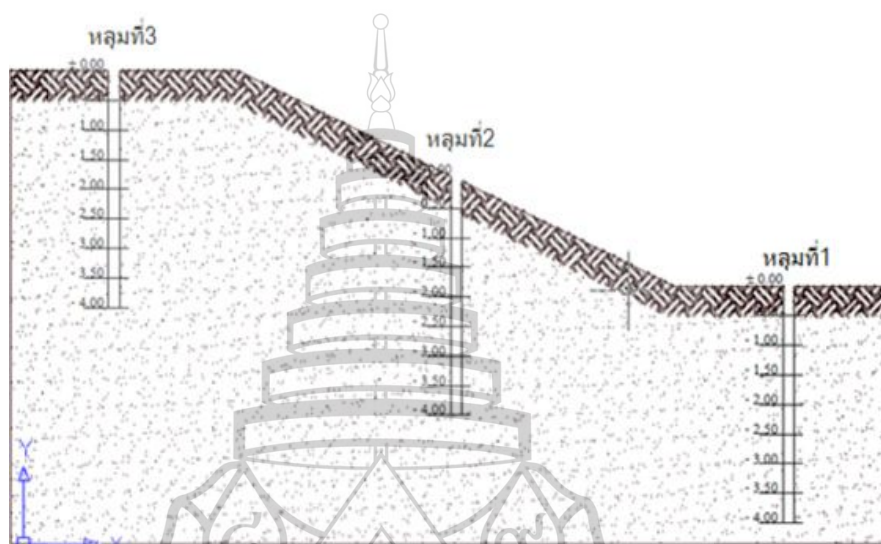
การสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียงภายใต้การไหลของปริมาณน้ำฝนผ่านมวลดินจำเป็นที่จะต้องใช้อัตราเชิงพื้นที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เขตพื้นที่ที่เชียงรายเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการคำนวณ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่ของบริเวณเชิงเขาอาการเรียนและปฏิบัติการวิศวกรรมโยธาจากแผนที่ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ข้อมูลที่ต้องการสำหรับมาสร้างแบบจำลองนี้ มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ลักษณะทางกายภาพของลาดดิน (มุมลาดเอียง,) ได้กำหนดมุมลาดเอียงอยู่ระหว่างค่า 25 ถึง 45 องศา, สมบัติของมวลดินตามระดับความลึกที่ศึกษาซึ่งได้เก็บตัวอย่างสูงสุดเท่ากับ 4.00 เมตร (C, ϕ, γ) และลักษณะความลึกของน้ำฝนที่ซึมลงในมวลดิน โดยกำหนดค่าปริมาณน้ำฝนอยู่ระหว่างค่า 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน ข้อมูลทั้ง 3 ส่วนนี้ได้ใช้โปรแกรม COMSOL สร้างแบบจำลองและคำนวณการไหลของน้ำผ่านมวลดิน ในรูปของค่าศักย์ของน้ำ (h_w) และนำค่า h_w นำกลับเข้าไปเป็นเริ่มต้นในแบบจำลองหลักสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อจะเป็นตัวชี้วัดค่าอัตราส่วนปลอดภัย ณ ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ เมื่อมีค่าศักย์ของน้ำเพิ่มขึ้นตามเวลาต่าง ๆ ในบริเวณนั้น ดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 พื้นที่ศึกษาในบริเวณขอบเขตเส้นปร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เขตพื้นที่ที่เชียงราย

4.1.4 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น (Boundary Condition and Initial Condition)

ในการวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านมวลดินแบบไม่คงที่ (transient) โดยแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ซึ่งใช้เทคนิควิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ (finite element method) จำเป็นจะต้องมีการระบุเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณ



ภาพที่ 4.3 ภาพตัดตามขวางแสดงการเก็บตัวอย่างของมวลดินตามความลึกเพื่อพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

เนื่องจากการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทั้งระบบของปัญหา ทำให้เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้คำตอบที่ได้เปลี่ยนแปลงไปตาม

แบบจำลองที่ใช้ศึกษาเป็นลักษณะสมบัติชั้นดินที่เหมือนกันทั้งหมด ซึ่งต้องการเงื่อนไขขอบเขต 3 เงื่อนไข คือ ส่วน ณ ตำแหน่งบริเวณขอบล่างและขอบริมขวาที่กำหนดให้มีลักษณะเป็นชั้นดินที่บ้นน้ำ ซึ่งทิศทางการไหลของน้ำในมวลดินเกิดขึ้นในระนาบตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงแบบคงที่อย่างช้า ๆ และไม่มีการไหลซึมในทิศทางแนวดิ่ง ส่วนบริเวณขอบริมซ้ายกำหนดให้ชั้นดินมีการไหลออกจากหน้าตัดทั้งในทิศทางของระนาบแนวดิ่งและแนวราบ ส่วนในขอบบนของรูปรางจะกำหนดให้มีการไหลของน้ำผ่านมวลดินอันเนื่องมาจากความเข้มข้นของปริมาณน้ำฝนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งได้กำหนดปริมาณน้ำฝนในแบบจำลองที่ศึกษามีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน

เมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นเป็นการกำหนด เงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลอง คือ อัตราการไหลของน้ำไหลลงมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง ณ ตำแหน่งบริเวณขอบบนของรูปร่างแบบสามเหลี่ยมตลอดผิวหน้าตัดของลาดเอียง ณ เวลาเริ่มต้นการคำนวณ ซึ่งค่าของเงื่อนไขเริ่มต้นนี้จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ เช่น เงื่อนไขขอบเขตเป็นค่าปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน เงื่อนไขเริ่มต้นก็จะต้องเป็นอัตราการไหลของน้ำในมวลดินที่เท่ากันตามด้วย

4.2 การกำหนดตัวแปรเพื่อทดสอบแบบจำลอง

4.2.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น (Starting Parameter)

การศึกษาสร้างแบบจำลองได้พิจารณาคำหนดเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบและค่ามาตรฐานที่ใช้ทั่วไป ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์จำนวน 4 ส่วน คือ มุมลาดเอียง, สมบัติของมวลดิน, ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดิน และค่าปริมาณความชื้นฝนต่อเนื่องรายวัน ซึ่งค่าทดสอบที่ใช้ในการเริ่มต้นการคำนวณได้มาจากการทดสอบในภาคสนามและการทดลองและกำหนดจากงานวิจัยต่าง ๆ และสรุปค่าในช่วงของพารามิเตอร์ที่กำหนดแสดงไว้ดังในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ช่วงของค่าพารามิเตอร์และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นในแบบจำลอง

ลำดับที่	พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	จำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้น
1.	มุมลาดเอียง (องศา)	25.00	45.00	3.00
2.	ค่าความเชื่อมแน่นของดิน (ตันต่อตารางเมตร)	1.79	7.66	3.00
3.	ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน(องศา)	18.66	25.19	3.00
4.	ค่าความหนาแน่นของดิน (ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	1.89	1.93	3.00
5.	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำ ผ่านมวลดิน (เมตรต่อวัน)	0.02	2.00	3.00
6.	ค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายวัน (มิลลิเมตรต่อวัน)	100.00	300.00	3.00

4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองเสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน

การศึกษาแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินซึ่งได้จากการตอบสนองของพารามิเตอร์ (parameter sensitivity) ที่มีผลต่อการคำนวณของแบบจำลอง โดยพารามิเตอร์ทั้งหมด 6 พารามิเตอร์ โดยใช้ข้อมูลที่แสดงดังตารางที่ 4.1 ในการศึกษาจึงเลือกกำหนดพารามิเตอร์สำหรับกรอบแนวทางการศึกษาเพื่อนำไปใช้ในการอภิปรายผลการศึกษแบบจำลอง ซึ่งสามารถจำแนกเป็นประเด็นทั้งหมด 4 ส่วน คือ

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อแบบจำลอง โดยมีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นตามตารางที่ 4.2
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำที่มีผลต่อแบบจำลองและ
4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) ที่มีผลต่อแบบจำลอง โดยแสดงค่าต่าง ๆ สำหรับใช้ในการอภิปรายผลการศึกษแบบจำลองดังในตารางที่ 4.2 ถึง 4.5

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อแบบจำลอง

ลำดับที่	ปริมาณน้ำฝน (mm/day)	มุมลาดเอียง (องศา)	ส.ป.ส ความชื้นได้ ของน้ำผ่าน มวลดิน	ค่าสมบัติของมวลดิน (c, ϕ , γ)
1.	100.00	35.00	0.20	7.66, 25.19, 1.89
2.	200.00	35.00	0.20	7.66, 25.19, 1.89
3.	300.00	35.00	0.20	7.66, 25.19, 1.89

จากตารางที่ 4.2 มีเป้าหมายเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อแบบจำลองที่ศึกษา โดยเลือกมุมลาดเอียงเท่ากับ 35.00 องศา, ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินเท่ากับ 0.20 เมตรต่อวัน และชุดตัวอย่างดินที่ค่าสมบัติของมวลดิน คือ ค่าความเชื่อม

แน่น เท่ากับ 7.66 ต้นต่อตารางเมตร, ค่ามุมเสียดทานภายในมวลดิน เท่ากับ 25.19 องศา และหน่วยน้ำหนักของมวลดิน เท่ากับ 1.89 ต้นต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง

ลำดับที่	ปริมาณน้ำฝน (mm/day)	มุมลาดเอียง (องศา)	ส.ป.ส ความซึมได้ ของน้ำผ่าน มวลดิน	ค่าสมบัติของมวลดิน (c, ϕ , γ)
1.	100.00	35.00	0.20	1.79, 18.66, 1.92
2.	100.00	35.00	0.20	2.76, 19.74, 1.93
3.	100.00	35.00	0.20	7.66, 25.19, 1.89

จากตารางที่ 4.3 มีเป้าหมายเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงชุดตัวอย่างดินสมบัติของมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลองที่ศึกษา โดยเลือก ค่าความซึมของปริมาณน้ำฝนอย่างต่อเนื่อง เท่ากับ 100.00 มิลลิเมตรต่อวัน, มุมลาดเอียงเท่ากับ 35.00 องศา และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดิน เท่ากับ 0.20 เมตรต่อวัน

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลองโดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำที่มีผลต่อแบบจำลอง

ลำดับที่	ปริมาณน้ำฝน (mm/day)	มุมลาดเอียง (องศา)	ส.ป.ส ความซึมได้ ของน้ำผ่าน มวลดิน	ค่าสมบัติของมวลดิน (c, ϕ , γ)
1.	100.00	35.00	0.02	7.66, 25.19, 1.89
2.	100.00	35.00	0.20	7.66, 25.19, 1.89
3.	100.00	35.00	2.00	7.66, 25.19, 1.89

จากตารางที่ 4.4 มีเป้าหมายเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลองที่ศึกษา โดยเลือกค่าความเข้มของปริมาณน้ำฝนอย่างต่อเนื่องเท่ากับ 100.00 มิลลิเมตรต่อวัน, มุมลาดเอียงเท่ากับ 35.00 องศา และชุดตัวอย่างดินที่ค่าสมบัติของมวลดิน คือ ค่าความเชื่อมั่นแน่น เท่ากับ 7.66 ดันต่อตารางเมตร, ค่ามุมเสียดทานภายในมวลดิน เท่ากับ 25.19 องศา และหน่วยน้ำหนักของมวลดิน เท่ากับ 1.89 ดันต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) ที่มีผลต่อแบบจำลอง

ลำดับที่	ปริมาณน้ำฝน (mm/day)	มุมลาดเอียง (องศา)	ส.ป.ส ความซึมได้ ของน้ำผ่าน มวลดิน	ค่าสมบัติของมวลดิน (c, ϕ , γ)
1.	100.00	25.00	0.20	7.66, 25.19, 1.89
2.	100.00	35.00	0.20	7.66, 25.19, 1.89
3.	100.00	45.00	0.20	7.66, 25.19, 1.89

จากตารางที่ 4.5 มีเป้าหมายเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงมุมลาดเอียงที่มีผลต่อแบบจำลองที่ศึกษา โดยเลือกค่าความเข้มของปริมาณน้ำฝนอย่างต่อเนื่อง เท่ากับ 100.00 มิลลิเมตรต่อวัน, ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินเท่ากับ 0.20 เมตรต่อวัน และชุดตัวอย่างดินที่ค่าสมบัติของมวลดิน คือ ค่าความเชื่อมั่นแน่น เท่ากับ 7.66 ดันต่อตารางเมตร, ค่ามุมเสียดทานภายในมวลดิน เท่ากับ 25.19 องศา และหน่วยน้ำหนักของมวลดิน เท่ากับ 1.89 ดันต่อลูกบาศก์เมตร

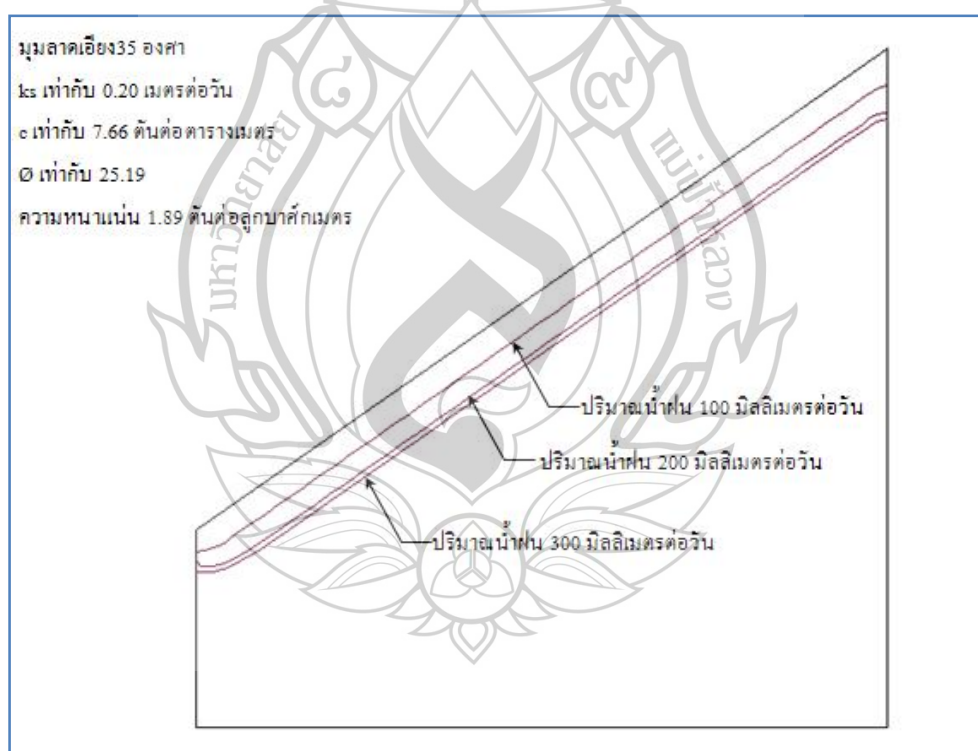
จากตารางที่ 4.2-4.5 ได้นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับผลในการศึกษาแบบจำลองในหัวข้อต่อไป

4.4 ผลการศึกษาแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน

ในส่วนหัวข้อนี้จะได้เสนอผลการศึกษาแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน โดยแบ่งการอภิปรายเป็น 4 ส่วน คือ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อแบบจำลอง ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง ; เปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) ที่มีผลต่อแบบจำลอง รายละเอียดดังหัวข้อย่อยต่อไป

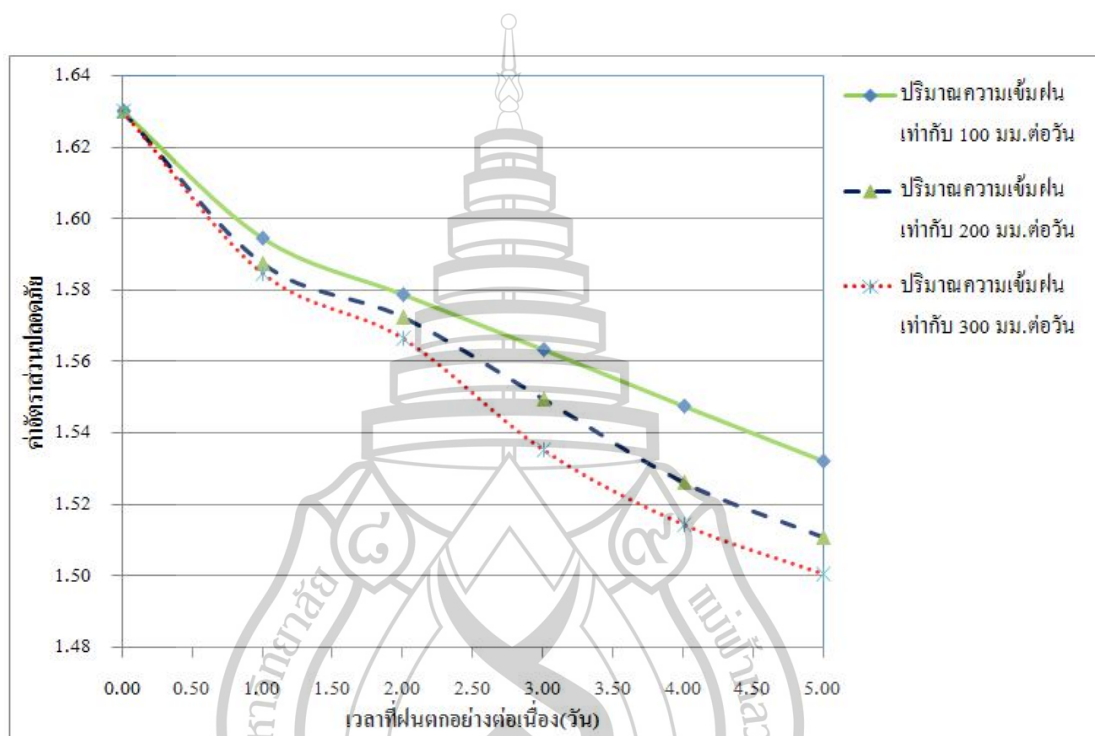
4.4.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อแบบจำลอง

การศึกษการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่ตกตลอดอย่างต่อเนื่องที่มีผลต่อแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน สามารถอภิปรายผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 4.4 และ 4.5



ภาพที่ 4.4 ระดับความลึกของปริมาณน้ำที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองในแต่ละพารามิเตอร์ของปริมาณน้ำฝนระหว่าง 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน

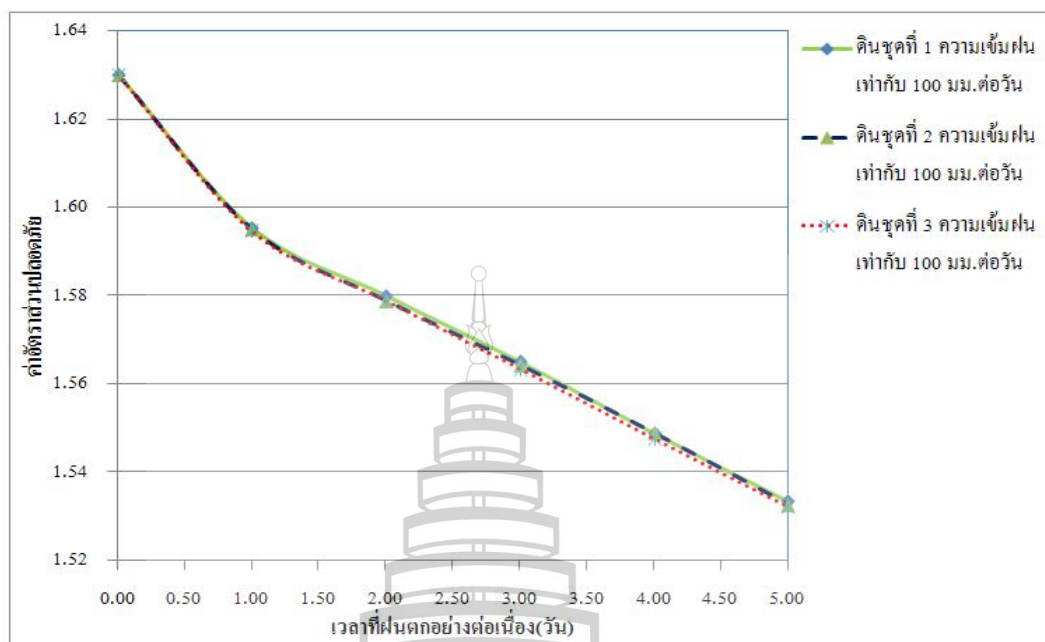
เมื่อพิจารณาความเข้มข้นปริมาณน้ำฝนที่อยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน ภายใต้พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้น ดังตารางที่ 4.2(ก) เมื่อปริมาณน้ำฝนมีค่าเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจะมีค่าลดลง อีกทั้งมีผลทำให้ลักษณะของการพังทลายเพิ่มขึ้นตามสภาพเชิงลาดที่สูงขึ้นและลักษณะสมบัติทางกายภาพที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ



ภาพที่ 4.5 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของปริมาณน้ำฝนที่ศึกษาในแบบจำลองที่มีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน

4.4.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง

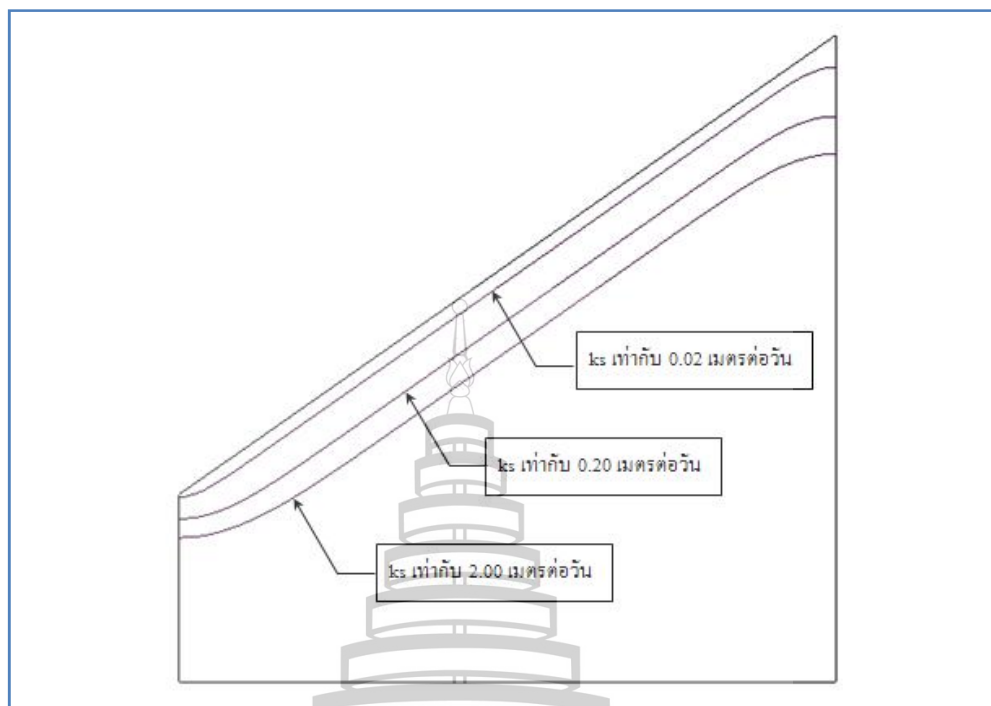
การศึกษาลักษณะสมบัติของมวลดินที่แตกต่างกันที่มีผลต่อแบบ องค์กรวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน โดยวิธีลาดอนันต์ สามารถอธิบายผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 4.6 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าสมบัติของดินที่แตกต่างกัน ในส่วนของค่าความเชื่อมั่น มุมเสียดทานภายในและค่าความหนาแน่นของดิน ดังตารางที่ 4.2(ข) พบว่าเมื่อค่าสมบัติทางกายภาพของมวลดินมีการเปลี่ยนแปลงไปจะไม่ส่งผลต่อความลึกของน้ำฝนที่ตกซึมอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าลดลงในทิศทางเดียวกันตาม ณ ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน



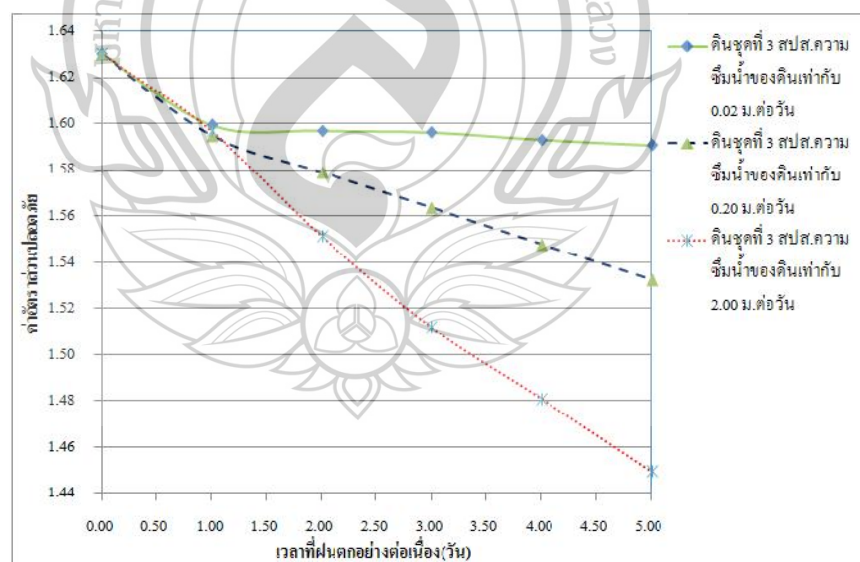
ภาพที่ 4.6 ค่าอัตราส่วนปลอตกภัยของแบบจำลองที่ศึกษาลักษณะสมบัติของมวลดินที่แตกต่างกัน ภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝน เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน

4.4.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง

การศึกษาลักษณะค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำที่มีผลต่อแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน สามารถอภิปรายผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 4.7 และ ภาพที่ 4.8 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.4 พบว่าในช่วงฝนตกอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงแรก ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินจะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอตกภัยมีค่าลดลงในทิศทางเดียวกัน และเมื่อฝนตกต่อเนื่องภายหลัง 24 ชั่วโมง จนทำให้มวลดินเกิดสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินที่มีค่าสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอตกภัยมีค่าลดลงอย่างฉับพลัน ณ ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน



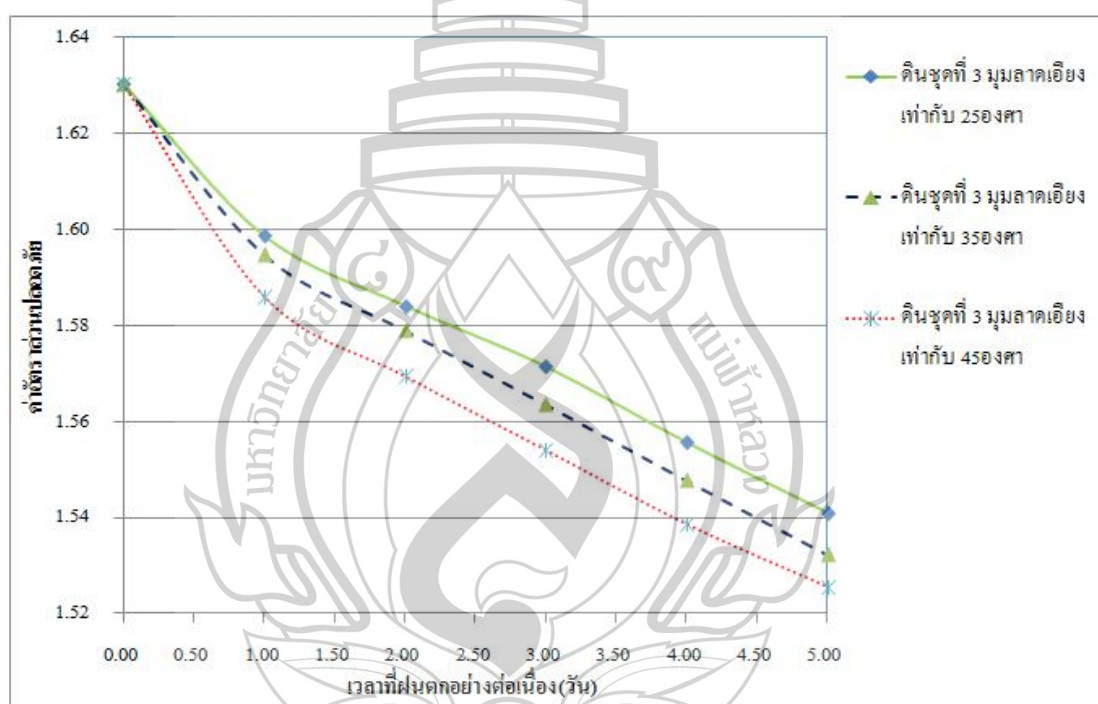
ภาพที่ 4.7 ค่าระดับความลึกของน้ำฝนตกอย่างต่อเนื่องเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวันของ
ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินที่แตกต่างกันของแบบจำลองที่ศึกษา



ภาพที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินที่แตกต่างกัน
ของแบบจำลองที่ศึกษาภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝน เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน

4.4.4 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาดที่มีผลต่อแบบจำลอง

การศึกษาลักษณะสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) ที่มีผลต่อแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน สามารถอธิบายผลการศึกษาดังแสดงในภาพ 4.9 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า มุมลาดเอียงที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อลักษณะสภาพเชิงลาดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้ระดับความลึกของน้ำฝนที่ซึมลงดินมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำส่งผลทำให้สภาพดินอิ่มตัวหลังจากฝนตกอย่างต่อเนื่อง จนทำให้น้ำหนักที่กดทับของมวลดินบนลาดเอียงเพิ่มขึ้นและมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าลดลงในทิศทางเดียวกันตามเวลาที่ฝนตกต่างๆ อีกทั้งยังมีผลทำให้ลักษณะของการพังทลายเพิ่มขึ้นตามลาดชันที่สูงขึ้นตาม



ภาพที่ 4.9 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของสภาพของเชิงลาดที่ต่างแตกต่างกันของแบบจำลองที่ศึกษาภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝน เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน

4.5 อภิปรายผลการศึกษา

การสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินโดยวิธีลาอานันต์และมีฝนตกอย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษา หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยสำหรับผลของลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน, สมบัติของมวลดิน, การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินและการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) ที่มีผลต่อแบบจำลองที่ศึกษา โดยอาศัยพิจารณาค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขตของปัญหา ผลการไหลซึมของปริมาณน้ำฝน ที่แปรเปลี่ยนตามเวลาที่เกิดขึ้น และลักษณะรูปร่างการพังทลายเพียงครั้งเดียวหลังจากการวิเคราะห์แบบจำลองเท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยวิธีการดังกล่าวเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ในสภาพความเป็นจริงตามธรรมชาติแล้วนั้น ลักษณะการพังทลายจะมีความสัมพันธ์ควบคู่กันทั้ง 4 ลักษณะเปลี่ยนแปลง คือ ความเข้มของปริมาณน้ำฝน, สมบัติของมวลดิน, การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดิน และการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) อีกทั้งลักษณะการพังทลายที่เวลาเริ่มต้นจะส่งผลต่อการเกิดการพังทลายสุดท้าย หากมีการนำเอาผลลัพธ์ของค่าที่ได้กลับมาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยในแบบจำลองที่ศึกษาอีกครั้งจะทำให้ ผลที่ศึกษามีความถูกต้องและใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติ

บทที่ 5

อภิปรายผลการศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อ การวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน

การดำเนินการศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียงแบบ 2 มิติ มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองรากต้นไม้ในระนาบ 2 มิติ สำหรับคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัยภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน เนื่องจากปริมาณฝนตกบนพื้นที่ลาดเอียงที่ขึ้นอยู่กับลักษณะมุมลาดเอียง (slope angle) สมบัติของมวลดิน (soil property) เวลา (time) และลักษณะรูปร่างการกระจายตัวของรากต้นไม้ ในพื้นที่ศึกษาจังหวัดเชียงราย บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย และทำการนำข้อมูลจริงที่ได้จากการทดสอบมากำหนดค่า พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง โดยมีการศึกษาที่สำคัญ 4 ส่วน คือ การสร้างแบบจำลอง การกำหนดตัวแปรเพื่อทดสอบแบบจำลอง การวิเคราะห์แบบจำลอง และผลการศึกษา

5.1 การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียงแบบ 2 มิติ ในพื้นที่ศึกษาจังหวัดเชียงราย เพื่อคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัยภายใต้การไหลของน้ำผ่านมวลดิน ณ ตำแหน่งและเวลาที่ฝนตกต่อเนื่องต่าง ๆ มีรายละเอียดของขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองดังต่อไปนี้

5.1.1 การเลือกแบบจำลอง (Model Selection)

ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL ในการสร้างแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ แบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพ แบบจำลองการไหลของน้ำผ่านมวลดินและแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ เนื่องจาก COMSOL เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถคำนวณหาการไหลของน้ำในมวลดินโดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ตามสมการที่ (2.31) และใช้เทคนิคทางไฟไนต์อีลิเมนต์

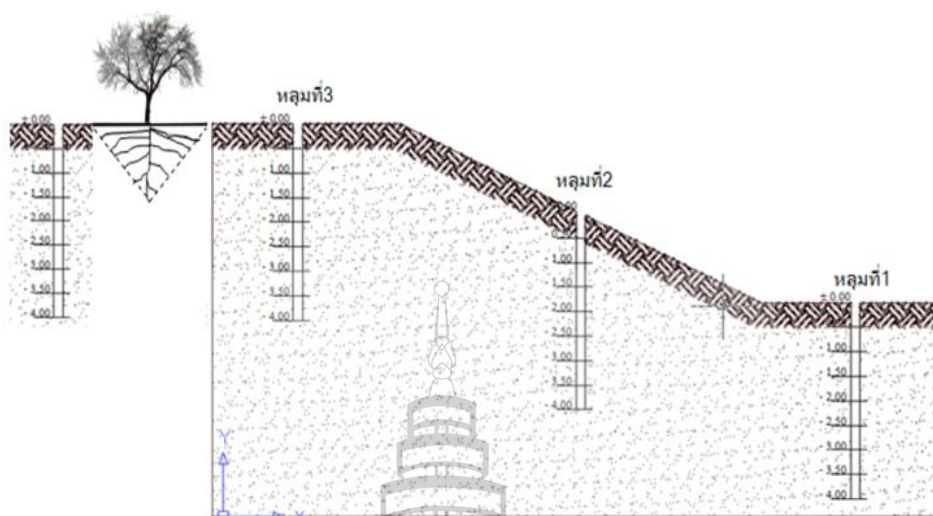
ภายใต้สภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นและขอบเขต ตามสมการที่ (2.32) หลังจากแก้สมการจะได้ตัวแปรที่อยู่ในรูปของค่าศักย์ของน้ำ (h) แล้วนำค่าดังกล่าวใช้เป็นค่าเริ่มในแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่คิดผลของการเสริมกำลังด้วยรากในแบบจำลองราก ณ ตำแหน่งและเวลาใด ๆ จากสมการริชาร์ดแบบเต็มรูปแบบ (full richard equations) คือ การนำทุกพจน์ในสมการของริชาร์ดใช้ในการคำนวณภายใต้ปริมาตรของปริมาณน้ำฝนที่ไหลในปริมาตรของมวลดิน

5.1.2 พื้นที่ศึกษา (Study Area)

ในการสร้างแบบจำลองจะอาศัยข้อมูลจากการเก็บค่าระดับเส้นชั้นความสูงในภาคสนาม บริเวณเนินลาดหลังอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย และพื้นที่ในจังหวัดเชียงราย ดังแสดงในภาพที่ 3.3 และ 3.4 เพื่อเป็นกรอบแนวทางการศึกษาและกำหนดค่ามุมลาดเอียงในการศึกษา () การเจาะสำรวจชั้นดินและเก็บตัวอย่างดินในภาคสนาม จำนวน 3 จุดต่อพื้นที่ลาดเอียงที่ศึกษา และบริเวณที่มีต้นไม้ จำนวน 1 จุด ในพื้นที่ศึกษาขนาด 70.0 x 130.0 เมตร โดยเก็บที่ระดับความลึกสูงสุด เท่ากับ 4.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ถึง 3.8 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ทดสอบหาสมบัติพื้นฐานและเฉพาะทางกายภาพของดิน (C, ϕ, γ)

5.1.3 ข้อมูลเชิงพื้นที่ของลาดดิน (Slope Geometry)

การสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อค่าวิเคราะห์เสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียงภายใต้การไหลปริมาณน้ำฝนผ่านมวลดินจำเป็นที่จะต้องข้อมูลเชิงพื้นที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงรายเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการคำนวณ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่ของบริเวณเชิงเขาอาภากรเรียนและปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา ข้อมูลที่ต้องการสำหรับมาสร้างแบบจำลองนี้ มีส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วนคือ ลักษณะทางกายภาพของลาดดิน(มุมลาดเอียง,) ได้กำหนดมุมลาดเอียงอยู่ระหว่างค่า 25 ถึง 45 องศา, สมบัติของมวลดินตามระดับความลึกที่ศึกษาซึ่งได้เก็บตัวอย่างสูงสุดเท่ากับ 4.00 เมตร (C, ϕ, γ), ลักษณะความลึกของน้ำฝนที่ซึมลงในมวลดิน และลักษณะการกระจายตัวและแรงดึงรากประสานมวลดินของรากต้นไม้ โดยกำหนดค่าปริมาณน้ำฝนอยู่ระหว่างค่า 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน ข้อมูลทั้ง 4 ส่วนนี้ได้ใช้โปรแกรม COMSOL สร้างแบบจำลองและคำนวณการไหลของน้ำผ่านมวลดิน ในรูปของค่าศักย์ของน้ำ (h_w) และนำค่า h_w นำกลับเข้าไปเป็นเริ่มต้นและนำข้อมูลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากในรูปแบบของค่า C_r ในแบบจำลองหลักสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อจะตัวชี้วัดค่าอัตราส่วนปลอดภัย ณ ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ หลังจากมีการเสริมกำลังด้วยราก เมื่อมีระดับศักย์ของน้ำเพิ่มขึ้นตามเวลาต่าง ๆ ในบริเวณนั้น ดังแสดงในภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 ภาพตัดตามขวางแสดงการเก็บตัวอย่างของมวลดินและรากต้นไม้ตามความลึกเพื่อ
พิจารณาค่าพารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน

5.1.4 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น (Boundary Condition and Initial Condition)

ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) จำเป็นจะต้องมีการระบุเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณ เนื่องจากการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทั้งระบบของปัญหา ทำให้เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้คำตอบที่ได้เปลี่ยนแปลงไปตาม

แบบจำลองที่ศึกษาต้องการเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไข คือ ส่วน ณ ตำแหน่งบริเวณขอบล่างและขอบริมซ้ายและขวากำหนดให้ไม่มีการไหลของน้ำในมวลดินและคงไว้ในระนาบรูปร่างของปัญหา และในส่วนบริเวณขอบบนของรูปร่างจะกำหนดให้มีการไหลของน้ำในมวลดิน เนื่องจากปริมาณน้ำฝน ซึ่งได้กำหนดปริมาณน้ำฝนในแบบจำลองมีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน

เงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลองนี้คือ อัตราการไหลของน้ำไหลลงมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง ณ ตำแหน่งบริเวณขอบบนของรูปร่างแบบสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าตัดของลาดเอียง ณ เวลาเริ่มต้นการคำนวณ ซึ่งค่าของเงื่อนไขเริ่มต้นนี้จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ เช่น เงื่อนไขขอบเขตเป็นค่าปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน เงื่อนไขเริ่มต้นก็ต้องเป็นอัตราการไหลของน้ำในมวลดินที่เท่ากันตามด้วย

5.2 การกำหนดตัวแปรเพื่อทดสอบแบบจำลอง

5.2.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น (Starting Parameter)

แบบจำลองได้พิจารณาเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบและค่ามาตรฐานที่ใช้ทั่วไปในการคำนวณหาซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์จำนวน 4 ส่วน คือ มุมลาดเอียง, สมบัติของมวลดิน, ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดิน, หน่วยแรงยึดเหนี่ยวของมวลดินที่เพิ่มขึ้นด้วยการเสริมราก และ ค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายวัน ซึ่งค่าทดสอบที่ใช้ในการเริ่มต้นการคำนวณได้มาจากการทดสอบในภาคสนามและการทดลองและกำหนดจากงานวิจัยต่าง ๆ และสุ่มค่าในช่วงของพารามิเตอร์ที่กำหนดแสดงไว้ดังในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ช่วงของค่าพารามิเตอร์และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นในแบบจำลอง

ลำดับที่	พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	จำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้น
1.	มุมลาดเอียง	25.00	45.00	3.00
2.	ค่าความเชื่อมแน่นของดิน	1.79	7.66	3.00
3.	ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน	18.66	25.19	3.00
4.	หน่วยแรงยึดเหนี่ยวของมวลดินที่เพิ่มขึ้นด้วยการเสริมราก	0.893	-	1.00
5.	ค่าความหนาแน่นของดิน	1.89	1.93	3.00
6.	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดิน	0.02	2.00	3.00
7.	ค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายวัน	100.00	300.00	3.00

5.3 การวิเคราะห์แบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง

การศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง ซึ่งได้จากการตอบสนองของพารามิเตอร์ (parameter sensitivity) ที่มีผลต่อการคำนวณของแบบจำลอง โดยพารามิเตอร์ทั้งหมด 7 พารามิเตอร์ โดยใช้ข้อมูลที่แสดงดังตารางที่ 5.1 ในการศึกษาจึงกำหนดกรอบแนวทางการศึกษาเพื่อนำไปใช้ในการอภิปรายผลการศึกษาแบบจำลอง ซึ่งสามารถจำแนกเป็นประเด็นทั้งหมด 4 ส่วน คือ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อแบบจำลอง ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำที่มีผลต่อแบบจำลอง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด(มุมลาดเอียง)ที่มีผลต่อแบบจำลอง โดยแสดงค่าต่างๆสำหรับใช้ในการอภิปรายผลการศึกษาแบบจำลองดังในตารางที่ 5.2-5.5

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อแบบจำลอง

ลำดับที่	ปริมาณน้ำฝน (mm/day)	มุมลาดเอียง (องศา)	ส.ป.ส ความชื้นได้ ของน้ำผ่าน มวลดิน	ค่าสมบัติของมวลดินและ รากประสานดิน (c, ϕ, γ, C_R)
1.	100.00	35.00	0.20	7.66,25.19,1.89,0.893
2.	200.00	35.00	0.20	7.66,25.19,1.89,0.893
3.	300.00	35.00	0.20	7.66,25.19,1.89,0.893

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง

ลำดับที่	ปริมาณน้ำฝน (mm/day)	มุมลาดเอียง (องศา)	ส.ป.ส ความชื้นได้ ของน้ำผ่าน มวลดิน	ค่าสมบัติของมวลดินและ รากประสานดิน (c, ϕ, γ, C_R)
1.	100.00	35.00	0.20	1.79,18.66,1.92,0.893
2.	100.00	35.00	0.20	2.76,19.74,1.93,0.893
3.	100.00	35.00	0.20	7.66,25.19,1.89,0.893

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำที่มีผลต่อแบบจำลอง

ลำดับที่	ปริมาณน้ำฝน (mm/day)	มุมลาดเอียง (องศา)	ส.ป.ส ความชื้นได้ ของน้ำผ่าน มวลดิน	ค่าสมบัติของมวลดินและ รากประสานดิน (c, ϕ, γ, C_R)
1.	100.00	35.00	0.02	7.66,25.19,1.89,0.893
2.	100.00	35.00	0.20	7.66,25.19,1.89,0.893
3.	100.00	35.00	2.00	7.66,25.19,1.89,0.893

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการอภิปรายผลในการศึกษาแบบจำลอง โดย
ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) ที่มีผลต่อแบบจำลอง

ลำดับที่	ปริมาณน้ำฝน (mm/day)	มุมลาดเอียง (องศา)	ส.ป.ส ความซึมได้ ของน้ำผ่าน มวลดิน	ค่าสมบัติของมวลดินและ รากประสานดิน (c, ϕ, γ, C_R)
1.	100.00	25.00	0.20	7.66, 25.19, 1.89, 0.893
2.	100.00	35.00	0.20	7.66, 25.19, 1.89, 0.893
3.	100.00	45.00	0.20	7.66, 25.19, 1.89, 0.893

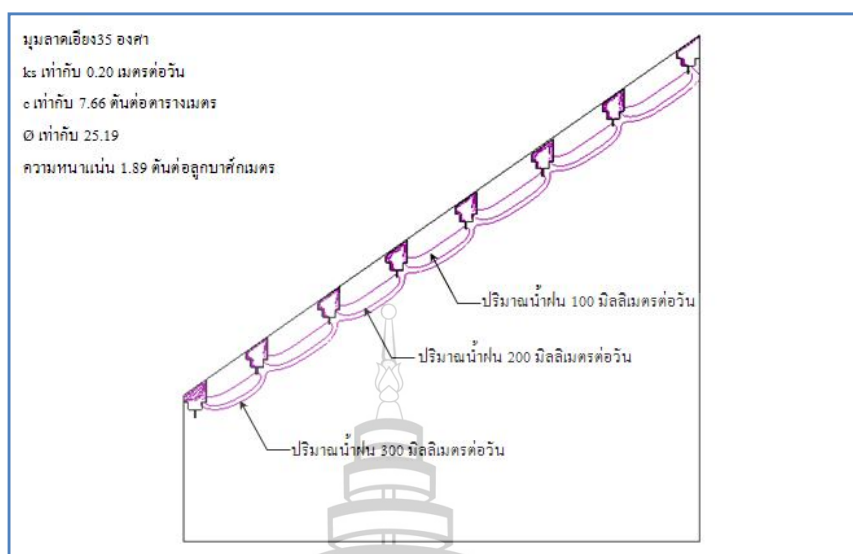
จากตารางที่ 5.2-5.5 จะนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงใช้เป็นเริ่มต้นสำหรับ การอภิปราย
ผลในการศึกษาแบบจำลองในหัวข้อ

5.4 อภิปรายผลการศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อกา วิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง

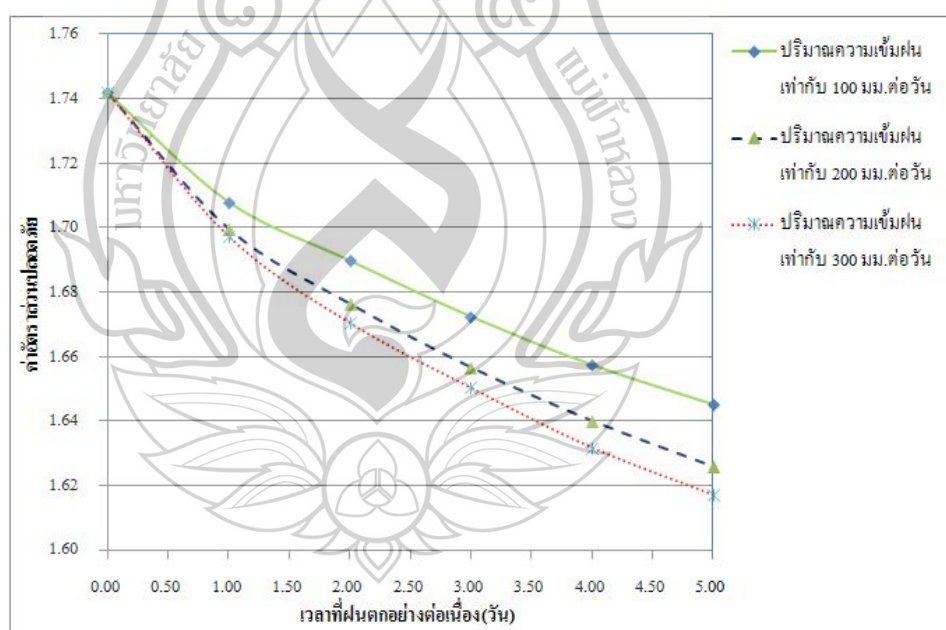
การศึกษาสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อแบบจำลองการวิเคราะห์
เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน สามารถแบ่งการอภิปรายออกเป็น 4 ส่วน คือ
การศึกษาการเปลี่ยนแปลง ความเข้มของปริมาณน้ำฝนที่ตกตลอดอย่างต่อเนื่อง ศึกษาการ
เปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติทางกายภาพของมวลดิน ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึม
ได้ของน้ำผ่านมวลดิน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) ที่มีผลต่อ
แบบจำลอง สามารถอภิปรายผลการศึกษาดังรายละเอียดในหัวข้อย่อยต่อไป

5.4.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อแบบจำลอง

เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้
ในการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน สามารถอภิปรายผลการศึกษาดังแสดง
ในภาพที่ 5.2 ถึง 5.3



ภาพที่ 5.2 ระดับความลึกของปริมาณน้ำที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองในแต่ละพารามิเตอร์ของปริมาณน้ำฝนระหว่าง 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน



ภาพที่ 5.3 ค่าอัตราส่วนพลอดภัยที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการเสริมกำลังด้วยรากค้ำไม้ตามระดับความลึกของปริมาณน้ำฝนที่ศึกษาในแบบจำลองที่มีค่าอยู่ระหว่าง 100-300 มิลลิเมตรต่อวัน

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นปริมาณน้ำฝนที่อยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน ภายใต้พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้น ดังตารางที่ 5.2 เมื่อปริมาณน้ำฝนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 100 มิลลิเมตรต่อวัน เป็น 300 มิลลิเมตรต่อวัน ณ ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ หลังจากแบบจำลองมีการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ ค่าอัตราส่วนปลดปล่อยจะมีค่าลดลง ทุก ๆ ช่วงเวลาที่ศึกษาและเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการเสริมกำลังด้วยต้นไม้ พบว่า ค่าอัตราส่วนปลดปล่อยจะมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับทุก ๆ ช่วงเวลาที่ศึกษาและความเข้มข้นของปริมาณน้ำฝนเดียวกัน อีกทั้งมีผลทำให้ลักษณะของการพังทลายเพิ่มขึ้นตามสภาพเชิงลาดที่สูงขึ้นและลักษณะสมบัติทางกายภาพที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ

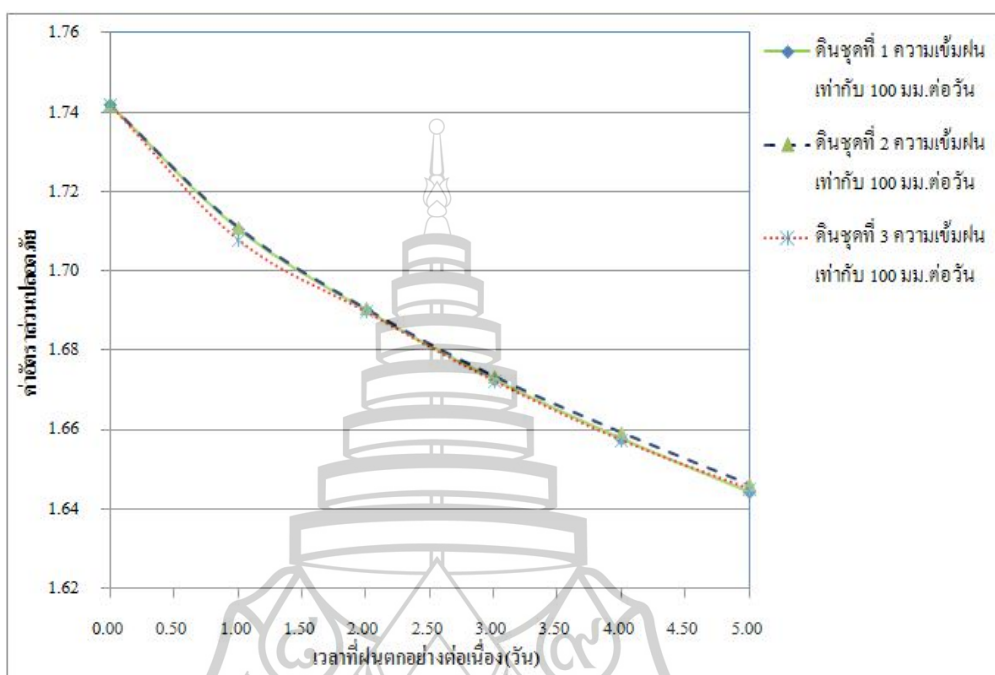
5.4.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง

การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของมวลดินที่แตกต่างกันที่มีผลต่อแบบจำลอง การเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน โดยวิธีลาดอนันต์ สามารถอภิปรายผลการศึกษาดังแสดงในภาพ 5.4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าสมบัติทางกายภาพของมวลดินที่แตกต่างกัน ในส่วนของค่าความเชื่อมั่น มุมเสียดทานภายในและค่าความหนาแน่นของดิน ดังตารางที่ 5.3 พบว่า เมื่อลักษณะสมบัติทางกายภาพของมวลดินมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อความลึกของน้ำฝนที่ตกซึมอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ค่าอัตราส่วนปลดปล่อยมีค่าลดลงในทิศทางเดียวกันตาม ณ ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการเสริมกำลังด้วยต้นไม้ พบว่า ค่าอัตราส่วนปลดปล่อยจะมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับทุก ๆ ช่วงเวลาที่ศึกษาและความเข้มข้นของปริมาณน้ำฝนเดียวกัน

5.4.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินที่มีผลต่อแบบจำลอง

การศึกษาลักษณะค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำที่มีผลต่อแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำผ่านมวลดิน สามารถอภิปรายผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 5.5 และ 5.6 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 5.4 พบว่าในช่วงฝนตกอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงแรก ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินสำหรับทุก ๆ ค่าที่ศึกษาจะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลดปล่อยมีค่าลดลงในทิศทางเดียวกัน และเมื่อฝนตกอย่างต่อเนื่องภายหลัง 24 ชั่วโมง จนทำให้มวลดินเกิดสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินที่มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลดปล่อยมีค่าลดลงอย่างฉับพลัน ณ ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการเสริมกำลังด้วยต้นไม้ พบว่า ค่า

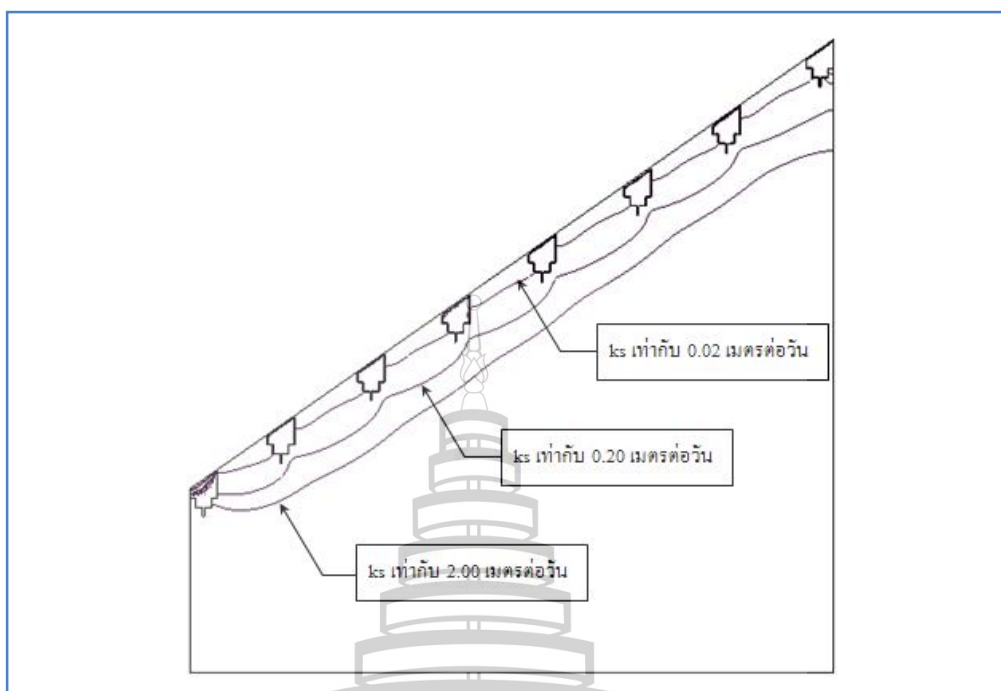
อัตราส่วนปลอดภัยจะมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับทุกๆ ช่วงเวลาที่ศึกษาและความเข้มของปริมาณน้ำฝนเดียวกัน



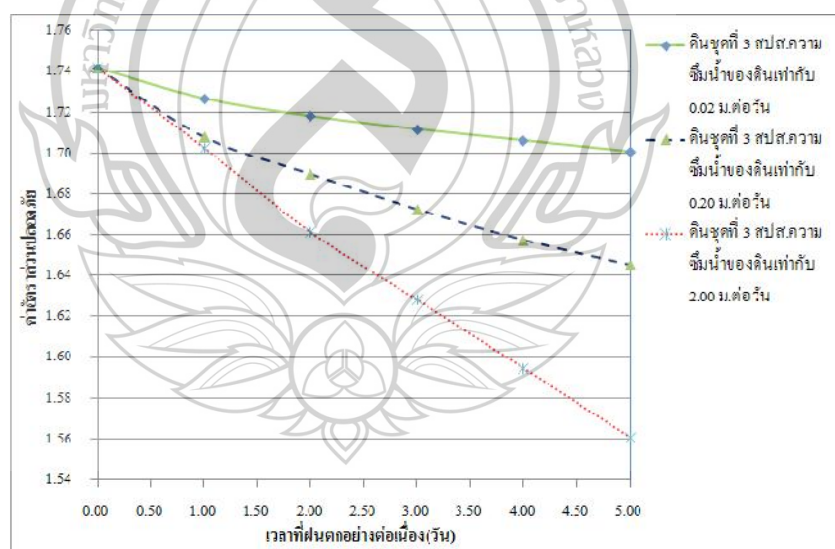
ภาพที่ 5.4 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแบบจำลองที่ศึกษาลักษณะสมบัติของมวลดินที่แตกต่างกัน ภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝน เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน

5.4.4 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาดที่มีผลต่อแบบจำลอง

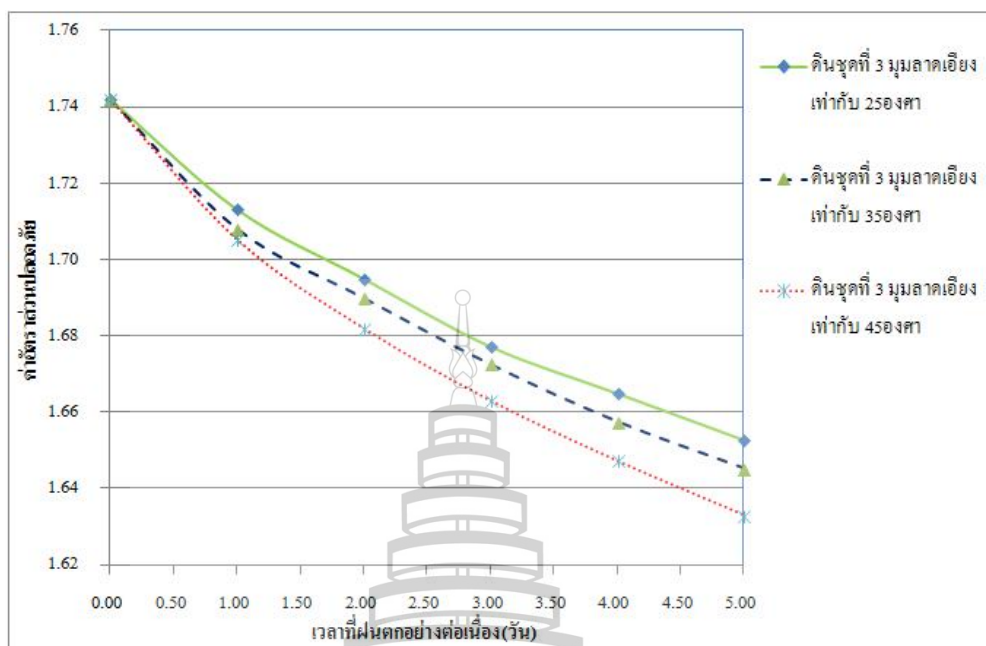
การศึกษาลักษณะสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) ที่มีผลต่อแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน สามารถอธิบายการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 5.6 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่ามุมลาดเอียงที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 5.5 พบว่าเมื่อลักษณะสภาพเชิงลาดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้ระดับความลึกของน้ำฝนที่ซึมลงดินมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำส่งผลทำให้สภาพดินอิ่มตัวหลังจากฝนตกอย่างต่อเนื่อง จนทำให้น้ำหนักที่กดทับของมวลดินบนลาดเอียงเพิ่มขึ้นและมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าลดลงในทิศทางเดียวกันตามเวลาที่ฝนตกต่างๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการเสริมกำลังด้วยต้นไม้ พบว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจะมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับทุก ๆ ช่วงเวลาและค่าที่ศึกษา และแปรผันตามความเข้มของปริมาณน้ำฝน อีกทั้งมีผลทำให้ลักษณะของการพังทลายเพิ่มขึ้นตามลาดชันที่สูงขึ้น



ภาพที่ 5.5 ค่าระดับความลึกของน้ำฝนตกอย่างเนื่องเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน ของค่าประสิทธิ-
 ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินที่แตกต่างกันของแบบจำลอง



ภาพที่ 5.6 ค่าอัตราส่วนตลอดภัยของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินที่แตกต่างกัน
 ของแบบจำลองที่ศึกษาภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝน เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน



ภาพที่ 5.7 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของสภาพของเชิงลาดที่ต่างแตกต่างกันของแบบจำลองที่ศึกษาภายใต้ค่าพารามิเตอร์ปริมาณน้ำฝน เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน

5.5 อภิปรายผลการศึกษา

การสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำผ่านมวลดินโดยวิธีลาดอนันต์และแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีฝนตกอย่างต่อเนื่อง เพื่อ การศึกษาหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยโดยพิจารณาผลของลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน, สมบัติทางกายภาพของมวลดิน, การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินและการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) รวมถึงผลของการเสริมกำลังด้วยรากประสานมวลดินและลักษณะการกระจายตัวของรากต้นไม้ที่มีผลต่อแบบจำลองที่ศึกษา โดยอาศัยพิจารณาค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขตของปัญหาจากผลจากการไหลซึมของปริมาณน้ำฝนที่ ผ่านตามเวลาที่เกิดขึ้น และลักษณะรูปร่างการพังทลายเพียงครั้งเดียวหลังจากการวิเคราะห์แบบจำลองเท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยวิธีการดังกล่าวเป็นไป นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ในสภาพความเป็นจริงตามธรรมชาติแล้วนั้น ลักษณะการพังทลายจะมีความสัมพันธ์ควบคู่กันทั้ง 4 ลักษณะเปลี่ยนแปลง คือ ปริมาณน้ำฝน, สมบัติของมวลดิน, การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความ

ซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินและการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) อีกทั้งลักษณะการพังทลายที่เวลาเริ่มต้นจะส่งผลต่อการเกิดการพังทลายสุดท้าย หากมีการนำเอาผลลัพธ์ของการเสริมกำลังด้วยรากประสานมวลดินและลักษณะการกระจายตัวของรากต้นไม้และระยะห่างของการปลูกต้นไม้ให้มากกว่าค่าที่ศึกษาและนำกลับมาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยในแบบจำลองที่ศึกษาอีกครั้งจะทำให้สามารถเปรียบเทียบผลที่ได้และกำหนดระยะการปลูกที่เหมาะสมกับสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) และชนิด, ประเภทของต้นไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมถึงการจัดการด้านเตือนภัยพิบัติได้อย่างเหมาะสมกับพื้นที่ที่ศึกษา



บทที่ 6

สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

ในบทนี้จะได้กล่าวบทสรุปผลการศึกษาของแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนที่สำคัญ ก็คือ การสรุปผลการศึกษาแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน บนพื้นที่ลาดเอียงและการสรุปผลศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง

6.1 สรุปผลการศึกษาแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง

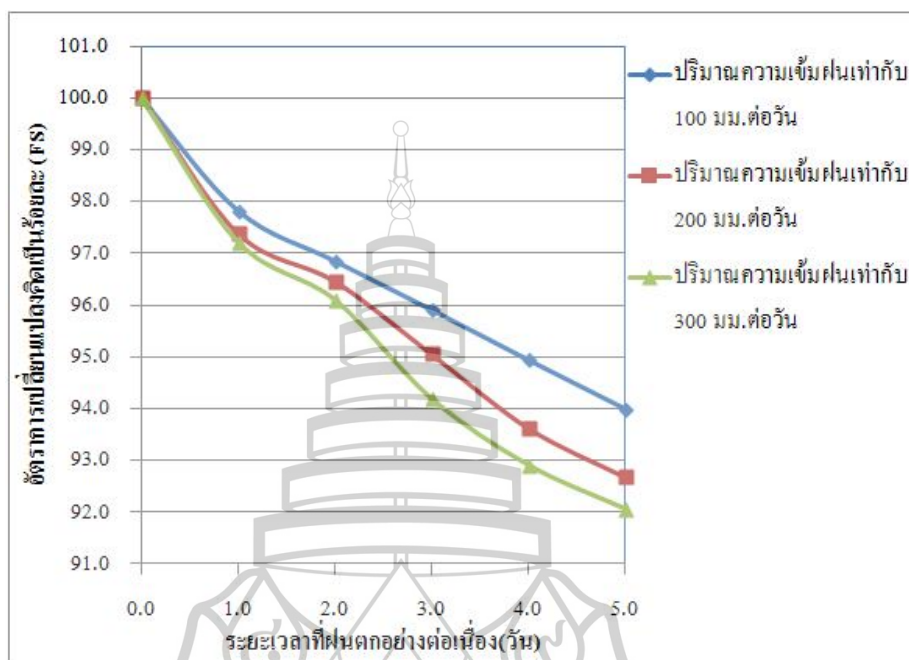
6.1.1 กรณีที่ 1 ผลของแบบจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปของปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย

พบว่าเมื่อพิจารณาศึกษาค่ามุมลาด เท่ากับ 35 องศา, ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดิน เท่ากับ 0.20 เมตรต่อวันและค่าสมบัติทางกายภาพของมวลดินชนิดเดียวกันโดยให้ฝนตกอย่างต่อเนื่อง 5 วันและความชื้นปริมาณน้ำฝนที่ตกซึมผิวดินบนลาดเอียงมีค่าเพิ่มขึ้นจากขนาด 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน จะส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลง ณ ตำแหน่งเดียวกันและเวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 6.1 โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลงคิดเป็นร้อยละ 92.10 เมื่อความชื้นปริมาณน้ำฝนมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 300 มิลลิเมตรต่อวันและฝนตกอย่างต่อเนื่อง 5 วัน

6.1.2 กรณีที่ 2 ผลของแบบจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปค่าสมบัติทางกายภาพของมวลดินที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย

พบว่าเมื่อพิจารณาศึกษาค่ามุมลาด เท่ากับ 35 องศา, ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดิน เท่ากับ 0.20 เมตรต่อวัน และให้ฝนตกอย่างต่อเนื่อง 5 วันโดยมีความชื้นปริมาณน้ำฝนที่ตกซึมผิวดินบนลาดเอียงมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน เมื่อค่ากำลังรับแรงของมวลดินมีค่าเพิ่มขึ้น

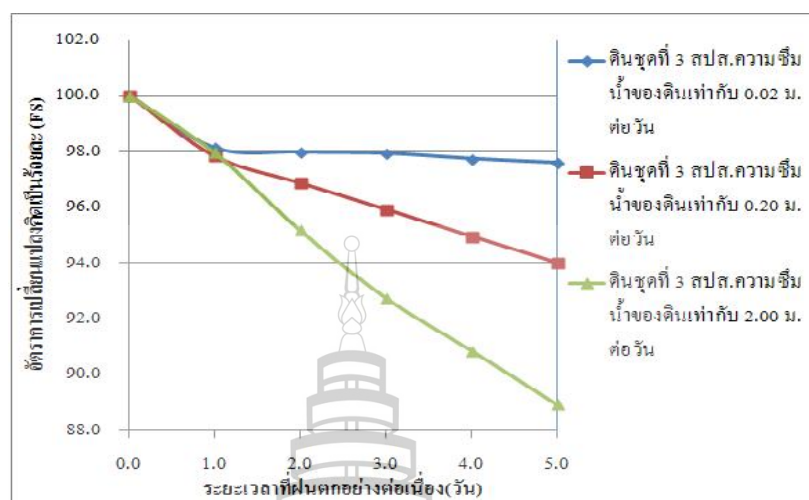
จะส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลง ณ ตำแหน่งเดียวกันและเวลาต่าง ๆ โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลงคิดเป็นร้อยละ 94.0



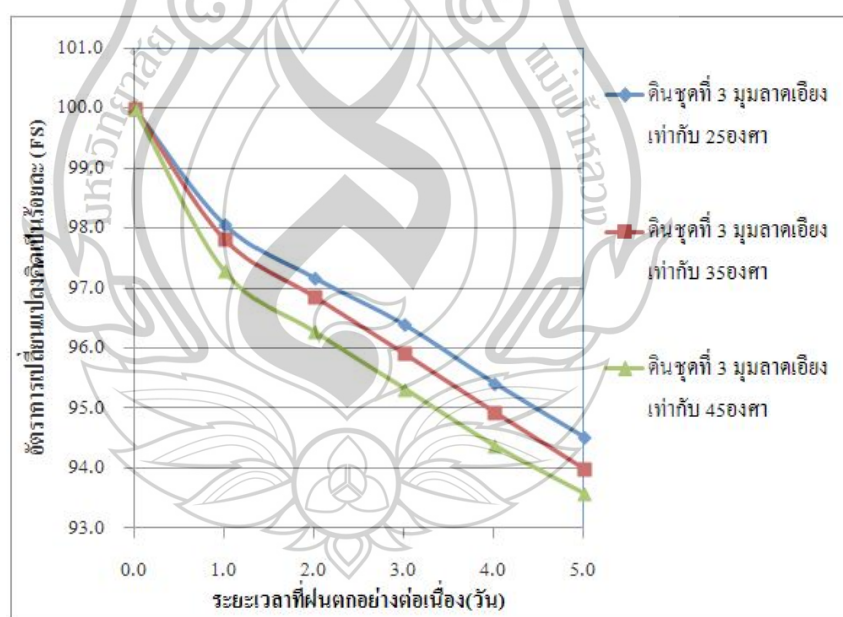
ภาพที่ 6.1 ผลของแบบจำลองก่อนการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ขึ้นอยู่กับความชื้นของปริมาณน้ำฝน

6.1.3 กรณีที่ 3 ผลของแบบจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปของค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้น้ำผ่านมวลดินที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย

พบว่าเมื่อมวลดินมีสภาพความชื้นได้น้ำที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยค่าลดลง ณ ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 6.2 โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลงคิดเป็นร้อยละ 88.90



ภาพที่ 6.2 ผลของแบบจำลองก่อนการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลดปล่อยที่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดิน



ภาพที่ 6.3 ผลของแบบจำลองก่อนการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลดปล่อยที่ขึ้นอยู่กับสภาพเชิงลาด

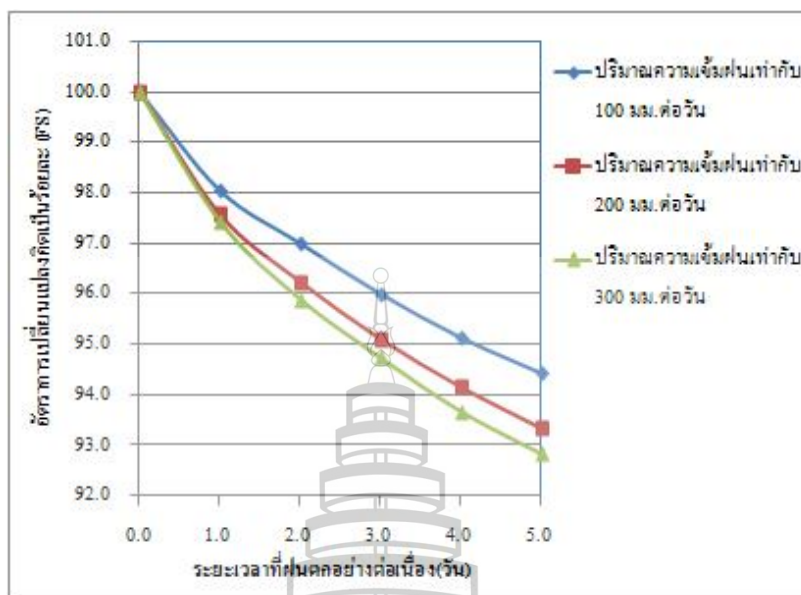
6.1.4 กรณีที่ 4 ผลของแบบจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปของสภาพเชิงลาดที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย

พบว่าเมื่อค่ามุมลาดเอียงมีค่าสูงเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลงตาม ตำแหน่งและเวลาเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 6.3 โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วน ปลอดภัยลดลงคิดเป็นร้อยละ 93.60 ที่มุมลาดเอียง 45 องศา เมื่อฝนตกอย่างต่อเนื่อง 5 วัน

6.2 สรุปผลการศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากค้ำไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์ เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง

6.2.1 กรณีที่ 1 ผลของแบบจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปของปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย

พบว่าเมื่อพิจารณาศึกษาค่ามุมลาดเท่ากับ 35 องศา, ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่าน มวลดิน เท่ากับ 0.20 เมตรต่อวันและค่าสมบัติทางกายภาพของมวลดินชนิดเดียวกันโดยให้ฝนตกอย่าง ต่อเนื่อง 5 วันและความเข้มปริมาณน้ำฝนที่ตกซึมผิวดินบนลาดเอียงมีค่าเพิ่มขึ้นจากขนาด 100 ถึง 300 มิลลิเมตรต่อวัน จะส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลง ณ ตำแหน่งเดียวกันและเวลาต่าง ๆ ดัง แสดงในภาพที่ 6.4 โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลงคิดเป็นร้อยละ 92.80 เมื่อความเข้มปริมาณน้ำฝนมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 300 มิลลิเมตรต่อวันและฝนตกอย่างต่อเนื่อง 5 วัน



ภาพที่ 6.4 ผลของแบบจำลองหลังการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ขึ้นอยู่กับความเข้มของปริมาณน้ำฝน

6.2.2 กรณีที่ 2 ผลของแบบจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปค่าสมบัติทางกายภาพของมวลดินที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย

พบว่าเมื่อพิจารณาศึกษาค่ามุมลาด เท่ากับ 35 องศา, ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดิน เท่ากับ 0.20 เมตรต่อวัน และให้ฝนตกอย่างต่อเนื่อง 5 วัน โดยมีความเข้มปริมาณน้ำฝนที่ตกซึมผิวดินบนลาดเอียงมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน เมื่อค่ากำลังรับแรงของมวลดินมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลง ณ ตำแหน่งเดียวกันและเวลาต่าง ๆ โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลงคิดเป็นร้อยละ 94.4

6.2.3 กรณีที่ 3 ผลของแบบจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปของค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย

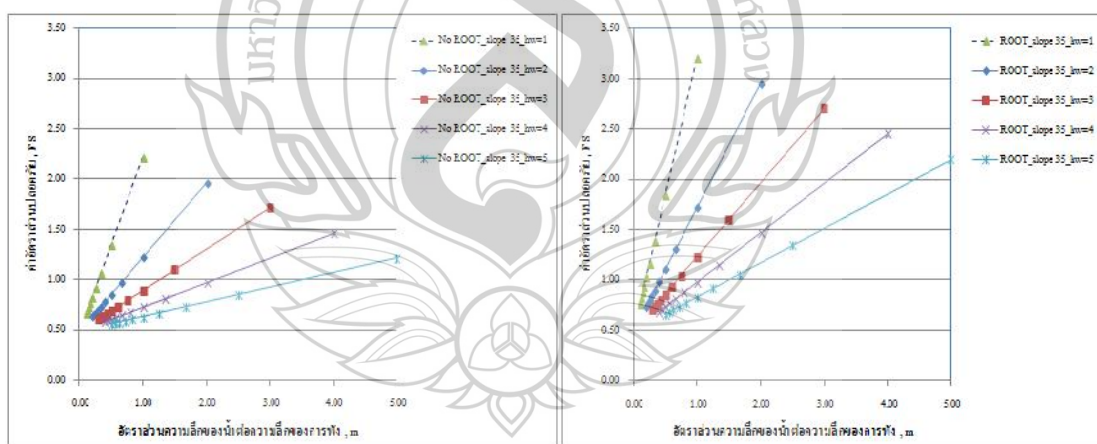
พบว่าเมื่อมวลดินมีสภาพความชื้นได้ของน้ำที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยค่าลดลง ณ ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 6.2 โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลงคิดเป็นร้อยละ 89.60

6.2.4 กรณีที่ 4 ผลของแบบจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปของสภาพเชิงลาดที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย

พบว่าเมื่อค่ามุมลาดเอียงมีค่าสูงเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลงตาม ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลงคิดเป็นร้อยละ 93.70 ที่มุมลาดเอียง 45 องศา เมื่อฝนตกอย่างต่อเนื่อง 5 วัน

6.3 สรุปผลการเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำผ่านมวลดินบนพื้นที่ลาดเอียง

เมื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองที่ศึกษาปริมาณความชื้นฝนที่ตกซึมลงพื้นดินขนาด 100 มิลลิเมตรต่อวัน ภายใต้สภาพเชิงลาดเท่ากับ 35 องศา และค่าสมบัติทางกายภาพของมวลดินที่เหมือนกันเพื่อศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความลึกของน้ำฝนที่ซึมลงต่อความลึกของการพังที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย สำหรับก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ พบว่า เมื่อหลังการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ทำให้ปรับปรุงค่าอัตราส่วนปลอดภัยสูงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 6.5



ภาพที่ 6.5 ผลของแบบจำลองก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความลึกของน้ำฝนต่อความลึกของการพัง

ที่สำคัญการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้จำเพาะเจาะจงสำหรับพื้นที่ในจังหวัดเชียงรายเพียงแห่งเดียวเท่านั้น แต่ยังสามารถนำการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่อื่น ๆ ได้อีกด้วย เพียงมีข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลอง นั่นก็คือ ข้อมูลปริมาณน้ำฝน, สมบัติของมวลดิน, การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินและข้อมูลค่าระดับสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) และข้อมูลของรากต้นไม้ที่ได้จากการตรวจวัดและทดสอบ เพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเท่านั้น ก็จะสามารสร้างแบบจำลองขอ พื้นที่อื่น ๆ เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาหินพังทลายจากการเกิดฝนตกของพื้นที่ในบริเวณนั้น ๆ ได้ต่อไป

6.4 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากการสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้โดยพิจารณาผลของลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน, สมบัติของมวลดิน, การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินและการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด(มุมลาดเอียง) รวมถึงผลของการเสริมกำลังด้วยรากประสานมวลดินและลักษณะการกระจายตัวของรากต้นไม้ที่มีผลต่อแบบจำลองที่ศึกษา ซึ่งอาศัยพิจารณาค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขตของปัญหาจากผลจากการไหลซึมของปริมาณน้ำฝน ที่แปรเปลี่ยนตามเวลาที่เกิดขึ้น และลักษณะรูปร่างการพังทลายเพียงครั้งเดียว หลังจากการวิเคราะห์แบบจำลองเท่านั้น แต่ในสภาพความเป็นจริงตามธรรมชาติแล้วนั้น ลักษณะการพังทลายจะมีความสัมพันธ์ควบคู่กันทั้ง 4 ลักษณะของปัจจัยที่ศึกษา คือ ปริมาณน้ำฝน, สมบัติของมวลดิน, การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดินและการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) อีกทั้งลักษณะการพังทลาย ณ เวลาเริ่มต้นจะส่งผลต่อการเกิดการพังทลายสุดท้าย หากมีการนำเอาผลลัพธ์ของการเสริมกำลังด้วยรากประสานมวลดินและลักษณะการกระจายตัวของรากต้นไม้และระยะห่างของการปลูกต้นไม้ให้มากกว่าค่าที่ศึกษาและนำกลับมาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยในแบบจำลองที่ศึกษาอีกครั้งจะทำให้สามารถเปรียบเทียบผลที่ได้และกำหนดระยะการปลูกที่เหมาะสมกับสภาพของเชิงลาด (มุมลาดเอียง) และชนิด, ประเภทของต้นไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ในส่วนของวิธีการทดสอบแรงดึงของรากประสาน การเก็บตัวอย่าง แหล่งที่มาของข้อมูล และการเตรียมข้อมูลตัวอย่างที่เหมาะสม ควรเลือกช่วงเวลาฤดูฝนตก จะทำให้ผลการศึกษแบบจำลองมีค่าที่ถูกต้องเพิ่มขึ้น อีกทั้งอาจเป็นผลมาจากไม่ได้พิจารณำปริมาณการไหลของน้ำที่ผิวดินบนลาดเอียงมาคิดร่วมด้วย จะทำให้ความสามารถในการทำนายหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยในแบบจำลองได้ถูกต้องเพิ่มมากขึ้นได้



รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

- กรมชลประทาน. (2544). รายงานทางอุทกวิทยา อุทกภัย อำเภอวังชิ้น จังหวัดแพร่.
ส่วนอุทกวิทยา สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ.แพร่: กรมชลประทาน.
- กรมทางหลวง. (2543). เอกสารรูป เรือ่น้ำท่วม อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา.
กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง
- กรมทรัพยากรธรณี. (2531). การพังทลายของดินจากน้ำท่วมภาคใต้ ปี 2531. กรุงเทพฯ:
กองการเหมืองแร่.
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2544). นิยามศัพท์อุตุนิยมวิทยา. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์กรมอุตุนิยมวิทยา.
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2540). สถิติอุทกภัยในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กองภูมิศาสตร์.
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2532). นิยามศัพท์อุตุนิยมวิทยา. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์กรมอุตุนิยมวิทยา.
- เกษม จันทร่แก้ว. (2539). หลักการจัดการลุ่มน้ำ. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์.
นครปฐม:มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ขนิษฐา เขาวนิษฐ์. (2541). การกำหนดขอบเขตพื้นที่เสี่ยงอุทกภัย บริเวณลุ่มน้ำมูล-ชี
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการลุ่มน้ำ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ชนิดดินถล่ม. (2009). สืบค้นเมื่อ 11 ตุลาคม 2552, จาก http://geothai.net/2009/index.php?option=com/_content&view=article&id=78:-landslide&catid=40:geohazards&Itemid=100008
- ชัยชัย ตันตสิรินทร์. (2543). การศึกษาการประเมินค่า Topographic Index เพื่อเป็นแนวทางในการ
นำไปประยุกต์ใช้จำลองแบบทางอุทกวิทยาแบบกระจายพื้นที่. ใน เอกสารประกอบการ
สัมมนาของนิสิตปริญญาโทและเอก คณะวนศาสตร์ ภาคต้น ปีการศึกษา 2543 [อัดสำเนา].
คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- ชิตชัย อนันตเศรษฐ์. (2551). **ปัญหาดินถล่มในจังหวัดเชียงใหม่และภาคเหนือตอนบน**
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
สืบค้นเมื่อ 12 สิงหาคม 2552, จาก <http://cendru.eng.cmu.ac.th/web/4-2.htm>
- ชินะวัฒน์ มุกตะพันธ์. (2548). **ปฐพีกลศาสตร์** (พิมพ์ครั้งที่ 1). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ชูเลิศ จิตเจือจุน. (2543). **การศึกษาเปรียบเทียบโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน.**
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ทวีสิทธิ์ คำรักษ์. (2543). **การพยากรณ์และเตือนภัยน้ำท่วมทางด้านอุทกนิยมิวิทยา. ใน เอกสาร**
ประกอบการประชุมวิชาการ การพยากรณ์และเตือนภัยน้ำท่วม (เล่มที่ 1). กรุงเทพฯ:
ชมรมนักอุทกวิทยา
- นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์. (2546). **คุณสมบัติของดินไม่อิ่มตัวเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด**
ดิน: กรณีศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำก้อ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นิกร ดวงดำ และอธิปเทพ ไชยนา. (2544). **ผลของรากหญ้าแฝกที่มีต่อความสามารถรับแรง**
ต้านทานของลาดดิน. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิพนธ์ ตั้งธรรม. (2527). **การควบคุมการชะล้างพังทลายของดิน.** ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา
คณะวนศาสตร์, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บริษัท พัทธ์ จำกัด, บริษัท เซเวน แอสโซซิเอต คอนซัลแตนท์ จำกัด และบริษัท เนชั่นแนล เอ็นยี
เนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด. (2540). **งานออกแบบผังแม่บท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**
วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร รายงานผลการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลทาง
ปฐพีวิทยา. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ, สกลนคร.
- ปริญญญา ศรีสมบุญ. (2549). **การทำนายการทรุดตัวและ ประเมินกำลังรับแรงของฐานรากดิน**
กรณีศึกษา อาคารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัด สกลนคร. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ, สกลนคร.

พรชัย ปรีชาปัญญา. (2527). การสูญเสียดินและน้ำจากการประยุต์ระบบวนเกษตร: การศึกษาเฉพาะกรณีการทำสวนกาแฟในป่าดิบเขาที่ดอยปู่ เชียงใหม่.

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พรพจน์ ต้นแสง, ฉัตรชัย โชติขยางกูร เขาวน หิรัญติยกุล และอภิชาติ คำภาหล้า. (2549).

การวัดของกันดินอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ในชั้นดินเหนียวกระจายตัวแทรกด้วยชั้นดิน

เหนียววมตัว. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ประจำปี 2549

ครั้งที่ 11 ณ โรงแรมเมอร์ลินรีสอร์ท ภูเก็ต

พิณทิพย์ ธิติโรจนะวัฒน์. (2536) การศึกษาเปรียบเทียบการสูญเสียดินระหว่างสมการการสูญเสีย.

ดินสากล (USLE) กับแปลงทดลองในพื้นที่ลุ่มน้ำน่าน. สาขาวิชาเทคโนโลยีการบริหาร

สิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยมหิดล.

มณเฑียร กังคศิเทียม. (2539). กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ :

สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์.

รูปแบบการพังทลายของดิน. (2552). สืบค้นเมื่อ 11 ตุลาคม 2552, จาก [http://www.gsi.ie/NR/](http://www.gsi.ie/NR/rdonlyres/7537BF7E-E533-4686-8468-4CD287B14A98/0/Landslides_in_Ireland.pdf)

rdonlyres/7537BF7E-E533-4686-8468-4CD287B14A98/0/Landslides_in_Ireland.pdf

ลักษณะป่าเบญจพรรณ. (2551). สืบค้นเมื่อ 11 มกราคม 2551, จาก [http://www.tropicalforest.](http://www.tropicalforest.or.th/p51.htm)

or.th/p51.htm

วรากร ไม่เรียง และชูเลิศ จิตเจื้อจุน. (2544). การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน

สำหรับประเทศไทย, การสัมมนาวิศวกรรมการทาง ครั้งที่ 1 (หน้า 269-287), กรุงเทพฯ:

กรมทางหลวง.

วรากร ไม่เรียง. (2546). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการการพัฒนาแผนหลักการจัดการภัย

ธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินถล่ม. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(สกว.).

วัฒนา จารวัฒน์ และพรหมพันธ์ พรหมนิมิต. (2547). คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่เสริมโดย

ระบบรากพืชแบบผสมผสานรูปแบบสี่เหลี่ยม สำหรับงานป้องกันลาดดิน กรณีสึกษา

รากกระถินเทพาและหญ้าแฝก. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิโรจน์ ขอมิน สกุล ไม่สะพราว และสุรศักดิ์ เศรษฐีสมบัติ. (2545) ผลของรากต้นกระถินเทพา ต่อความสามารถในการรับแรงดึงในสนาม กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ศูนย์วิจัยป่าไม้ และสำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม. (2537). การศึกษาเพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการเกิดอุทกภัยและภัยธรรมชาติในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคใต้. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2546) ข้อเสนองานวิจัยโครงการพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินถมที่เกิดจากฝนตกหนัก กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).

หน้าที่และชนิดของราก. (2552). กรุงเทพฯ: ศูนย์เผยแพร่ความรู้ทางการเกษตร. สืบค้นเมื่อ 11 ตุลาคม 2552, จาก <http://www.promma.ac.th/main/biology/web5/p1.htm>.

อภินิติ โชติสังกัส และวิญญูพงศ์ พอลิละ. (2551) การพัฒนาระบบตรวจวัดพฤติกรรมดินถม. ใน การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน. ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อภินิติ โชติสังกัส และอัครพัฒน์ สว่างสุริย์. (2551). การประยุกต์ใช้ความรู้ทางกลศาสตร์ของดินไม่อ่อนนุ่มสำหรับงานเสถียรภาพของลาดดินถม. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13. 14-16 พฤษภาคม 2551 ณ โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา. ชลบุรี: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์และภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

อุดมวิทย์ วิเศษสังข์, วราภรณ์ ธาราเสาวรักษ์, อนุก ก้นสัย, ปิยะวัฒน์ ราชพิลา และกองรัฐ นกแก้ว. (2549). การศึกษาอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่มีผลต่อกำลังรับแรงของฐานรากดินที่วางอยู่บนดินเหนียวแข็งสกลนคร กรณีศึกษา อาคารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ, สกลนคร.

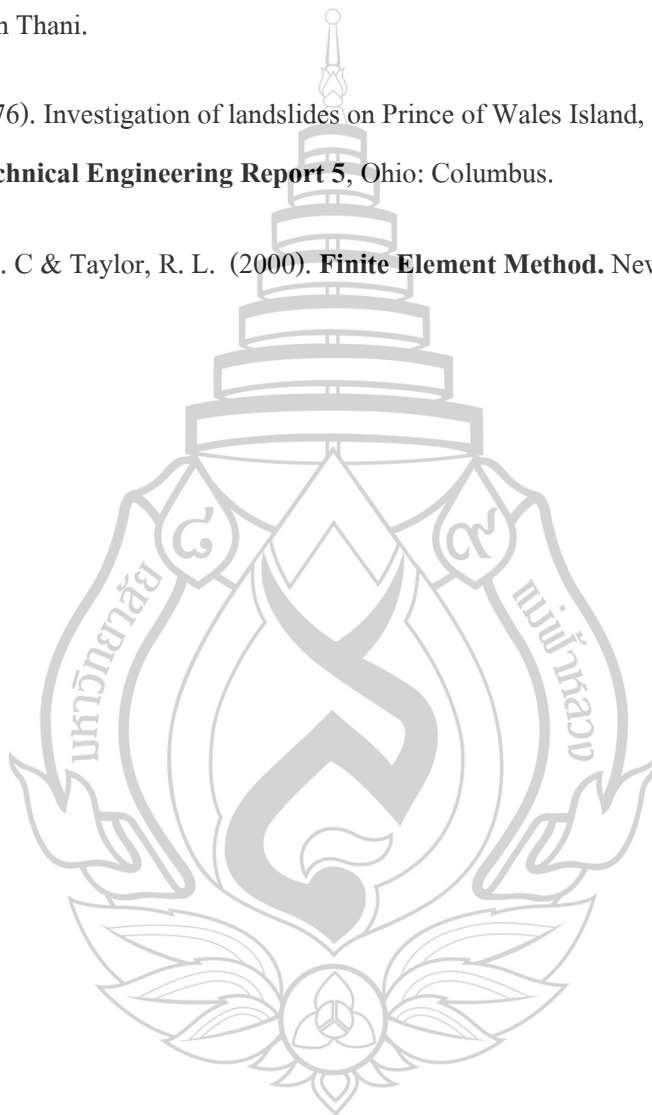
- A. Ern, J. L. (2004). **Theory and practice of finite elements**. France: springer.
- Bear, J. (1972). **Dynamics of fluids in porous media**. New Youk: Dover Publications
- Brenner, S. & Scott, R. L. (2005). **The Mathematical Theory of Finite Element Methods**. (2nd ed.). London: Springer.
- Coppin, N..J. & Richards, I.G. (1990). **Use vegetation in civil engineering**, Singapore: Butterworths.
- Caldwell, M. M. & Virginia, R. A. (1989). **Plant Physiological Ecology**. London: springer.
- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993) **Field Methods and Instrumentation. Chapman and Hall. Soil Mechanics of Unsaturated**, (pp. 367-398). New Jersey: John Weiley & Sons.
- Gardner, F.P., Pearce B. R. & Mitchell, R. L. (1985). **Physiology of Crop Plants**. Iowa: U.S.A. University Press.
- Gray, D.H. & Sotir, R.B. (1996). **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization**. Singapore: John Wiley & Sons.
- Lu, N., & Likos, W. J. (2004). **Unsaturated soil mechanics**. New York: Wiley.
- Nilaweera, N. S. (1994). **Effects of tree root on slope stability: The case of Khao Luang mountain area**. Doctoral Dissertation. Asian Institute of Technology, Pathum Thani.
- Russell, R.S. (1977). **Plant Root Systems : Their function and interaction with the soil**. London: McGraw-Hill.
- Sdoodee, S. (1990). **Adaptive Mechanisms of Blackgram (*Vigna mungo* (L.) Hepper) and Pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) to Water Stress at Different Growth Stages**. London: McGraw-Hill.
- Terzaghi, K. (1943). **Theoretical Soil Mechanics of Unsaturated Soils**, New Jersey: John Weiley & Sons Inc.

Udomchoke, V. (1991). **Origin and engineering characteristic of problem soils in Korat Basin Northeastern Thailand.** Asian Institute of Technology, Pathum Thani.

Wang, I. & Nilaweera, N. S. (1994). **Effects of tree root on slope stability: The case of Khao Luang mountain area.** Doctoral Dissertation. Asian Institute of Technology, Pathum Thani.

Wu, T. H. (1976). Investigation of landslides on Prince of Wales Island,
Geotechnical Engineering Report 5, Ohio: Columbus.

Zienkiewicz, O. C & Taylor, R. L. (2000). **Finite Element Method.** New Jersey: U. S. A.





ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการกำหนดพิกัดของปัญหาที่ศึกษา

1. ระบบพิกัดของปัญหาที่ศึกษา (Coordinate System)

ระบบพิกัดของปัญหาที่ศึกษาจะมีเกี่ยวข้องและความสัมพันธ์กับฟังก์ชันการประมาณ ในการศึกษาพยายามนำเอาระบบพิกัดช่วยสำหรับอธิบายค่าตัวแปรค่าความสูงของระดับน้ำในมวลดิน (ศักย์ของน้ำ) ที่สนใจในชั้นส่วนที่ศึกษา

ค่าพิกัดในแกน x , y และ z ใด ๆ ในชั้นส่วนจะมีความสัมพันธ์กับระบบแกนพิกัดย่อย ๆ โดยสามารถอธิบายได้ดังแสดงในสมการที่ 1 ถึง 3

$$x = \langle N \rangle \{X\} \quad (1)$$

$$y = \langle N \rangle \{Y\} \quad (2)$$

โดยที่

$\langle N \rangle$ คือ เวกเตอร์ของการประมาณฟังก์ชันรูปร่าง (vector of interpolating shape functions)

$\{X\}$ and $\{Y\}$ คือ ระบบค่าพิกัดหลักในทิศทาง x และ y จุดต่อของชั้นส่วน

ฟังก์ชันการประมาณค่าจะสามารถแสดงในรูปของพิกัดย่อย ดังนั้นเมื่อชุดของพิกัดย่อยซึ่งอยู่ในรูปค่า r และ s ได้รับการอ้างอิงให้สอดคล้องกับระบบพิกัดหลัก สามารถถูกกำหนดโดยสมการข้างต้น การประมาณค่าฟังก์ชันจะใช้วิธีการซึ่งนำเสนอโดย Bathe, 1982 ซึ่งใช้เป็นฟังก์ชันในการศึกษาทั้งหมดของโหนดที่กำหนดไว้ ซึ่งช่วยให้เกิดความคล่องตัวขององค์ประกอบ สามารถนำมาใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าได้ในรูปของพิกัดย่อยที่อยู่ในรูปแบบค่า r และ s

2. แบบจำลองตัวแปรของปัญหาที่ศึกษา (Field Variable Model)

สมการสำหรับวิเคราะห์ปัญหาทางเทคนิคไฟในดอ์ลิเมนต์มีความจำเป็นอย่าแบบจำลองของปัญหาสำหรับการกระจายตัวแปรของชั้นส่วน จนกระทั่งได้พิจารณาตัวแปรนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์ในสมการการไหลของน้ำในมวลดินก็คือค่าศักย์รวมของน้ำ (Total head, H) ซึ่งได้นำเอามาใช้กับเทคนิคดังกล่าวภายในชั้นส่วน ในการศึกษานี้จะใช้การประมาณฟังก์ชันชั้นส่วนแบบเชิงเส้นในรูปของค่าศักย์ของน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 3

$$h = \langle N \rangle \{H\} \quad (3)$$

โดยที่

h คือ ค่าศักย์ของน้ำที่ตำแหน่งใด ๆ ของระบบพิกัดย่อย (head at any local coordinate)

$\langle N \rangle$ คือ เวกเตอร์ของการประมาณฟังก์ชัน (vector of interpolation function)

$\{H\}$ คือ เวกเตอร์ของค่าศักย์ของน้ำที่ตำแหน่งจุดต่อใด ๆ (vector of heads at the nodes)

$$i_x = \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \{H\} \quad (4)$$

$$i_y = \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \{H\} \quad (5)$$

จนกระทั่ง ทำให้ระบบของสมการในพิกัดตัวแปร x และ y ในเทอมของฟังก์ชันการประมาณค่า เปลี่ยนรูปแบบการพิจารณาเป็นเทอมฟังก์ชันการประมาณค่าที่สามารถเขียนอยู่ในรูปของเทอม r และ s ตามลำดับเพื่อให้สอดคล้องกับการคำนวณภายในชิ้นส่วน ดังแสดงในสมการที่ 6 ถึง 7

$$\frac{\partial \langle N \rangle}{\partial r} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial r} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \langle N \rangle}{\partial s} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} \quad (7)$$

จากสมการของระบบในรูปของพิกัด สามารถแสดงได้สมการที่ 8 ถึง 15

$$x = \langle N \rangle \{X\} \quad (8)$$

$$y = \langle N \rangle \{Y\} \quad (9)$$

$$\frac{\partial x}{\partial r} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial r} \{X\} \quad (10)$$

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial s} \{X\} \quad (11)$$

$$\frac{\partial y}{\partial r} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial r} \{Y\} \quad (12)$$

$$\frac{\partial y}{\partial s} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial s} \{Y\} \quad (13)$$

$$\frac{\partial z}{\partial r} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial r} \{Z\} \quad (14)$$

$$\frac{\partial z}{\partial s} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial s} \{Z\} \quad (15)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ 8 ถึง 15 ลงในเมทริกซ์ Jacobian จะได้สมการที่ 23

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial(N_1, N_2, \dots, N_{20})}{\partial r} \\ \frac{\partial(N_1, N_2, \dots, N_{20})}{\partial s} \\ \frac{\partial(N_1, N_2, \dots, N_{20})}{\partial t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 & Y & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{20} & Y_{20} & Z_{20} \end{bmatrix} \quad (16)$$

เมื่อทราบระบบสมการหลักของปัญหาที่ศึกษาและสมการอนุพันธ์การประมาณค่าฟังก์ชันของจุดต่อภายในชิ้นส่วนแล้ว จะสามารถใช้เมทริกซ์ Jacobian ช่วยคำนวณสมการและฟังก์ชันของเมทริกซ์ B ได้ดังแสดงในสมการที่ 16

สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบของสมการที่ 17

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial r} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial s} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial t} \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (17)$$

โดยที่ $[J]$ คือ เมทริกซ์ Jacobian ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบสมการที่ 18

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (18)$$

การหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันการประมาณค่าโดยพิจารณาในตัวแปร x และ y ซึ่งจะเรียกว่าเมทริกซ์ B และสามารถหาค่าได้ ดังแสดงในสมการที่ 19

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial z} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial r} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial s} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (19)$$



ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำผ่าน มวลดินบนพื้นที่ลาดเอียงแบบ 2 มิติ

1. การนำเข้าข้อมูลในซอฟต์แวร์ COMSOL

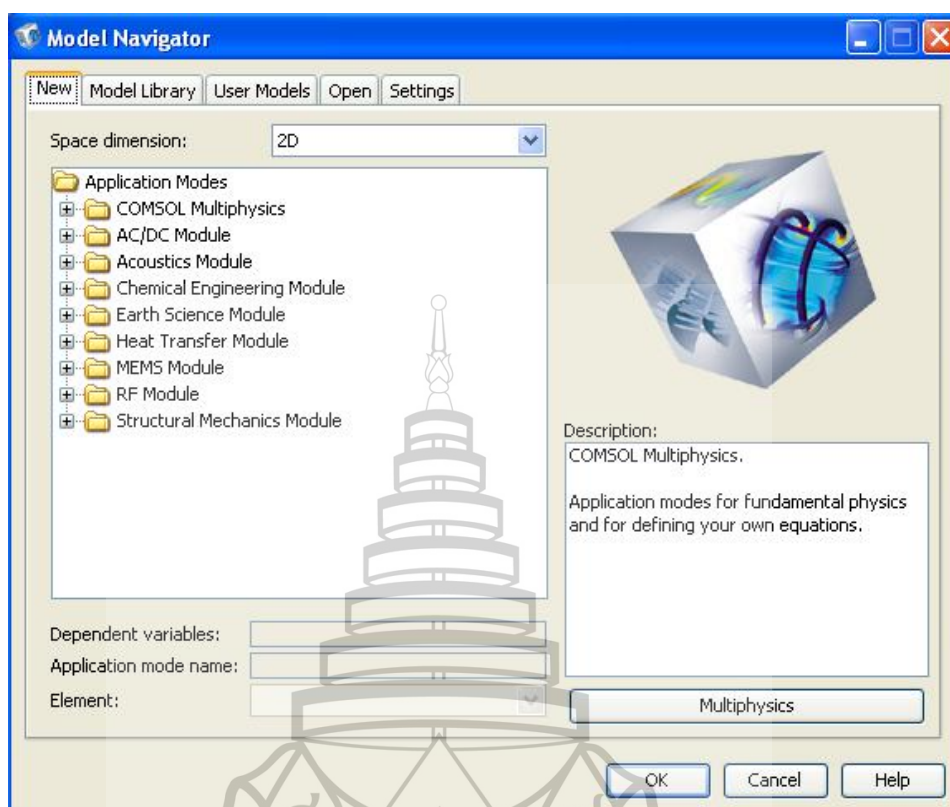
ข้อมูลที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำในมวลดินและแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพประกอบด้วย ข้อมูลรูปร่างหน้าตัดของเชิงลาด (cross-section of slope) ข้อมูลสมบัติของมวลดิน ข้อมูลค่าปริมาณน้ำฝนที่น้ำเข้าในผิวดิน ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในมวลดิน ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใช้พิจารณา ข้อมูลเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ข้อมูลเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) และ ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ โดยมีขั้นตอนในการนำเข้าข้อมูลดังนี้

1.1 ซอฟต์แวร์ COMSOL

ซอฟต์แวร์ COMSOL เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถวิเคราะห์การไหลของน้ำมวลดินไปตามสภาพเชิงลาดได้ และในการศึกษานี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics 3.5a ซึ่งหน้าตาต่างแรกของซอฟต์แวร์ได้แสดงไว้ดังภาพที่ ข1 และ ข2



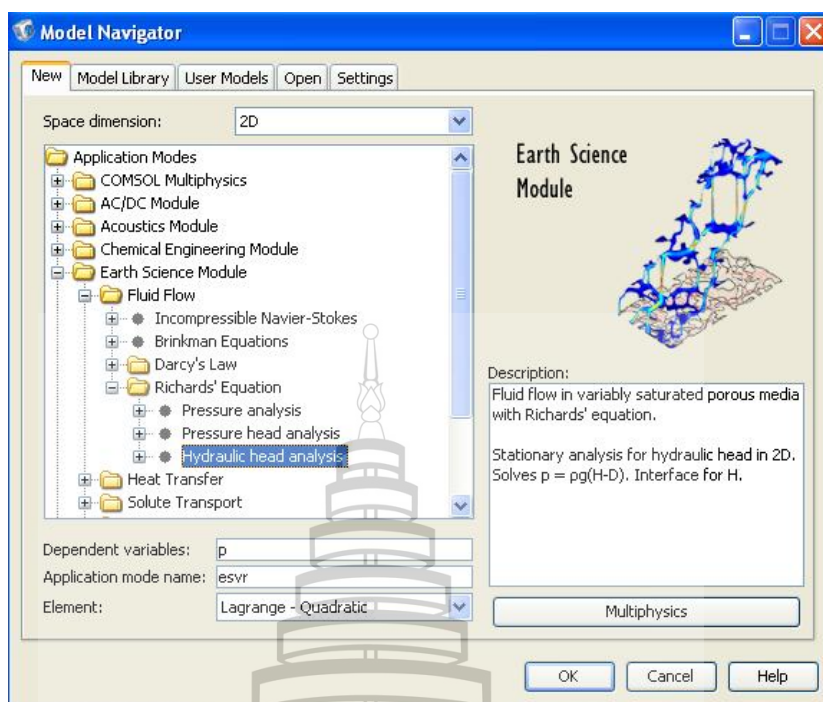
ภาพที่ ข1 หน้าตาของซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics 3.5a



ภาพที่ ข2 หน้าต่างแรกภายในของซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics 3.5a

1.2 การสร้างโครงการใหม่

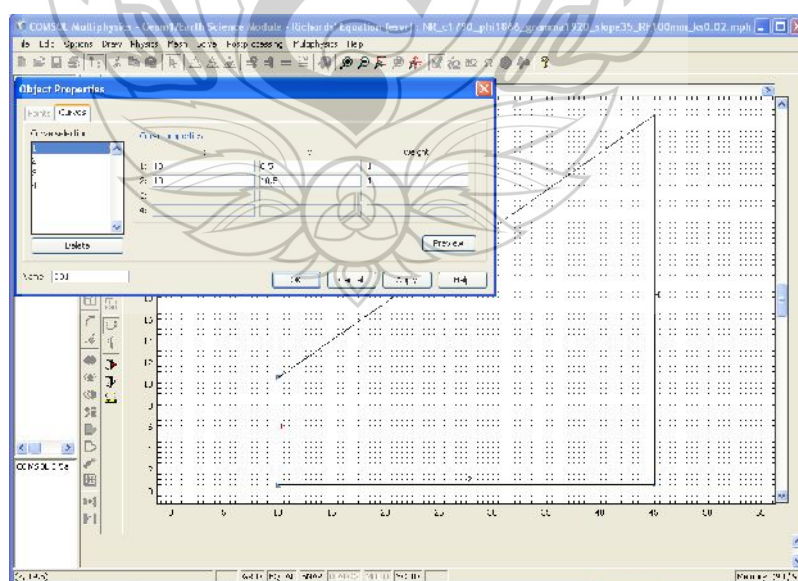
การสร้างโครงการใหม่เป็นการกำหนดพื้นที่ที่จะใช้ในการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ รวมทั้งเป็นการกำหนดชื่อไฟล์ (file name) และ รายละเอียดของชื่อไฟล์ (title) ของโครงการใหม่ที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการเข้าเมนูคำสั่ง File จากหน้าต่างแรก และเลือกคำสั่ง New Project หน้าต่างสำหรับการสร้างโครงการใหม่แสดงไว้ดังภาพที่ ข3



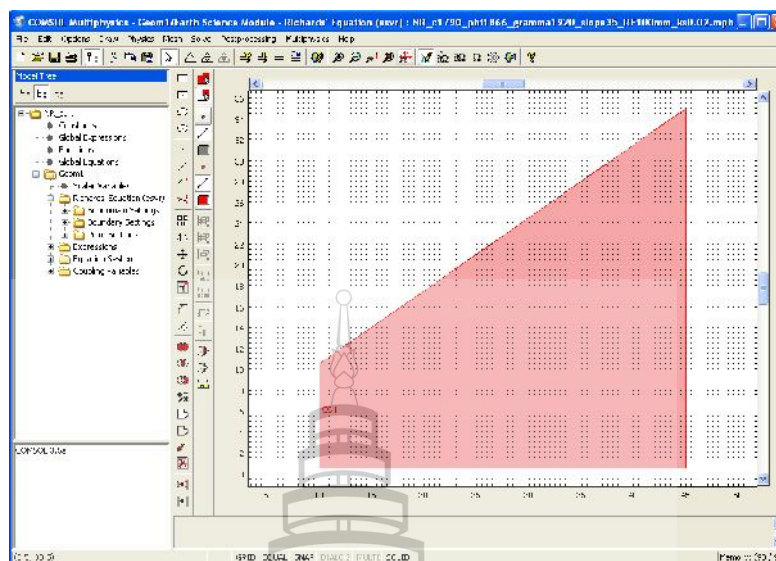
ภาพที่ ข3 หน้าต่างสำหรับการสร้างโครงกรใหม่ในซอฟต์แวร์ COMSOL

1.3 การนำเข้าข้อมูลเชิงพื้นที่ของรูปร่างเชิงลาด

การนำเข้าข้อมูลเชิงพื้นที่ของรูปร่างเชิงลาดที่ศึกษาประกอบด้วย ข้อมูลลักษณะรูปร่างของสภาพเชิงลาด, ข้อมูลค่าสมบัติมวลดิน ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่น้ำเข้าผิวดินเชิงลาดและข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ แสดงไว้ดังภาพที่ ข4 ถึง ข5

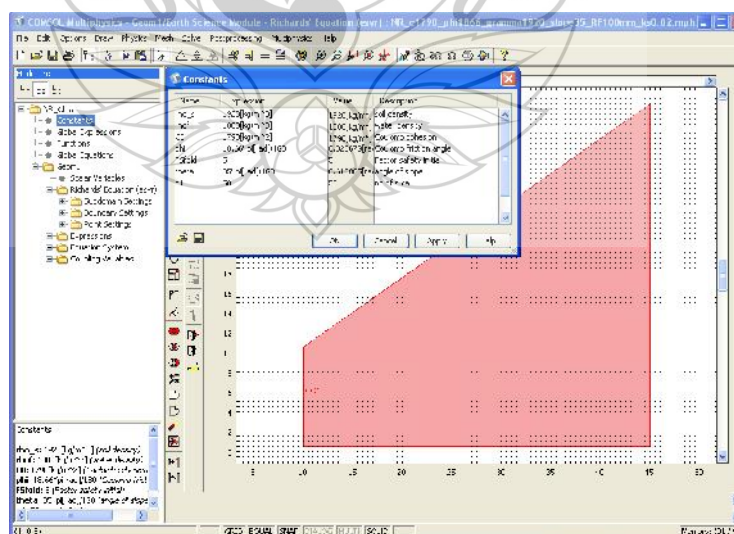


ภาพที่ ข4 ตัวอย่างการนำเข้าข้อมูลรูปร่างหน้าตัดเชิงลาด 35 องศา

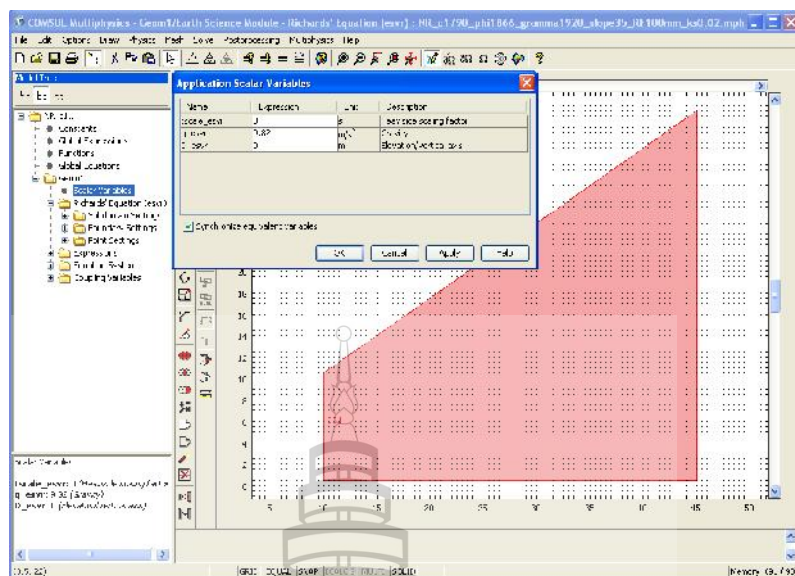


ภาพที่ ข5 ลักษณะรูปร่างหน้าตัดเชิงลาด 35 องศาหลังจากการป้อนข้อมูลเสร็จ

เมื่อได้ลักษณะของรูปร่างของสภาพเชิงลาดเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำเข้าสู่ข้อมูลค่าสมบัติของมวลดินลงในโปรแกรม โดยเริ่มจากการเข้าเมนูคำสั่ง Constants ซึ่งเป็นเมนูย่อยอยู่บริเวณซ้ายมือของหน้าต่าง Model Tree จะปรากฏหน้าต่าง Constants ขึ้นมาและทำการนำเข้าสู่ข้อมูลค่าสมบัติของมวลดิน (C, ρ, γ) หลังจากนั้นกำหนดค่าของรูปร่างภายใต้แรงโน้มถ่วงในช่อง โดยเริ่มจากการเข้าเมนูคำสั่ง Geom1 ซึ่งเป็นเมนูย่อยอยู่บริเวณซ้ายมือของหน้าต่าง Model Tree จะปรากฏหน้าต่าง Application Scalar Variables ขึ้นมาและทำการนำเข้าสู่ข้อมูลค่าแรงโน้มถ่วงลงไปแสดงไว้ดังภาพที่ ข6 ถึง ข7

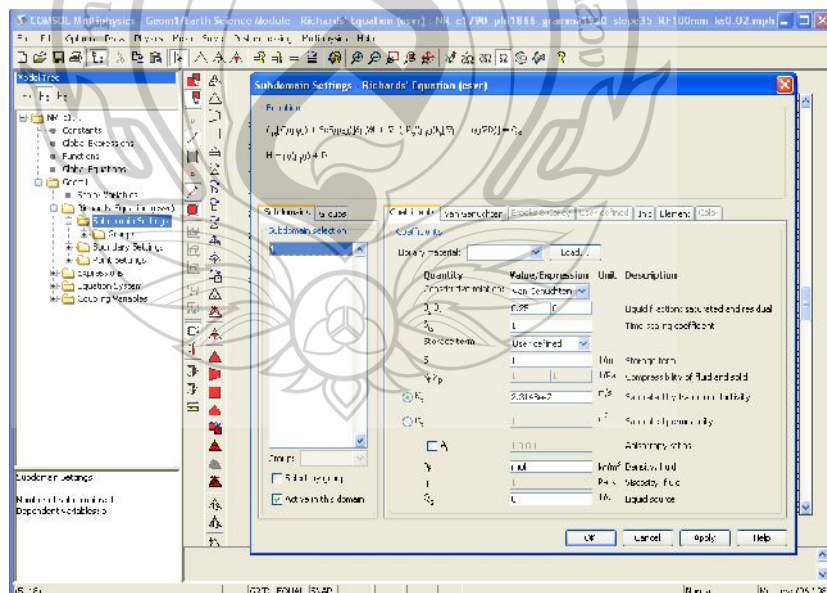


ภาพที่ ข6 ตัวอย่างการนำเข้าสู่ข้อมูลค่าสมบัติของมวลดินในหน้าตัดเชิงลาด 35 องศา



ภาพที่ ข7 ตัวอย่างการกำหนดนำเข้าข้อมูลของรูปร่างภายใต้แรงโน้มถ่วงของหน้าตัด

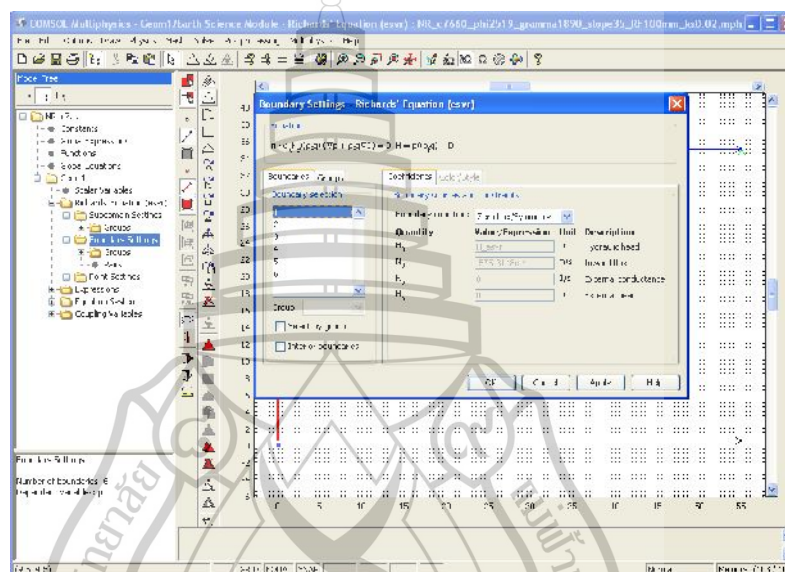
หลังจากได้ป้อนข้อมูลค่าสมบัติของของมวลดินของรูปร่างสภาพเชิงลาดเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำเข้าข้อมูลค่าประสิทธิภาพความซึมได้ของน้ำผ่านมวลโดยการเข้าเมนูคำสั่ง Geom1 ซึ่งเป็นเมนูย่อยอยู่บริเวณซ้ายมือของหน้าต่าง Subdomain Settings ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูลดังแสดงในภาพที่ ข8 และเข้าเมนูย่อย Subdomain Settings – Richards' Equation (esvr)



ภาพที่ ข8 หน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูลค่าสัมประสิทธิภาพความซึมได้ของน้ำผ่านมวลดิน

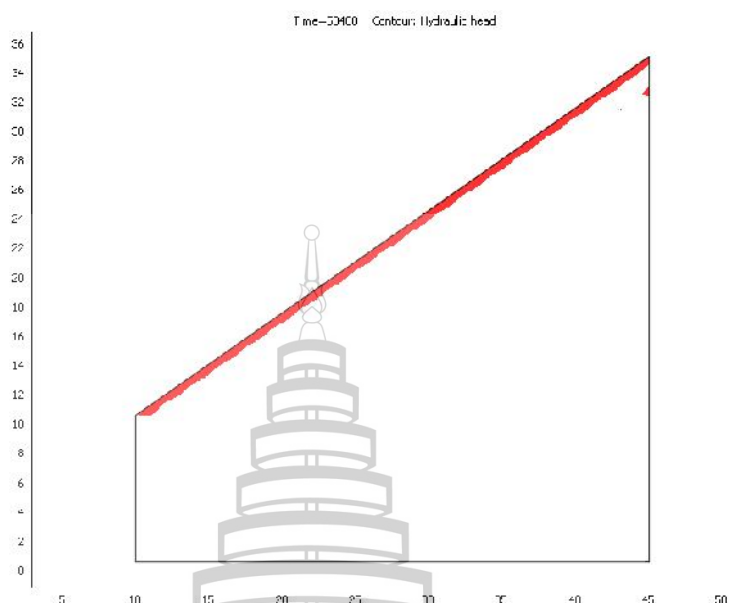
1.4 การนำเข้าข้อมูลเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้น (initial and boundary condition)

การนำเข้าข้อมูลเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้นนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการวิเคราะห์การไหลซึ่งจะเป็นแบบ Transient analysis สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์การใช้ Hydraulic head analysis ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการเข้าเมนูคำสั่ง Geom1 ซึ่งเป็นเมนูย่อยอยู่บริเวณซ้ายมือของหน้าต่าง Boundary Settings ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูล และเข้าเมนูย่อย Boundary Settings – Richards' Equation (esvr) ขึ้นมา ดังแสดงในภาพที่ ข9



ภาพที่ ข9 หน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูลเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์แบบ Transient analysis

การนำเข้าข้อมูลเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) สามารถกระทำได้โดยการเลือกการเข้าเมนูคำสั่ง Geom1 ซึ่งเป็นเมนูย่อยอยู่บริเวณซ้ายมือของหน้าต่าง Expressions ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูล และเข้าเมนูย่อย Scalar expressions ขึ้นมา ดังแสดงในภาพที่ ข10 หลังจากนั้นจะทำการเข้าเมนูคำสั่งกำหนดตะขวย (mesh mode) เพื่อแบ่งชิ้นส่วนย่อยในโดเมนของรูปร่าง ดังแสดงในภาพที่ ข11 เมื่อแบ่งชิ้นส่วนเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะเริ่มตั้งค่านวนโดยกำหนดพารามิเตอร์ของการคำนวณด้วยคำสั่ง Solver parameter และฟังก์ชันการคำนวณด้วยคำสั่ง Solver manager ดังแสดงในภาพที่ ข12 ถึง ข14



ภาพที่ 14 หน้าต่างสุดท้ายเพื่อเริ่มการคำนวณของปัญหา

2. ผลจากศึกษาแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน

ในการวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านมวลดินแบบ Transient analysis ซึ่งได้อธิบายค่าตัวแปรจากการวิเคราะห์ในรูปแบบของค่า Hydraulic head analysis โดยซอฟต์แวร์ COMSOL จะทำการคำนวณค่าศักย์ของน้ำในทุก ๆ ตำแหน่งของภาพหน้าตัดขวางของสภาพเชิงลาด ณ เวลาใด ๆ ที่ทำการวิเคราะห์สามารถนำออกมาได้โดยการเข้าเมนูคำสั่ง Export จากหน้าต่างแรก และเลือกคำสั่ง Current plot จะปรากฏหน้าต่าง Save current plot in ASCII file ขึ้น ซึ่งสามารถเลือกแสดงค่าต่างๆที่คำนวณได้จากการเลือกข้อมูลในช่วงเวลาที่ต้องการในรูปแบบของ text file ดังแสดงในภาพที่ 15

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการ วิเคราะห์เสถียรภาพของดินบนพื้นที่ลาดเอียง

1. การนำเข้าข้อมูลในซอฟต์แวร์ COMSOL

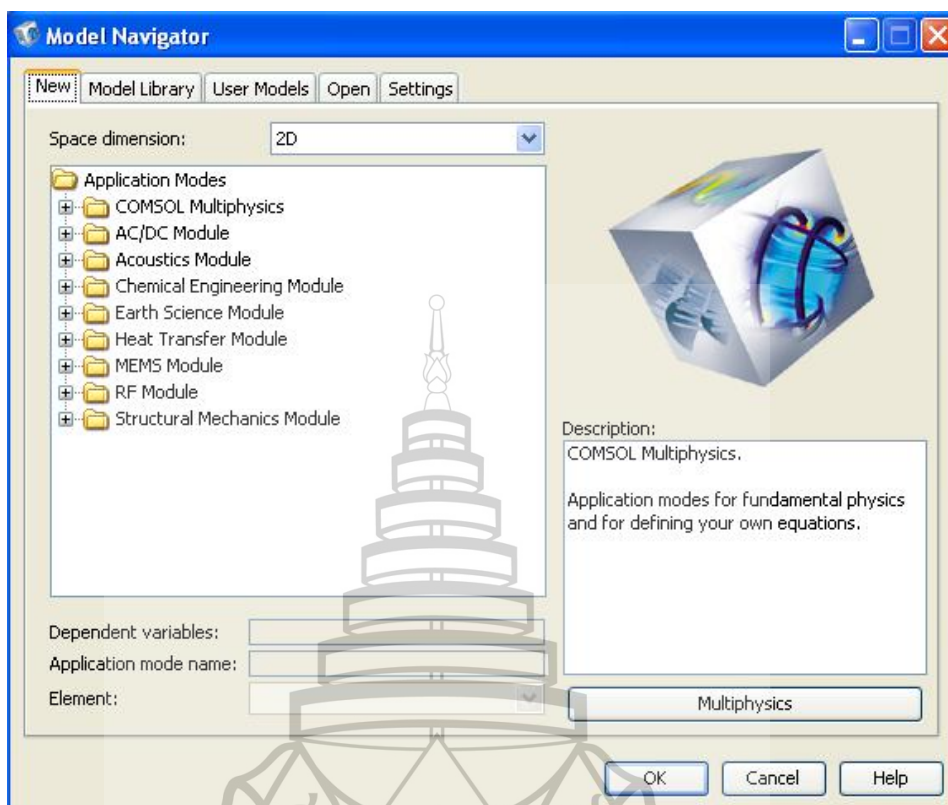
ข้อมูลที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำในมวลดินและแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพประกอบด้วย ข้อมูลรูปร่างหน้าตัดของเชิงลาด (cross-section of slope) ข้อมูลสมบัติของมวลดิน ข้อมูลค่าปริมาณน้ำฝนที่นำเข้าไปในผิวดิน ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำในมวลดิน ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใช้พิจารณา ข้อมูลเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ข้อมูลเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) และ ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ โดยมีขั้นตอนในการนำเข้าข้อมูลดังนี้

1.1 ซอฟต์แวร์ COMSOL

ซอฟต์แวร์ COMSOL เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถวิเคราะห์การไหลของน้ำมวลดินไปตามสภาพเชิงลาดได้ และในการศึกษานี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics 3.5a ซึ่งหน้าตาต่างแรกของซอฟต์แวร์ได้แสดงไว้ดังภาพที่ ค1 และ ค2



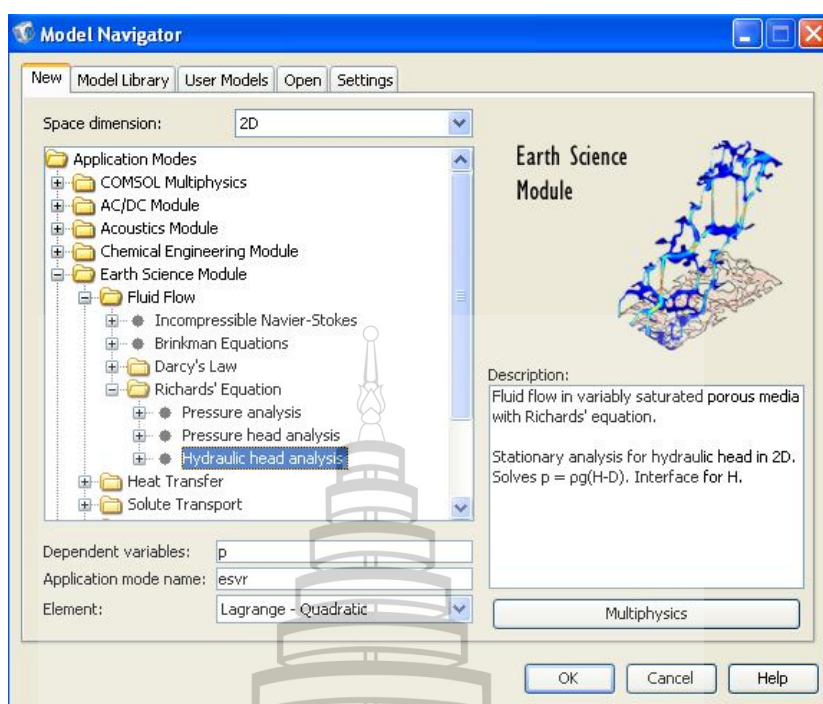
ภาพที่ ค1 หน้าตาของซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics 3.5a



ภาพที่ ค2 หน้าต่างแรกภายในของซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics 3.5a

1.2 การสร้างโครงการใหม่

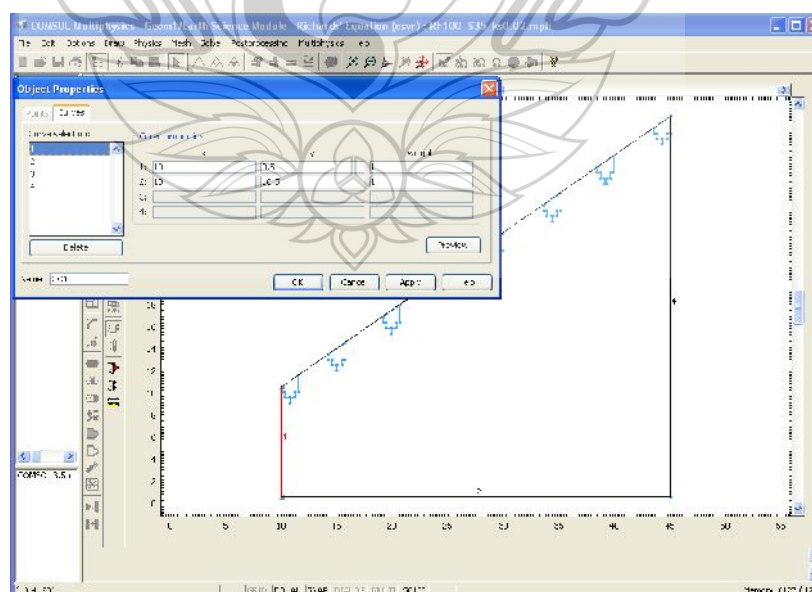
การสร้างโครงการใหม่เป็นการกำหนดพื้นที่ที่จะใช้ในการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ รวมทั้งเป็นการกำหนดชื่อไฟล์ (file name) และ รายละเอียดของชื่อไฟล์ (title) ของโครงการใหม่ที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการเข้าเมนูคำสั่ง File จากหน้าต่างแรก และเลือกคำสั่ง New Project หน้าต่างสำหรับการสร้างโครงการใหม่แสดงไว้ดังภาพที่ ค3



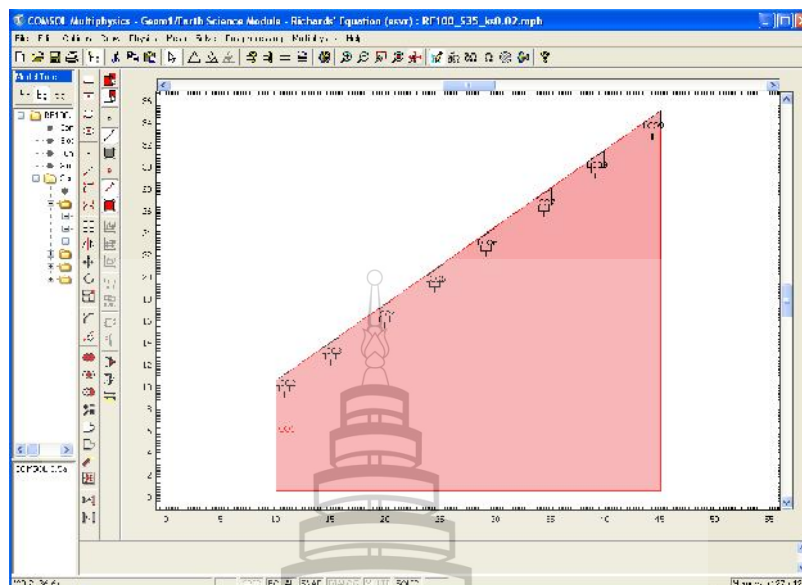
ภาพที่ ค3 หน้าต่างสำหรับการสร้างโครงการใหม่ในซอฟต์แวร์ COMSOL

1.3 การนำเข้าข้อมูลเชิงพื้นที่ของรูปร่างเชิงลาด

การนำเข้าข้อมูลเชิงพื้นที่ของรูปร่างเชิงลาดที่ศึกษาประกอบด้วย ข้อมูลลักษณะรูปร่างของสภาพเชิงลาด, ข้อมูลค่าสมบัติมวลดิน ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่นำเข้าผิวดินเชิงลาดและข้อมูลสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ แสดงไว้ดังภาพที่ ค4 ถึง ค5

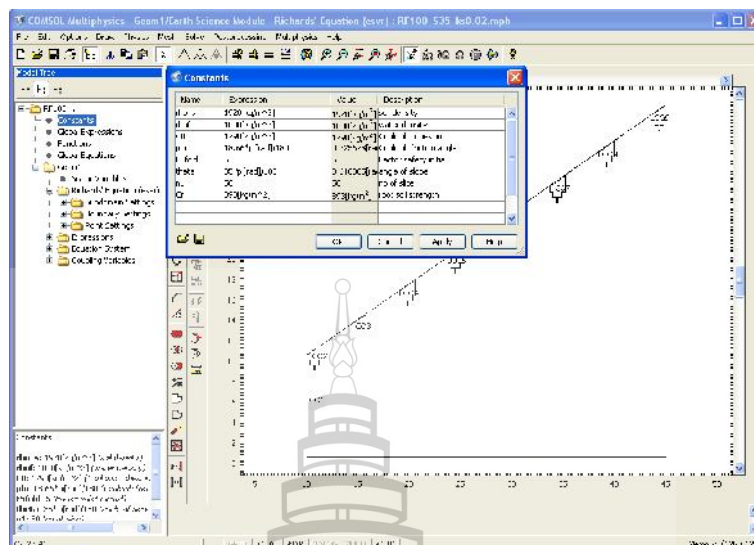


ภาพที่ ค4 ตัวอย่างการนำเข้าข้อมูลรูปร่างหน้าตัดเชิงลาด 35 องศา

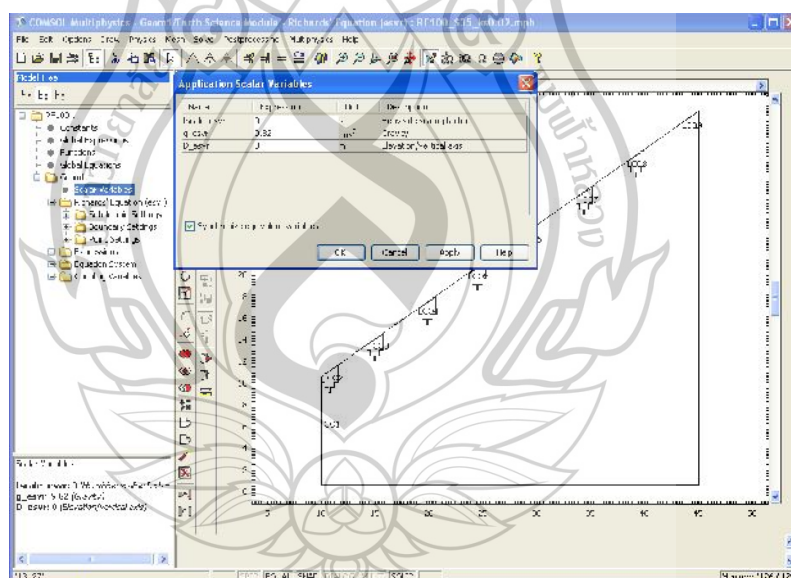


ภาพที่ ค5 ลักษณะรูปร่างหน้าตัดเชิงลาด 35 องศาหลังจากการป้อนข้อมูลเสร็จ

เมื่อได้ลักษณะของรูปร่างของสภาพเชิงลาดเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำเข้าข้อมูลค่าสมบัติของมวลดินลงในโปรแกรม โดยเริ่มจากการเข้าเมนูคำสั่ง Constants ซึ่งเป็นเมนูย่อยอยู่บริเวณซ้ายมือของหน้าต่าง Model Tree จะปรากฏหน้าต่าง Constants ขึ้นมาและทำการนำเข้าข้อมูลค่าสมบัติของมวลดินและแรงดึงดูดประสาดดิน (C, ρ, γ, C_R) หลังจากนั้นกำหนดค่าของรูปร่างภายใต้แรงโน้มถ่วงในช่อง โดยเริ่มจากการเข้าเมนูคำสั่ง Geom1 ซึ่งเป็นเมนูย่อยอยู่บริเวณซ้ายมือของหน้าต่าง Model Tree จะปรากฏหน้าต่าง Application Scalar Variables ขึ้นมาและทำการนำเข้าข้อมูลค่าแรงโน้มถ่วงลงไปแสดงไว้ดังภาพที่ ค6 ถึง ค7



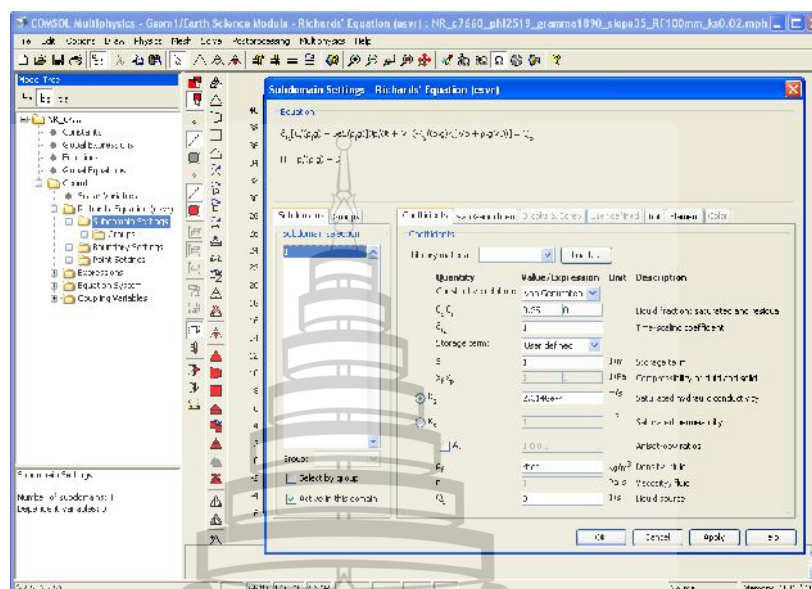
ภาพที่ 6 ตัวอย่างการนำเข้าข้อมูลค่าสมบัติของมวลดินในหน้าตัดเชิงลาด 35 องศา



ภาพที่ 7 ตัวอย่างการกำหนดนำเข้าข้อมูลของรูปร่างภายใต้แรงโน้มถ่วงของหน้าตัด

หลังจากได้ป้อนข้อมูลค่าสมบัติของมวลดินของรูปร่างสภาพเชิงลาดเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำเข้าข้อมูลค่าประสิทธิภาพความซึมได้ของน้ำผ่านมวลโดยการเข้าเมนูคำสั่ง Geom1 ซึ่ง

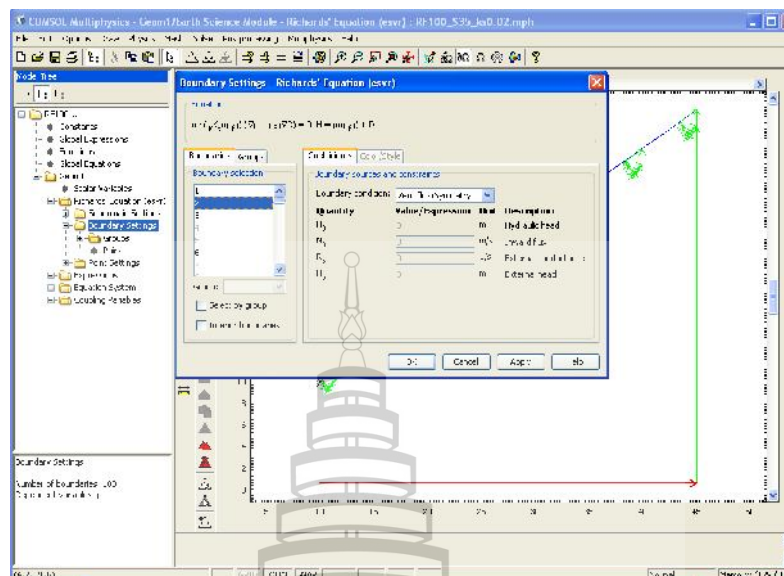
เป็นเมนูย่อยอยู่บริเวณซ้ายมือของหน้าต่าง Subdomain Settings ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูลดังแสดงในภาพที่ ข8 และเข้าเมนูย่อย Subdomain Settings – Richards' Equation (esvr)



ภาพที่ ข8 หน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดิน

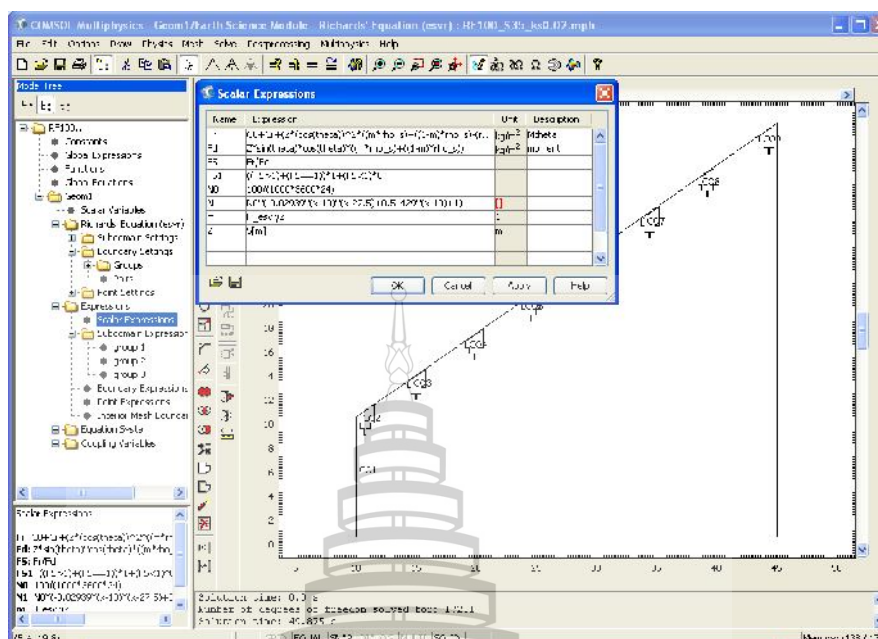
1.4 การนำเข้าข้อมูลเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้น (initial and boundary condition)

การนำเข้าข้อมูลเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้นนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการวิเคราะห์การไหลซึ่งจะเป็นแบบ Transient analysis สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์โดยใช้ Hydraulic head analysis ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการเข้าเมนูคำสั่ง Geom1ซึ่งเป็นเมนูย่อยอยู่บริเวณซ้ายมือของหน้าต่าง Boundary Settings ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูล และเข้าเมนูย่อย Boundary Settings – Richards' Equation (esvr) ขึ้นมา ดังแสดงในภาพที่ ข9

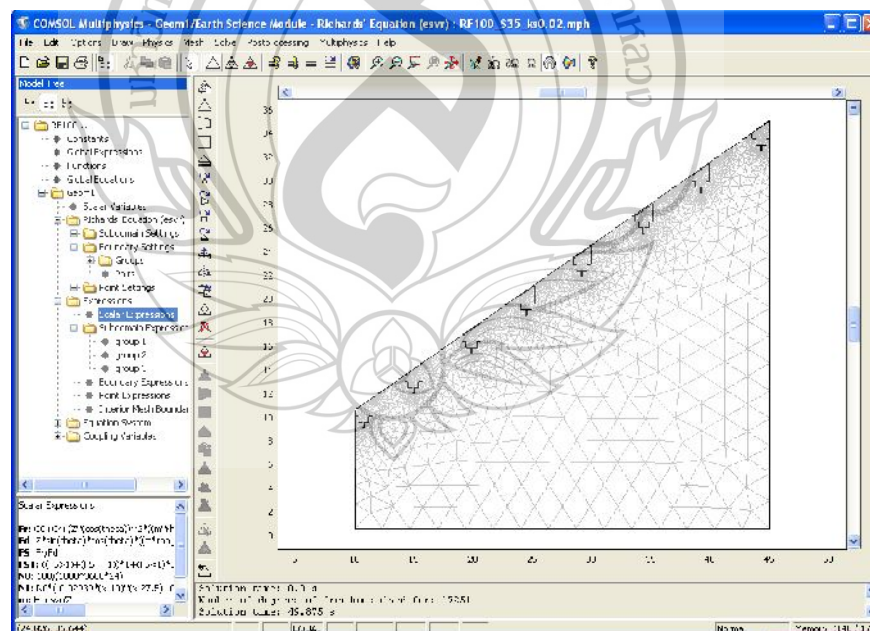


ภาพที่ ๑๑ หน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูลเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์แบบ Transient analysis

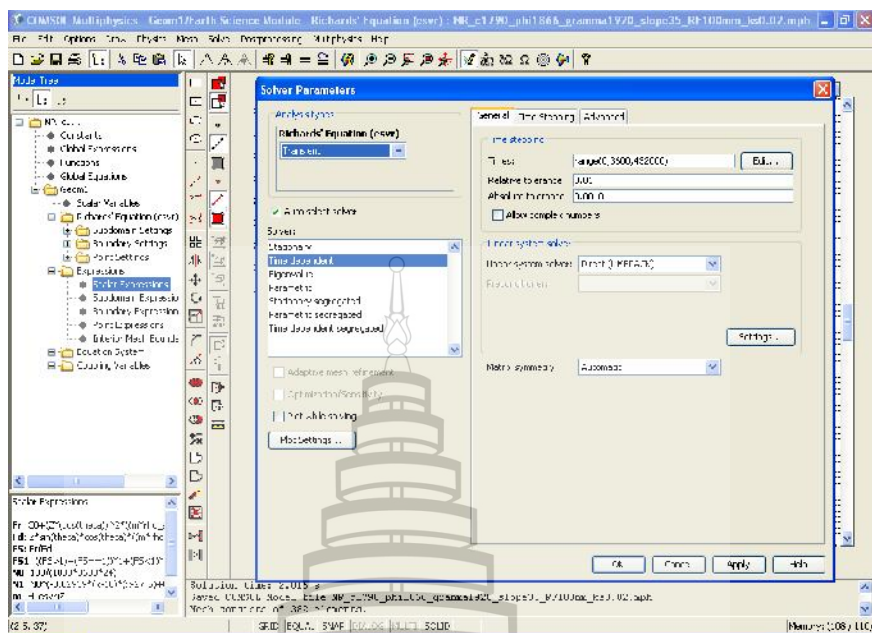
การนำเข้าข้อมูลเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) สามารถกระทำได้โดยการเลือกการเข้าเมนูคำสั่ง Geom1 ซึ่งเป็นเมนูย่อยอยู่บริเวณซ้ายมือของหน้าต่าง Expressions ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูล และเข้าเมนูย่อย Scalar expressions ขึ้นมา ดังแสดงในภาพที่ ๑๑ หลังจากนั้น จะทำการเข้าเมนูคำสั่งกำหนดตะขำ (mesh mode) เพื่อแบ่งชิ้นส่วนย่อยในโดเมนของรูปร่าง ดังแสดงในภาพที่ ๑๒ เมื่อแบ่งชิ้นส่วนเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะเริ่มต้นคำนวณโดยกำหนดพารามิเตอร์ของการคำนวณด้วยคำสั่ง Solver parameter และฟังก์ชันการคำนวณด้วยคำสั่ง Solver manager ดังแสดงในภาพที่ ๑๓ ถึง ๑๔



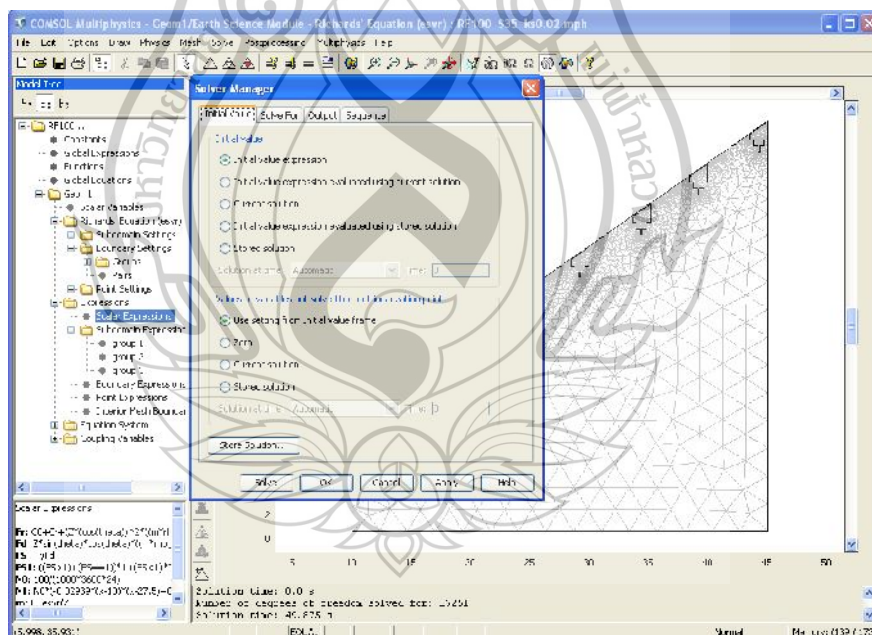
ภาพที่ 10 หน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูลเงื่อนไขเริ่มต้นของการวิเคราะห์แบบ Hydraulic head analysis



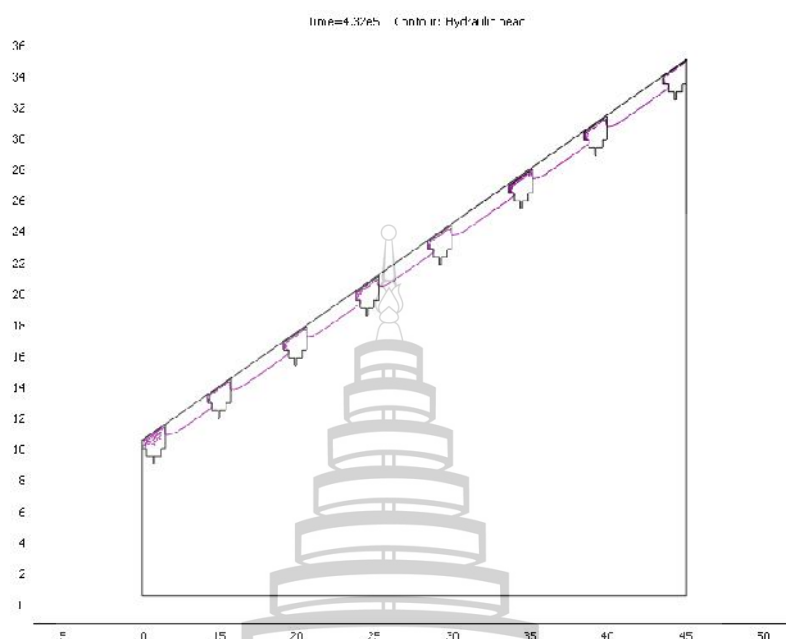
ภาพที่ ค11 หน้าต่างสำหรับแบ่งชิ้นส่วนย่อยในโดเมนของรูปร่างของการวิเคราะห์แบบ Transient analysis



ภาพที่ ค12 หน้าต่างแสดงกำหนดพารามิเตอร์ของการคำนวณของปัญหา



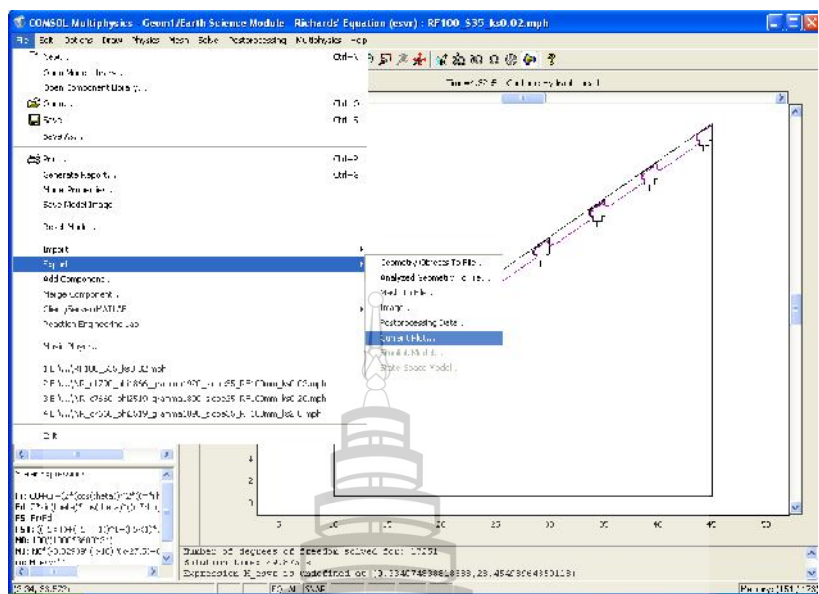
ภาพที่ ค13 หน้าต่างสุดท้ายเพื่อเริ่มการคำนวณของปัญหา



ภาพที่ ค14 หน้าต่างสุดท้ายเพื่อเริ่มการคำนวณของปัญหา

2. ผลจากศึกษาแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การไหลของน้ำในมวลดิน

ในการวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านมวลดินแบบ Transient analysis ซึ่งได้อธิบายค่าตัวแปรจากการวิเคราะห์ในรูปแบบของค่า Hydraulic head analysis โดยซอฟต์แวร์ COMSOL จะทำการคำนวณค่าศักย์ของน้ำในทุก ๆ ตำแหน่งของภาพหน้าตัดขวางของสภาพเชิงลาด ณ เวลาใด ๆ ที่ทำการวิเคราะห์สามารถนำออกมาได้โดยการเข้าเมนูคำสั่ง Export จากหน้าต่างแรก และเลือกคำสั่ง Current plot จะปรากฏหน้าต่าง Save current plot in ASCII file ขึ้น ซึ่งสามารถเลือกแสดงค่าต่างๆ ที่คำนวณได้จากการเลือกข้อมูลในช่วงเวลาที่ต้องการในรูปแบบของ text file ดังแสดงในภาพที่ ค15

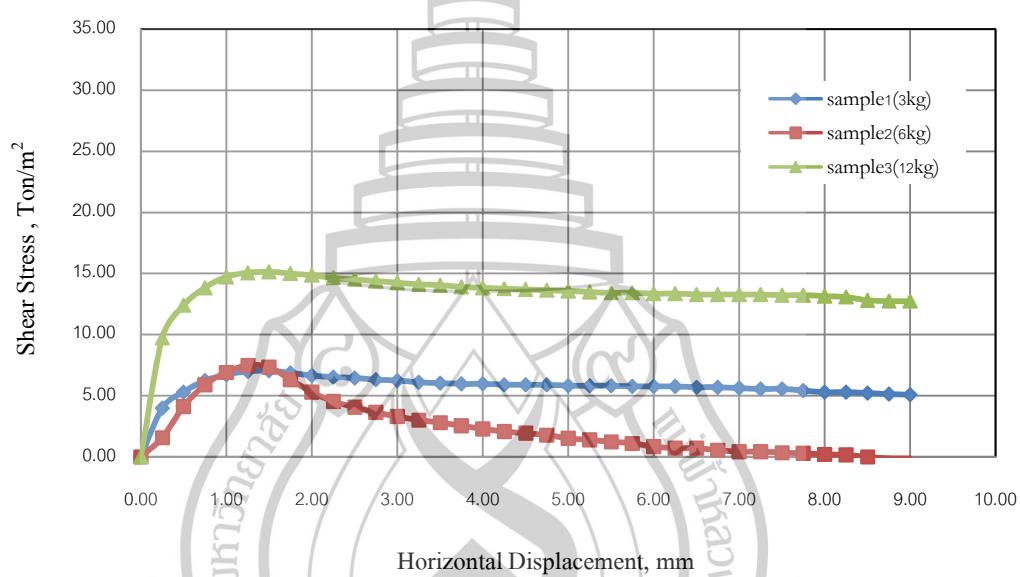


ภาพที่ ค15 หน้าต่างในการนำออกค่าข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ในรูปแบบ text file

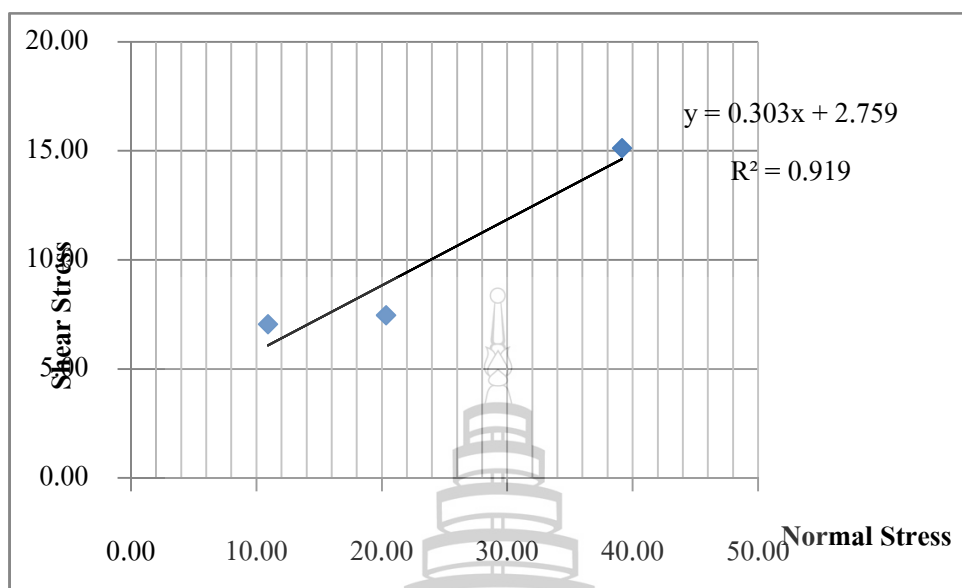


ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบพื้นฐานและสมบัติเฉพาะทางกายภาพของมวลดิน



ภาพที่ ง1 ผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 1 โดยวิธีแรงเฉือนโดยตรง



ภาพที่ ง2 ความสัมพันธ์ของค่าหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงตั้งฉากเพื่อหาค่า c, ϕ ของดินชุดที่ 1



ตารางที่ ง1 ผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 1 น้ำหนักกดตั้งจาก 3 กิโลกรัม

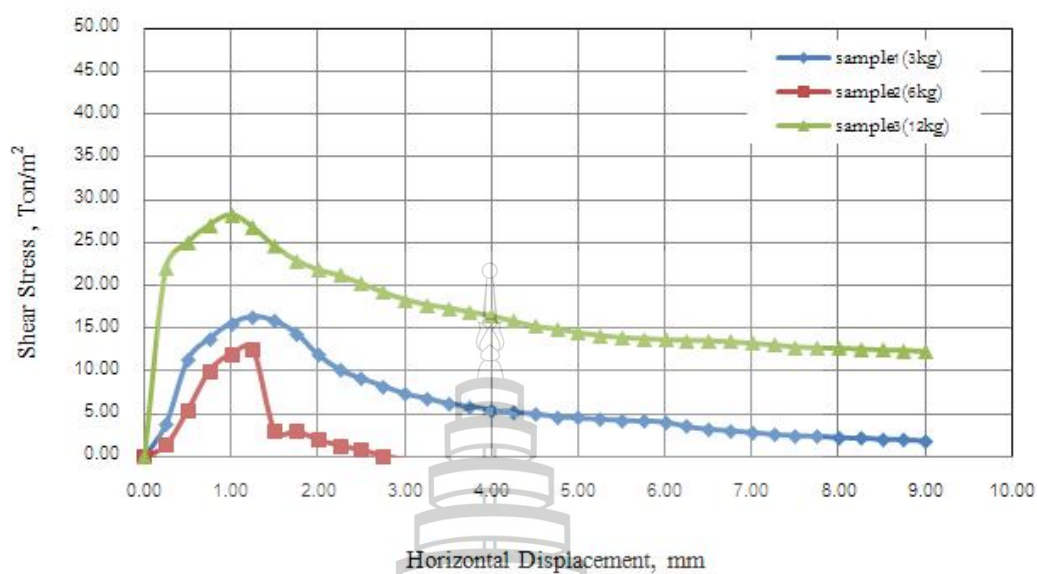
Direct Shear Test								
Load - Deformation Data								
Test Data	Horiz. Disp. (div.)	Horiz. Disp. (mm.)	Verti. Disp. (div.)	Verti. Disp. (mm.)	Prov. Read. (div.)	Corr Area (cm ²)	Horiz. Force (tons)	Shear Stress (t/m ²)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	31.27	0.00	0.00
2	25	0.25	14.00	0.03	58.00	31.27	0.01	3.97
3	50	0.50	32.00	0.06	77.00	31.27	0.02	5.27
4	75	0.75	56.00	0.11	91.00	31.27	0.02	6.23
5	100	1.00	70.00	0.14	98.00	31.27	0.02	6.71
6	125	1.25	80.00	0.16	102.00	31.27	0.02	6.98
7	150	1.50	86.00	0.17	103.00	31.27	0.02	7.05
8	175	1.75	86.00	0.17	100.00	31.27	0.02	6.84
9	200	2.00	86.00	0.17	97.00	31.27	0.02	6.64
10	225	2.25	86.00	0.17	95.00	31.27	0.02	6.50
11	250	2.50	84.00	0.17	94.00	31.27	0.02	6.43
12	275	2.75	80.00	0.16	92.00	31.27	0.02	6.30
13	300	3.00	78.00	0.16	91.00	31.27	0.02	6.23
14	325	3.25	74.00	0.15	89.00	31.27	0.02	6.09
15	350	3.50	72.00	0.14	88.00	31.27	0.02	6.02
16	375	3.75	68.00	0.14	87.00	31.27	0.02	5.95
17	400	4.00	64.00	0.13	87.00	31.27	0.02	5.95
18	425	4.25	60.00	0.12	86.00	31.27	0.02	5.89
19	450	4.50	58.00	0.12	86.00	31.27	0.02	5.89
20	475	4.75	54.00	0.11	86.00	31.27	0.02	5.89
21	500	5.00	50.00	0.10	85.00	31.27	0.02	5.82
22	525	5.25	48.00	0.10	85.00	31.27	0.02	5.82
23	550	5.50	46.00	0.09	85.00	31.27	0.02	5.82
24	575	5.75	42.00	0.08	84.00	31.27	0.02	5.75
25	600	6.00	38.00	0.08	84.00	31.27	0.02	5.75
26	625	6.25	36.00	0.07	84.00	31.27	0.02	5.75
27	650	6.50	32.00	0.06	83.00	31.27	0.02	5.68
28	675	6.75	30.00	0.06	83.00	31.27	0.02	5.68
29	700	7.00	28.00	0.06	82.00	31.27	0.02	5.61
30	725	7.25	26.00	0.05	81.00	31.27	0.02	5.54
31	750	7.50	22.00	0.04	81.00	31.27	0.02	5.54
32	775	7.75	22.00	0.04	79.00	31.27	0.02	5.41
33	800	8.00	18.00	0.04	77.00	31.27	0.02	5.27
34	825	8.25	18.00	0.04	77.00	31.27	0.02	5.27
35	850	8.50	18.00	0.04	76.00	31.27	0.02	5.20
36	875	8.75	18.00	0.04	75.00	31.27	0.02	5.13
37	900	9.00	10.00	0.02	74.00	31.27	0.02	5.06

ตารางที่ ๖2 ผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 1 น้ำหนักกดตั้งฉาก 6 กิโลกรัม

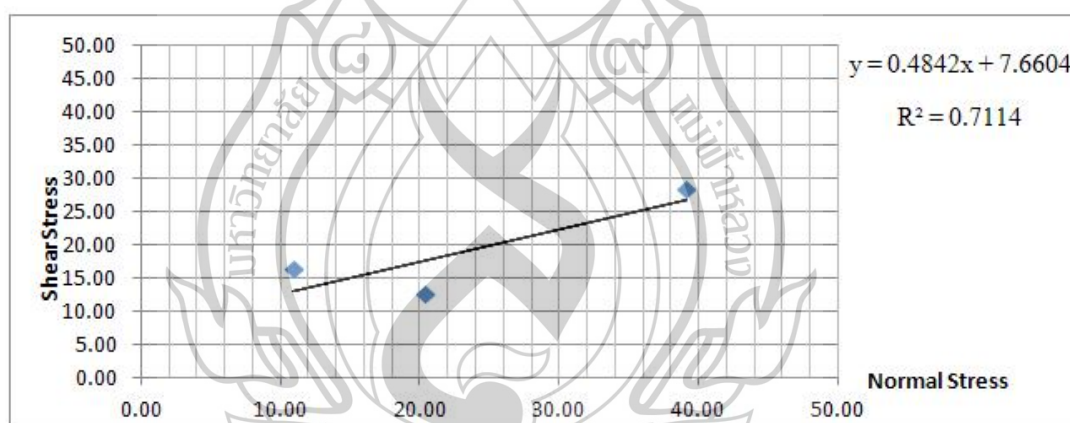
Direct Shear Test								
Load - Deformation Data								
Test Data	Horiz. Disp. (div.)	Horiz. Disp. (mm.)	Verti. Disp. (div.)	Verti. Disp. (mm.)	Prov. Read. (div.)	Corr Area (cm ²)	Horiz. Force (tons)	Shear Stress (t/m ²)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	31.27	0.00	0.00
2	25	0.25	2.00	0.00	23.00	31.27	0.00	1.57
3	50	0.50	4.00	0.01	60.00	31.27	0.01	4.11
4	75	0.75	14.00	0.03	86.00	31.27	0.02	5.89
5	100	1.00	28.00	0.06	101.00	31.27	0.02	6.91
6	125	1.25	38.00	0.08	109.00	31.27	0.02	7.46
7	150	1.50	44.00	0.09	107.00	31.27	0.02	7.32
8	175	1.75	44.00	0.09	92.00	31.27	0.02	6.30
9	200	2.00	44.00	0.09	77.00	31.27	0.02	5.27
10	225	2.25	44.00	0.09	66.00	31.27	0.01	4.52
11	250	2.50	48.00	0.10	59.00	31.27	0.01	4.04
12	275	2.75	52.00	0.10	53.00	31.27	0.01	3.63
13	300	3.00	56.00	0.11	48.00	31.27	0.01	3.28
14	325	3.25	58.00	0.12	44.00	31.27	0.01	3.01
15	350	3.50	62.00	0.12	41.00	31.27	0.01	2.81
16	375	3.75	66.00	0.13	37.00	31.27	0.01	2.53
17	400	4.00	68.00	0.14	33.00	31.27	0.01	2.26
18	425	4.25	70.00	0.14	30.00	31.27	0.01	2.05
19	450	4.50	72.00	0.14	28.00	31.27	0.01	1.92
20	475	4.75	72.00	0.14	26.00	31.27	0.01	1.78
21	500	5.00	72.00	0.14	22.00	31.27	0.00	1.51
22	525	5.25	72.00	0.14	20.00	31.27	0.00	1.37
23	550	5.50	72.00	0.14	18.00	31.27	0.00	1.23
24	575	5.75	72.00	0.14	16.00	31.27	0.00	1.09
25	600	6.00	70.00	0.14	12.00	31.27	0.00	0.82
26	625	6.25	70.00	0.14	10.00	31.27	0.00	0.68
27	650	6.50	70.00	0.14	10.00	31.27	0.00	0.68
28	675	6.75	68.00	0.14	8.00	31.27	0.00	0.55
29	700	7.00	66.00	0.13	6.00	31.27	0.00	0.41
30	725	7.25	64.00	0.13	6.00	31.27	0.00	0.41
31	750	7.50	62.00	0.12	5.00	31.27	0.00	0.34
32	775	7.75	58.00	0.12	4.00	31.27	0.00	0.27
33	800	8.00	56.00	0.11	3.00	31.27	0.00	0.21
34	825	8.25	52.00	0.10	2.00	31.27	0.00	0.14
35	850	8.50	48.00	0.10	0.00	31.27	0.00	0.00
36	875	8.75	44.00	0.09	0.00	31.27	0.00	0.00
37	900	9.00	40.00	0.08	0.00	31.27	0.00	0.00

ตารางที่ 3 แสดงผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 1 น้ำหนักกดตั้งฉาก 12 กิโลกรัม

Direct Shear Test								
Load - Deformation Data								
Test Data	Horiz. Disp. (div.)	Horiz. Disp. (mm.)	Verti. Disp. (div.)	Verti. Disp. (mm.)	Prov. Read. (div.)	Corr Area (cm ²)	Horiz. Force (tons)	Shear Stress (t/m ²)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	31.27	0.00	0.00
2	25	0.25	66.00	0.13	142.00	31.27	0.03	9.72
3	50	0.50	84.00	0.17	181.00	31.27	0.04	12.39
4	75	0.75	98.00	0.20	202.00	31.27	0.04	13.82
5	100	1.00	108.00	0.22	215.00	31.27	0.05	14.71
6	125	1.25	120.00	0.24	220.00	31.27	0.05	15.06
7	150	1.50	126.00	0.25	221.00	31.27	0.05	15.12
8	175	1.75	134.00	0.27	219.00	31.27	0.05	14.99
9	200	2.00	142.00	0.28	217.00	31.27	0.05	14.85
10	225	2.25	148.00	0.30	214.00	31.27	0.05	14.64
11	250	2.50	156.00	0.31	212.00	31.27	0.05	14.51
12	275	2.75	164.00	0.33	210.00	31.27	0.04	14.37
13	300	3.00	170.00	0.34	208.00	31.27	0.04	14.23
14	325	3.25	178.00	0.36	206.00	31.27	0.04	14.10
15	350	3.50	184.00	0.37	205.00	31.27	0.04	14.03
16	375	3.75	190.00	0.38	203.00	31.27	0.04	13.89
17	400	4.00	196.00	0.39	202.00	31.27	0.04	13.82
18	425	4.25	202.00	0.40	201.00	31.27	0.04	13.76
19	450	4.50	212.00	0.42	200.00	31.27	0.04	13.69
20	475	4.75	220.00	0.44	199.00	31.27	0.04	13.62
21	500	5.00	228.00	0.46	198.00	31.27	0.04	13.55
22	525	5.25	234.00	0.47	197.00	31.27	0.04	13.48
23	550	5.50	240.00	0.48	196.00	31.27	0.04	13.41
24	575	5.75	246.00	0.49	196.00	31.27	0.04	13.41
25	600	6.00	254.00	0.51	195.00	31.27	0.04	13.34
26	625	6.25	260.00	0.52	195.00	31.27	0.04	13.34
27	650	6.50	266.00	0.53	194.00	31.27	0.04	13.28
28	675	6.75	272.00	0.54	194.00	31.27	0.04	13.28
29	700	7.00	278.00	0.56	194.00	31.27	0.04	13.28
30	725	7.25	284.00	0.57	194.00	31.27	0.04	13.28
31	750	7.50	292.00	0.58	193.00	31.27	0.04	13.21
32	775	7.75	300.00	0.60	193.00	31.27	0.04	13.21
33	800	8.00	306.00	0.61	192.00	31.27	0.04	13.14
34	825	8.25	314.00	0.63	191.00	31.27	0.04	13.07
35	850	8.50	322.00	0.64	187.00	31.27	0.04	12.80
36	875	8.75	328.00	0.66	186.00	31.27	0.04	12.73
37	900	9.00	336.00	0.67	186.00	31.27	0.04	12.73



ภาพที่ 33 ผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 2 โดยวิธีแรงเฉือนโดยตรง



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ของค่าหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงตั้งฉากเพื่อหาค่า c, ϕ ของดินชุดที่ 2

ตารางที่ 4 ผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 2 น้ำหนักกดตั้งจาก 3 กิโลกรัม

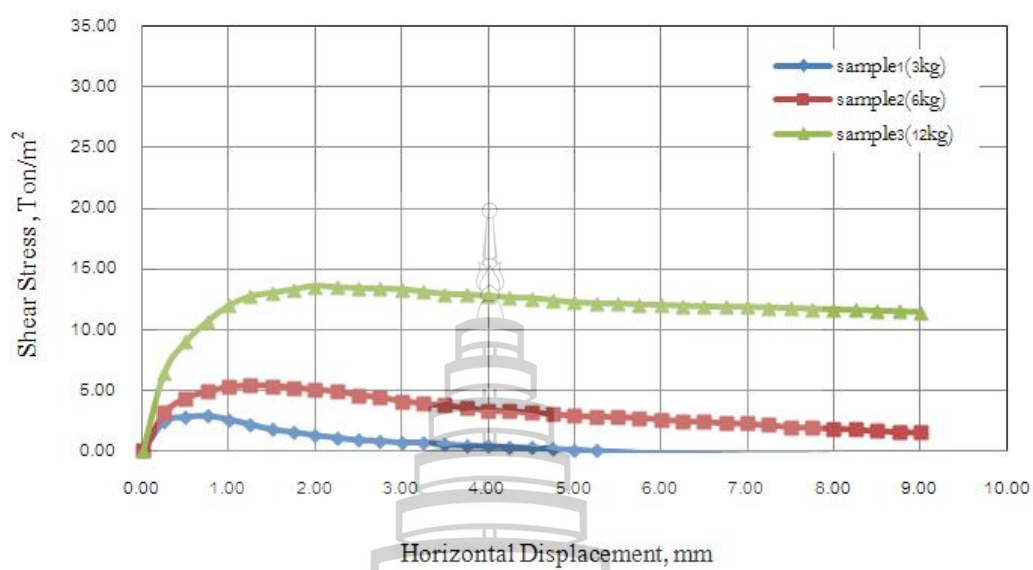
Direct Shear Test								
Load - Deformation Data								
Test Data	Horiz. Disp. (div.)	Horiz. Disp. (mm.)	Verti. Disp. (div.)	Verti. Disp. (mm.)	Prov. Read. (div.)	Corr Area (cm ²)	Horiz. Force (tons)	Shear Stress (t/m ²)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	31.27	0.00	0.00
2	25	0.25	34.00	0.07	57.00	31.67	0.01	3.85
3	50	0.50	180.00	0.36	169.00	32.07	0.04	11.28
4	75	0.75	264.00	0.53	209.00	32.49	0.04	13.77
5	100	1.00	332.00	0.66	239.00	32.92	0.05	15.54
6	125	1.25	444.00	0.89	254.00	33.36	0.05	16.30
7	150	1.50	574.00	1.15	250.00	33.81	0.05	15.83
8	175	1.75	688.00	1.38	230.00	34.27	0.05	14.36
9	200	2.00	776.00	1.55	193.00	34.75	0.04	11.89
10	225	2.25	824.00	1.65	167.00	35.24	0.04	10.14
11	250	2.50	868.00	1.74	152.00	35.74	0.03	9.10
12	275	2.75	892.00	1.78	140.00	36.26	0.03	8.26
13	300	3.00	918.00	1.84	126.00	36.79	0.03	7.33
14	325	3.25	942.00	1.88	119.00	37.34	0.03	6.82
15	350	3.50	962.00	1.92	110.00	37.90	0.02	6.21
16	375	3.75	982.00	1.96	106.00	38.49	0.02	5.89
17	400	4.00	1002.00	2.00	100.00	39.09	0.02	5.47
18	425	4.25	1018.00	2.04	97.00	39.71	0.02	5.23
19	450	4.50	1036.00	2.07	94.00	40.35	0.02	4.99
20	475	4.75	1058.00	2.12	90.00	41.01	0.02	4.70
21	500	5.00	1080.00	2.16	88.00	41.70	0.02	4.52
22	525	5.25	1102.00	2.20	87.00	42.40	0.02	4.39
23	550	5.50	1130.00	2.26	86.00	43.13	0.02	4.27
24	575	5.75	1154.00	2.31	85.00	43.89	0.02	4.14
25	600	6.00	1178.00	2.36	85.00	44.67	0.02	4.07
26	625	6.25	1186.00	2.37	75.00	45.49	0.02	3.53
27	650	6.50	1196.00	2.39	70.00	46.33	0.01	3.23
28	675	6.75	1202.00	2.40	67.00	47.20	0.01	3.04
29	700	7.00	1212.00	2.42	64.00	48.11	0.01	2.85
30	725	7.25	1220.00	2.44	60.00	49.05	0.01	2.62
31	750	7.50	1230.00	2.46	58.00	50.03	0.01	2.48
32	775	7.75	1240.00	2.48	57.00	51.06	0.01	2.39
33	800	8.00	1248.00	2.50	55.00	52.12	0.01	2.26
34	825	8.25	1258.00	2.52	54.00	53.23	0.01	2.17
35	850	8.50	1264.00	2.53	53.00	54.39	0.01	2.09
36	875	8.75	1274.00	2.55	52.00	55.59	0.01	2.00
37	900	9.00	1280.00	2.56	50.00	56.86	0.01	1.88

ตารางที่ ๓๕ ผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 2 น้ำหนักกดตั้งฉาก 6 กิโลกรัม

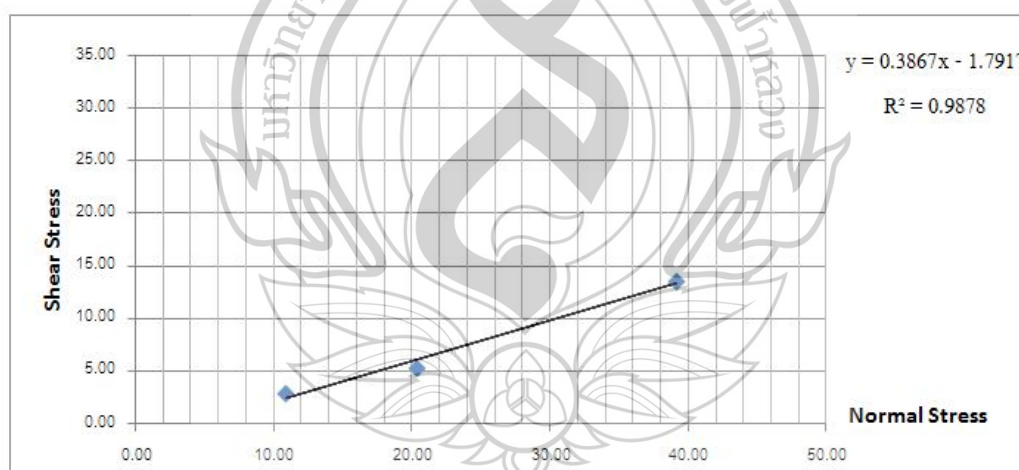
Direct Shear Test								
Load - Deformation Data								
Test Data	Horiz. Disp. (div.)	Horiz. Disp. (mm.)	Verti. Disp. (div.)	Verti. Disp. (mm.)	Prov. Read. (div.)	Corr Area (cm ²)	Horiz. Force (tons)	Shear Stress (t/m ²)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	31.27	0.00	0.00
2	25	0.25	70.00	0.14	20.00	31.40	0.00	1.36
3	50	0.50	140.00	0.28	80.00	31.52	0.02	5.43
4	75	0.75	164.00	0.33	148.00	31.65	0.03	10.01
5	100	1.00	250.00	0.50	178.00	31.78	0.04	11.99
6	125	1.25	298.00	0.60	186.00	31.90	0.04	12.48
7	150	1.50	264.00	0.53	45.00	32.03	0.01	3.01
8	175	1.75	264.00	0.53	45.00	32.16	0.01	2.99
9	200	2.00	250.00	0.50	30.00	32.30	0.01	1.99
10	225	2.25	222.00	0.44	20.00	32.43	0.00	1.32
11	250	2.50	222.00	0.44	12.00	32.56	0.00	0.79
12	275	2.75	210.00	0.42	2.00	32.70	0.00	0.13
13	300	3.00	200.00	0.40	-5.00	32.83	0.00	-0.33
14	325	3.25	196.00	0.39	-10.00	32.97	0.00	-0.65
15	350	3.50	188.00	0.38	-15.00	33.11	0.00	-0.97
16	375	3.75	180.00	0.36	-17.00	33.25	0.00	-1.09
17	400	4.00	175.00	0.35	-20.00	33.39	0.00	-1.28
18	425	4.25	169.00	0.34	-25.00	33.53	-0.01	-1.60
19	450	4.50	160.00	0.32	-28.00	33.67	-0.01	-1.78
20	475	4.75	158.00	0.32	-30.00	33.82	-0.01	-1.90
21	500	5.00	150.00	0.30	-31.00	33.96	-0.01	-1.95
22	525	5.25	145.00	0.29	-35.00	34.11	-0.01	-2.20
23	550	5.50	140.00	0.28	-38.00	34.26	-0.01	-2.37
24	575	5.75	138.00	0.28	-39.00	34.41	-0.01	-2.43
25	600	6.00	130.00	0.26	-40.00	34.56	-0.01	-2.48
26	625	6.25	125.00	0.25	-42.00	34.71	-0.01	-2.59
27	650	6.50	120.00	0.24	-44.00	34.86	-0.01	-2.70
28	675	6.75	115.00	0.23	-45.00	35.02	-0.01	-2.75
29	700	7.00	110.00	0.22	-45.00	35.17	-0.01	-2.74
30	725	7.25	105.00	0.21	-48.00	35.33	-0.01	-2.91
31	750	7.50	100.00	0.20	-49.00	35.49	-0.01	-2.95
32	775	7.75	98.00	0.20	-49.00	35.65	-0.01	-2.94
33	800	8.00	90.00	0.18	-50.00	35.81	-0.01	-2.99
34	825	8.25	88.00	0.18	-50.00	35.98	-0.01	-2.97
35	850	8.50	89.00	0.18	-50.00	36.14	-0.01	-2.96
36	875	8.75	95.00	0.19	-50.00	36.31	-0.01	-2.95
37	900	9.00	100.00	0.20	-51.00	36.47	-0.01	-2.99

ตารางที่ ง6 ผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 2 น้ำหนักกดตั้งฉาก 12 กิโลกรัม

Direct Shear Test								
Load - Deformation Data								
Test Data	Horiz. Disp. (div.)	Horiz. Disp. (mm.)	Verti. Disp. (div.)	Verti. Disp. (mm.)	Prov. Read. (div.)	Corr Area (cm ²)	Horiz. Force (tons)	Shear Stress (t/m ²)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	31.27	0.00	0.00
2	25	0.25	95.00	0.19	325.00	31.40	0.07	22.15
3	50	0.50	148.00	0.30	370.00	31.52	0.08	25.12
4	75	0.75	200.00	0.40	401.00	31.65	0.09	27.12
5	100	1.00	242.00	0.48	420.00	31.78	0.09	28.29
6	125	1.25	270.00	0.54	400.00	31.90	0.09	26.83
7	150	1.50	280.00	0.56	368.00	32.03	0.08	24.58
8	175	1.75	288.00	0.58	345.00	32.16	0.07	22.95
9	200	2.00	294.00	0.59	330.00	32.30	0.07	21.87
10	225	2.25	296.00	0.59	321.00	32.43	0.07	21.18
11	250	2.50	296.00	0.59	308.00	32.56	0.07	20.24
12	275	2.75	296.00	0.59	294.00	32.70	0.06	19.24
13	300	3.00	296.00	0.59	282.00	32.83	0.06	18.38
14	325	3.25	296.00	0.59	274.00	32.97	0.06	17.78
15	350	3.50	296.00	0.59	269.00	33.11	0.06	17.39
16	375	3.75	296.00	0.59	263.00	33.25	0.06	16.93
17	400	4.00	294.00	0.59	257.00	33.39	0.05	16.47
18	425	4.25	292.00	0.58	248.00	33.53	0.05	15.83
19	450	4.50	290.00	0.58	240.00	33.67	0.05	15.25
20	475	4.75	284.00	0.57	236.00	33.82	0.05	14.93
21	500	5.00	284.00	0.57	230.00	33.96	0.05	14.49
22	525	5.25	282.00	0.56	226.00	34.11	0.05	14.18
23	550	5.50	280.00	0.56	223.00	34.26	0.05	13.93
24	575	5.75	276.00	0.55	222.00	34.41	0.05	13.81
25	600	6.00	272.00	0.54	221.00	34.56	0.05	13.69
26	625	6.25	266.00	0.53	221.00	34.71	0.05	13.63
27	650	6.50	260.00	0.52	221.00	34.86	0.05	13.57
28	675	6.75	250.00	0.50	220.00	35.02	0.05	13.44
29	700	7.00	240.00	0.48	218.00	35.17	0.05	13.26
30	725	7.25	234.00	0.47	216.00	35.33	0.05	13.08
31	750	7.50	224.00	0.45	213.00	35.49	0.05	12.84
32	775	7.75	220.00	0.44	212.00	35.65	0.05	12.73
33	800	8.00	212.00	0.42	212.00	35.81	0.05	12.67
34	825	8.25	208.00	0.42	212.00	35.98	0.05	12.61
35	850	8.50	206.00	0.41	211.00	36.14	0.05	12.49
36	875	8.75	202.00	0.40	211.00	36.31	0.05	12.44
37	900	9.00	200.00	0.40	210.00	36.47	0.04	12.32



ภาพที่ ๖๕ ผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 3 โดยวิธีแรงเฉือนโดยตรง



ภาพที่ ๖๖ ความสัมพันธ์ของค่าหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงตั้งฉากเพื่อหาค่า c, ϕ ของดินชุดที่ 3

ตารางที่ ๗ ผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 3 น้ำหนักกดตั้งฉาก 3 กิโลกรัม

Direct Shear Test								
Load - Deformation Data								
Test Data	Horiz. Disp. (div.)	Horiz. Disp. (mm.)	Verti. Disp. (div.)	Verti. Disp. (mm.)	Prov. Read. (div.)	Corr Area (cm ²)	Horiz. Force (tons)	Shear Stress (t/m ²)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	31.27	0.00	0.00
2	25	0.25	16.00	0.03	36.00	31.67	0.01	2.43
3	50	0.50	30.00	0.06	42.00	32.07	0.01	2.80
4	75	0.75	42.00	0.08	44.00	32.49	0.01	2.90
5	100	1.00	52.00	0.10	40.00	32.92	0.01	2.60
6	125	1.25	60.00	0.12	34.00	33.36	0.01	2.18
7	150	1.50	68.00	0.14	28.00	33.81	0.01	1.77
8	175	1.75	78.00	0.16	25.00	34.27	0.01	1.56
9	200	2.00	92.00	0.18	21.00	34.75	0.00	1.29
10	225	2.25	104.00	0.21	18.00	35.24	0.00	1.09
11	250	2.50	118.00	0.24	15.00	35.74	0.00	0.90
12	275	2.75	130.00	0.26	14.00	36.26	0.00	0.83
13	300	3.00	144.00	0.29	12.00	36.79	0.00	0.70
14	325	3.25	162.00	0.32	12.00	37.34	0.00	0.69
15	350	3.50	180.00	0.36	10.00	37.90	0.00	0.56
16	375	3.75	198.00	0.40	8.00	38.49	0.00	0.44
17	400	4.00	212.00	0.42	7.00	39.09	0.00	0.38
18	425	4.25	226.00	0.45	6.00	39.71	0.00	0.32
19	450	4.50	238.00	0.48	5.00	40.35	0.00	0.27
20	475	4.75	252.00	0.50	3.00	41.01	0.00	0.16
21	500	5.00	268.00	0.54	2.00	41.70	0.00	0.10
22	525	5.25	282.00	0.56	0.00	42.40	0.00	0.00
23	550	5.50	300.00	0.60	-1.00	43.13	0.00	-0.05
24	575	5.75	317.00	0.63	-3.00	43.89	0.00	-0.15
25	600	6.00	335.00	0.67	-4.00	44.67	0.00	-0.19
26	625	6.25	354.00	0.71	-5.00	45.49	0.00	-0.24
27	650	6.50	376.00	0.75	-6.00	46.33	0.00	-0.28
28	675	6.75	396.00	0.79	-7.00	47.20	0.00	-0.32
29	700	7.00	408.00	0.82	-8.00	48.11	0.00	-0.36
30	725	7.25	418.00	0.84	-8.00	49.05	0.00	-0.35
31	750	7.50	426.00	0.85	-8.00	50.03	0.00	-0.34
32	775	7.75	436.00	0.87	-9.00	51.06	0.00	-0.38
33	800	8.00	448.00	0.90	-10.00	52.12	0.00	-0.41
34	825	8.25	460.00	0.92	-10.00	53.23	0.00	-0.40
35	850	8.50	468.00	0.94	-11.00	54.39	0.00	-0.43
36	875	8.75	476.00	0.95	-11.00	55.59	0.00	-0.42
37	900	9.00	476.00	0.95	-11.00	56.86	0.00	-0.41

ตารางที่ ง8 ผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 3 น้ำหนักกดตั้งฉาก 6 กิโลกรัม

Direct Shear Test								
Load - Deformation Data								
Test Data	Horiz.	Horiz.	Verti.	Verti.	Prov.	Corr	Horiz.	Shear
	Disp.	Disp.	Disp.	Disp.	Read.	Area	Force	Stress
	(div.)	(mm.)	(div.)	(mm.)	(div.)	(cm ²)	(tons)	(t/m ²)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	31.27	0.00	0.00
2	25	0.25	18.00	0.04	46.00	31.40	0.01	3.14
3	50	0.50	28.00	0.06	64.00	31.52	0.01	4.35
4	75	0.75	40.00	0.08	72.00	31.65	0.02	4.87
5	100	1.00	55.00	0.11	78.00	31.78	0.02	5.25
6	125	1.25	68.00	0.14	80.00	31.90	0.02	5.37
7	150	1.50	85.00	0.17	80.00	32.03	0.02	5.34
8	175	1.75	92.00	0.18	78.00	32.16	0.02	5.19
9	200	2.00	105.00	0.21	76.00	32.30	0.02	5.04
10	225	2.25	120.00	0.24	74.00	32.43	0.02	4.88
11	250	2.50	130.00	0.26	70.00	32.56	0.01	4.60
12	275	2.75	140.00	0.28	67.00	32.70	0.01	4.39
13	300	3.00	150.00	0.30	63.00	32.83	0.01	4.11
14	325	3.25	158.00	0.32	60.00	32.97	0.01	3.89
15	350	3.50	162.00	0.32	58.00	33.11	0.01	3.75
16	375	3.75	170.00	0.34	55.00	33.25	0.01	3.54
17	400	4.00	178.00	0.36	52.00	33.39	0.01	3.33
18	425	4.25	180.00	0.36	51.00	33.53	0.01	3.26
19	450	4.50	188.00	0.38	50.00	33.67	0.01	3.18
20	475	4.75	190.00	0.38	48.00	33.82	0.01	3.04
21	500	5.00	200.00	0.40	46.00	33.96	0.01	2.90
22	525	5.25	210.00	0.42	45.00	34.11	0.01	2.82
23	550	5.50	220.00	0.44	45.00	34.26	0.01	2.81
24	575	5.75	228.00	0.46	44.00	34.41	0.01	2.74
25	600	6.00	240.00	0.48	42.00	34.56	0.01	2.60
26	625	6.25	249.00	0.50	40.00	34.71	0.01	2.47
27	650	6.50	258.00	0.52	39.00	34.86	0.01	2.39
28	675	6.75	266.00	0.53	38.00	35.02	0.01	2.32
29	700	7.00	270.00	0.54	37.00	35.17	0.01	2.25
30	725	7.25	278.00	0.56	35.00	35.33	0.01	2.12
31	750	7.50	280.00	0.56	33.00	35.49	0.01	1.99
32	775	7.75	282.00	0.56	32.00	35.65	0.01	1.92
33	800	8.00	285.00	0.57	31.00	35.81	0.01	1.85
34	825	8.25	290.00	0.58	30.00	35.98	0.01	1.78
35	850	8.50	292.00	0.58	28.00	36.14	0.01	1.66
36	875	8.75	298.00	0.60	27.00	36.31	0.01	1.59
37	900	9.00	302.00	0.60	26.00	36.47	0.01	1.53

ตารางที่ ๙ ผลทดสอบค่าสมบัติมวลดินชุดที่ 3 น้ำหนักกดตั้งฉาก 12 กิโลกรัม

Direct Shear Test								
Load - Deformation Data								
Test Data	Horiz. Disp. (div.)	Horiz. Disp. (mm.)	Verti. Disp. (div.)	Verti. Disp. (mm.)	Prov. Read. (div.)	Corr Area (cm ²)	Horiz. Force (tons)	Shear Stress (t/m ²)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	31.27	0.00	0.00
2	25	0.25	62.00	0.12	95.00	31.40	0.02	6.48
3	50	0.50	100.00	0.20	133.00	31.52	0.03	9.03
4	75	0.75	125.00	0.25	158.00	31.65	0.03	10.68
5	100	1.00	144.00	0.29	178.00	31.78	0.04	11.99
6	125	1.25	160.00	0.32	190.00	31.90	0.04	12.74
7	150	1.50	170.00	0.34	195.00	32.03	0.04	13.03
8	175	1.75	180.00	0.36	200.00	32.16	0.04	13.31
9	200	2.00	180.00	0.36	205.00	32.30	0.04	13.58
10	225	2.25	180.00	0.36	204.00	32.43	0.04	13.46
11	250	2.50	180.00	0.36	204.00	32.56	0.04	13.41
12	275	2.75	180.00	0.36	204.00	32.70	0.04	13.35
13	300	3.00	180.00	0.36	204.00	32.83	0.04	13.30
14	325	3.25	180.00	0.36	202.00	32.97	0.04	13.11
15	350	3.50	180.00	0.36	200.00	33.11	0.04	12.93
16	375	3.75	180.00	0.36	200.00	33.25	0.04	12.87
17	400	4.00	180.00	0.36	199.00	33.39	0.04	12.75
18	425	4.25	180.00	0.36	198.00	33.53	0.04	12.64
19	450	4.50	180.00	0.36	198.00	33.67	0.04	12.58
20	475	4.75	180.00	0.36	196.00	33.82	0.04	12.40
21	500	5.00	180.00	0.36	194.00	33.96	0.04	12.22
22	525	5.25	180.00	0.36	194.00	34.11	0.04	12.17
23	550	5.50	180.00	0.36	194.00	34.26	0.04	12.12
24	575	5.75	180.00	0.36	194.00	34.41	0.04	12.07
25	600	6.00	180.00	0.36	194.00	34.56	0.04	12.01
26	625	6.25	250.00	0.50	194.00	34.71	0.04	11.96
27	650	6.50	254.00	0.51	194.00	34.86	0.04	11.91
28	675	6.75	255.00	0.51	194.00	35.02	0.04	11.86
29	700	7.00	258.00	0.52	195.00	35.17	0.04	11.86
30	725	7.25	259.00	0.52	195.00	35.33	0.04	11.81
31	750	7.50	260.00	0.52	195.00	35.49	0.04	11.76
32	775	7.75	260.00	0.52	195.00	35.65	0.04	11.71
33	800	8.00	260.00	0.52	195.00	35.81	0.04	11.65
34	825	8.25	260.00	0.52	195.00	35.98	0.04	11.60
35	850	8.50	262.00	0.52	195.00	36.14	0.04	11.55
36	875	8.75	265.00	0.53	195.00	36.31	0.04	11.49
37	900	9.00	265.00	0.53	195.00	36.47	0.04	11.44

ภาคผนวก จ

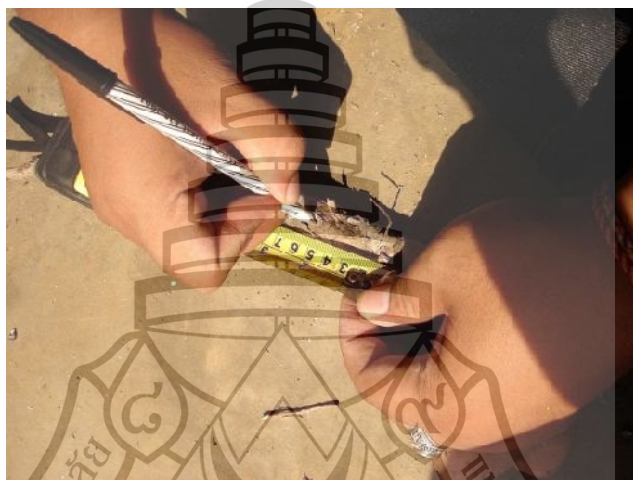
ผลการทดสอบแรงดึงรากประสานดินในภาคสนาม

ผลรวมค่า C_R เท่ากับ 0.893 ตันต่อตารางเมตร

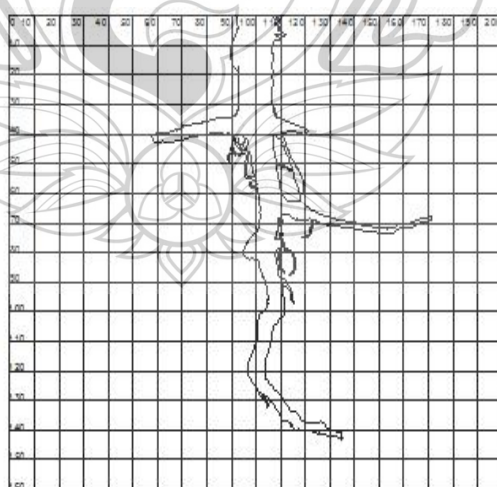
รากสั้นตั้ง 3 รากแก้ว										
ระยะซิด	ค่าที่อ่านได้จากเกจความดัน	ค่าแรงที่ทดสอบที่ขีบ	$A_R = \sum A_{Ri} (m^2)$	$A (m^2)$	$T_{Ri} (tonf/sq.m)$	$\tan \theta$	(RAR)	T_R	t_r	C_R $= t_r * RAR$
L(cm)	Pressure, p (ksc)	$F_{Ri} (tonf)$								
0	0	0.0000	1.0157	8.8125	0.0000	0.6368		0.0000	0.0000	0.0000
2	136	1.5420	1.0157	8.8125	1.5181	0.6368		0.1750	0.2100	0.0242
4	229	2.5966	1.0157	8.8125	2.5564	0.6368		0.2947	0.3536	0.0408
6	281	3.1863	1.0157	8.8125	3.1369	0.6368		0.3616	0.4339	0.0500
8	283	3.2090	1.0157	8.8125	3.1593	0.6368		0.3641	0.4370	0.0504
10	230	2.6080	1.0157	8.8125	2.5676	0.6368		0.2959	0.3551	0.0409
12	192	2.1771	1.0157	8.8125	2.1433	0.6368		0.2470	0.2965	0.0342
14	122	1.3833	1.0157	8.8125	1.3618	0.6368		0.1570	0.1884	0.0217
16	120	1.3606	1.0157	8.8125	1.3395	0.6368		0.1544	0.1853	0.0214
18	120	1.3606	1.0157	8.8125	1.3395	0.6368		0.1544	0.1853	0.0214
20	100	1.1338	1.0157	8.8125	1.1162	0.6368		0.1287	0.1544	0.0178
22	100	1.1338	1.0157	8.8125	1.1162	0.6368		0.1287	0.1544	0.0178
24	80	0.9070	1.0157	8.8125	0.8929	0.6368		0.1029	0.1235	0.0142
26	80	0.9070	1.0157	8.8125	0.8929	0.6368		0.1029	0.1235	0.0142
28	55	0.6235	1.0157	8.8125	0.6138	0.6368		0.0707	0.0849	0.0098
30	55	0.6235	1.0157	8.8125	0.6138	0.6368		0.0707	0.0849	0.0098
32	55	0.6235	1.0157	8.8125	0.6138	0.6368		0.0707	0.0849	0.0098
34	55	0.6235	1.0157	8.8125	0.6138	0.6368		0.0707	0.0849	0.0098
36	50	0.5668	1.0157	8.8125	0.5580	0.6368		0.0643	0.0772	0.0089
38	50	0.5668	1.0157	8.8125	0.5580	0.6368		0.0643	0.0772	0.0089
40	45	0.5101	1.0157	8.8125	0.5022	0.6368		0.0579	0.0695	0.0080
42	45	0.5101	1.0157	8.8125	0.5022	0.6368		0.0579	0.0695	0.0080
44	40	0.4534	1.0157	8.8125	0.4463	0.6368		0.0514	0.0617	0.0071
46	40	0.4534	1.0157	8.8125	0.4463	0.6368		0.0514	0.0617	0.0071
48	35	0.3967	1.0157	8.8125	0.3905	0.6368		0.0450	0.0540	0.0062
50	35	0.3967	1.0157	8.8125	0.3905	0.6368		0.0450	0.0540	0.0062
52	30	0.3400	1.0157	8.8125	0.3347	0.6368		0.0386	0.0463	0.0050
54	25	0.2833	1.0157	8.8125	0.2789	0.6368		0.0321	0.0386	0.0040
56	25	0.2833	1.0157	8.8125	0.2789	0.6368		0.0321	0.0386	0.0040
58	20	0.2266	1.0157	8.8125	0.2231	0.6368		0.0257	0.0309	0.0030
60	20	0.2266	1.0157	8.8125	0.2231	0.6368		0.0257	0.0309	0.0030
54	10	0.1132	1.0157	8.8125	0.1114	0.6368		0.0128	0.0154	0.0000
56	10	0.1132	1.0157	8.8125	0.1114	0.6368		0.0128	0.0154	0.0000
58	0	0.0000	1.0157	8.8125	0.0000	0.6368		0.0000	0.0000	0.0000
60	0	0.0000	1.0157	8.8125	0.0000	0.6368		0.0000	0.0000	0.0000

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบการกระจายตัวของรากต้นไม้

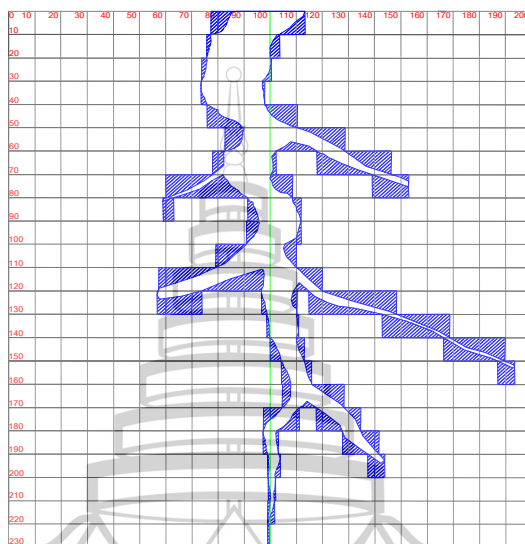


ภาพที่ จ1 ขั้นตอนการวัดความยาวของรากต้นไม้ที่ระยะ 10 เซนติเมตร

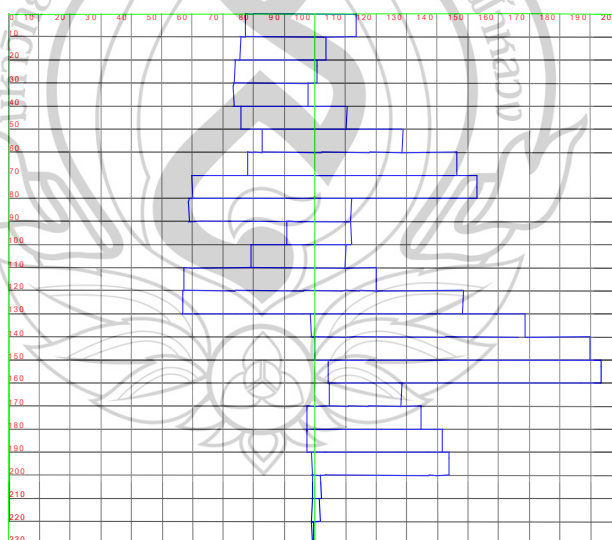


ภาพที่ จ2 ลักษณะการกระจายตัวของรากต้นไม้

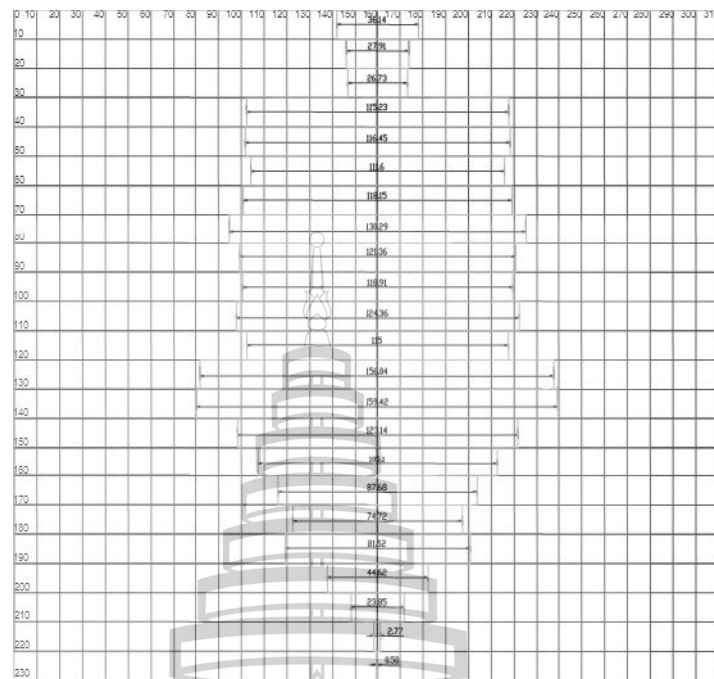
เมื่อได้ลักษณะของการกระจายตัวของรากต้นไม้แล้ว ทำการสร้างบล็อกการกระจายตัวของรากในแต่ละช่วงชั้น และทำการเฉลี่ยบล็อกการกระจายตัวของรากในแต่ละชั้นของการกระจายตัวทั้ง 4 ด้าน ดังภาพที่ น3 ถึง น4



ภาพที่ น3 สร้างบล็อกการกระจายตัวของรากในแต่ละชั้น

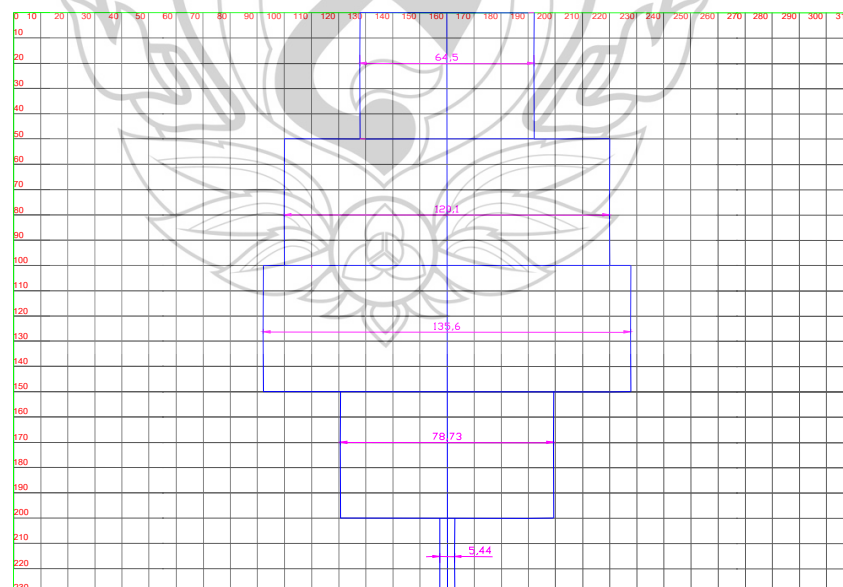


ภาพที่ น4 บล็อกการกระจายตัวของรากต้นไม้



ภาพที่ ๑๕ บล็อกการกระจายตัวของรากที่เฉลี่ยแล้ว

จากภาพที่ ๑๕ ได้ปรับแบบจำลองลักษณะการกระจายตัวของรากต้นไม้มเพื่อให้สอดคล้องกับการลักษณะการเก็บตัวอย่างชั้นดินที่ทดสอบ ทำการเฉลี่ยที่ทุกความลึก 0.50 ดังภาพที่ ๑๖

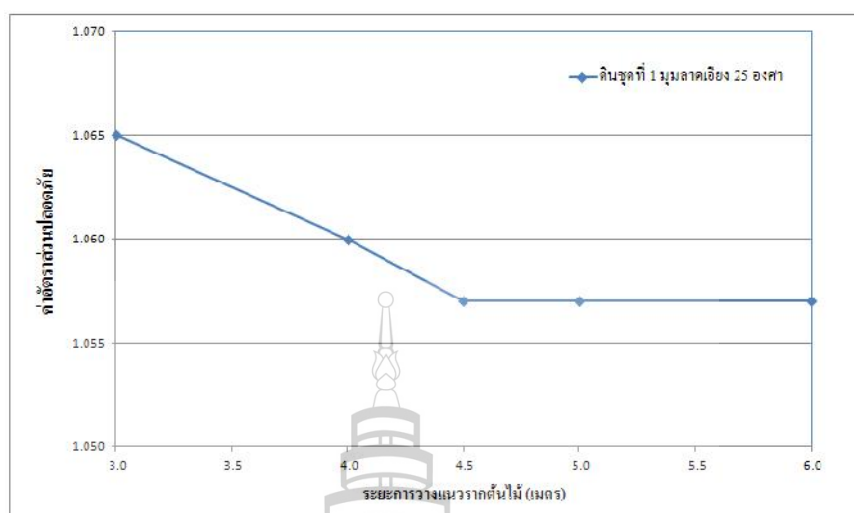


ภาพที่ ๑๖ บล็อกการกระจายตัวของรากเฉลี่ยทุกความลึก 0.50 เมตร

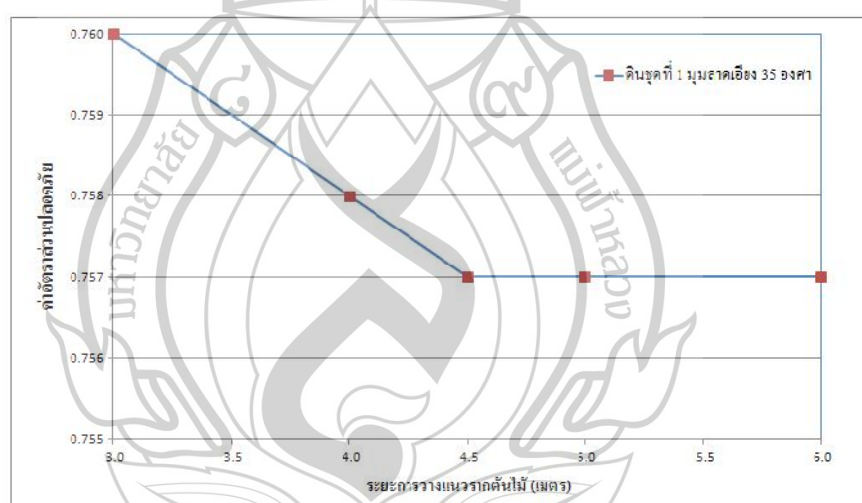
ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบเพื่อกำหนดวางแผนระยะห่างของรากต้นไม้ในแบบจำลอง

ในการศึกษาสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้ที่มีผลต่อการเสถียรภาพของลาดดินภายใต้สภาวะการไหลของน้ำซึมผ่านมวลดิน ในการคำนวณหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่หลังมีการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้จะขึ้นอยู่กับค่าความเชื่อมั่นที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเสริมกำลังรากและระยะห่างของการวางรากต้นไม้ ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการทดสอบในภาคสนามเพื่อเก็บลักษณะการกระจายตัวของรากและคำนวณหาแรงดึงรากต้นไม้ประสานมวลดิน ในรูปของค่าคงที่ C_R ดังนั้นจึงต้องทราบถึงระยะห่างที่มีผลต่อการคำนวณหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย ในการศึกษาจึงได้ทำการทดสอบเพื่อหาระยะห่างการจัดวางรากต้นไม้ที่มีผลต่อการทดสอบแบบจำลอง โดยใช้ค่าในการทดสอบ เท่ากับ 3.0, 4.0, 4.5, 5.0 และ 6.0 เมตร เป็นตัวแทนสำหรับเลือกพารามิเตอร์ในการศึกษา ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการทดสอบเพื่อหาระยะห่างการจัดวางรากต้นไม้ที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย ดังแสดงในภาพที่ ข1 และ ข2 โดยเลือกกำหนดการศึกษาที่มุมลาดเอียง เท่ากับ 25 และ 35 องศา สำหรับการทดสอบตัวอย่างดินชุดที่ 1 ที่มีลักษณะสมบัติทางกายภาพด้านกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ พบว่า ระยะห่างการจัดวางรากต้นไม้ที่น้อยกว่า 4.5 เมตรมีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย และในการศึกษานี้จึงเลือกกำหนดระยะห่างการจัดวางรากต้นไม้ เท่ากับ 4.5 เมตร



ภาพที่ ข1 การทดสอบเพื่อเลือกตัวแทนระยะทางการจัดวางรากต้นไม้สำหรับมุมลาดเอียง 25 องศา



ภาพที่ ข2 การทดสอบเพื่อเลือกตัวแทนระยะทางการจัดวางรากต้นไม้สำหรับมุมลาดเอียง 35 องศา

ภาคผนวก ข

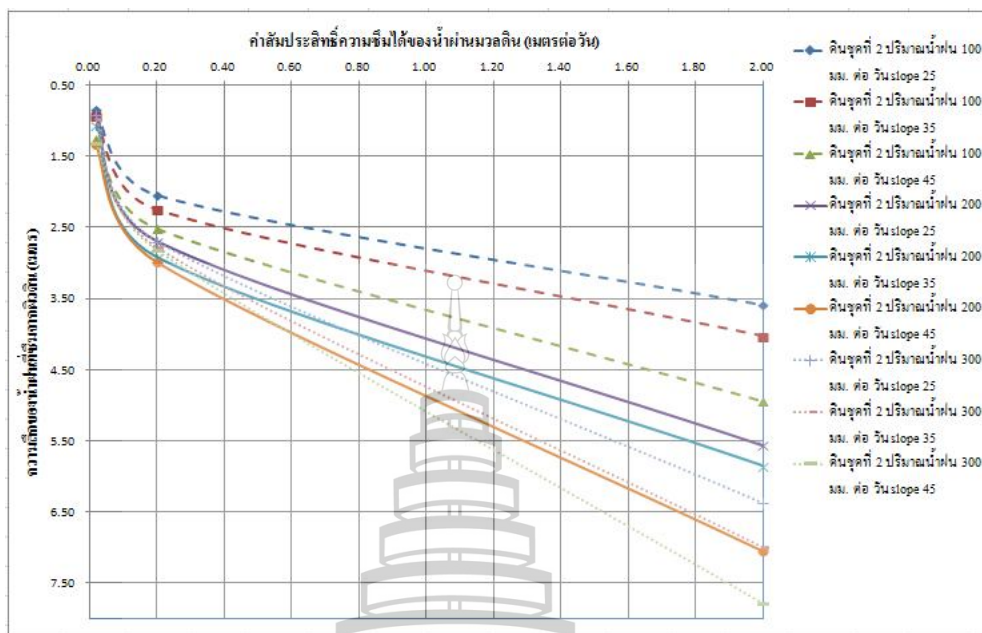
**รายละเอียดผลการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลของน้ำในมวลดิน
ของก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้บนลาดเอียง**

ตารางที่ ข1 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของการไหลของน้ำผ่านมวลดินเพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นใน
แบบจำลองก่อนเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

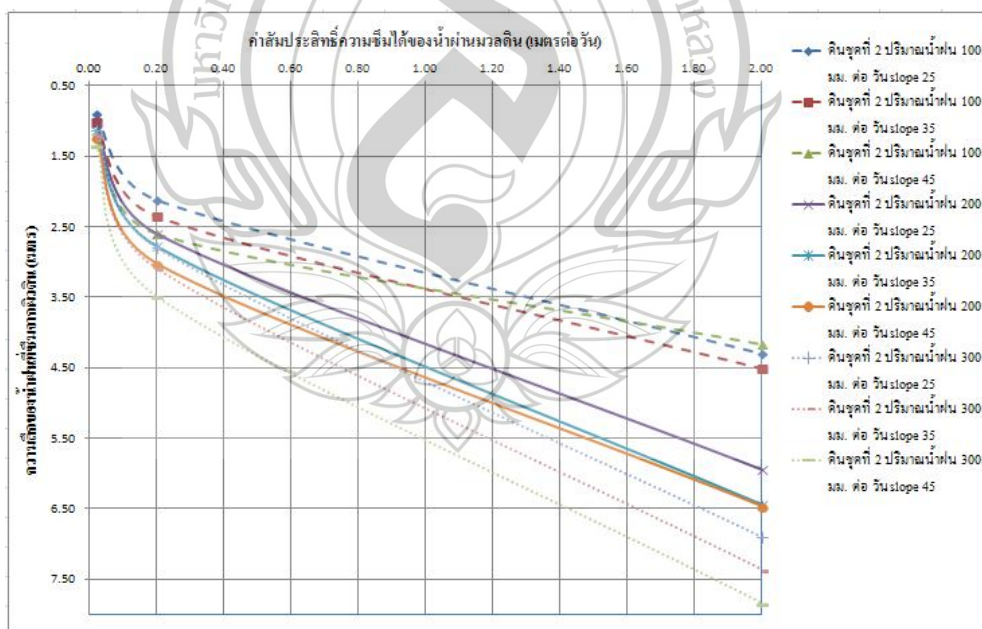
ความลึกของน้ำฝนที่ซึมลงโดเมนที่ศึกษา (เมตร) สำหรับดินชุดตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3								
ปริมาณน้ำฝนความเข้มเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน ณ ช่วงเวลาสูงสุด 5 วัน								
มุมลาดเอียง 25 องศา			มุมลาดเอียง 35 องศา			มุมลาดเอียง 45 องศา		
ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0
1.03	2.00	3.82	0.96	1.98	4.39	1.25	2.55	4.93
0.84	2.04	3.59	0.94	2.25	4.03	1.25	2.51	4.94
0.84	2.07	3.75	1.01	2.40	4.42	1.31	2.54	4.83
ปริมาณน้ำฝนความเข้มเท่ากับ 200 มิลลิเมตรต่อวัน ณ ช่วงเวลาสูงสุด 5 วัน								
มุมลาดเอียง 25 องศา			มุมลาดเอียง 35 องศา			มุมลาดเอียง 45 องศา		
ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0
1.09	2.67	5.76	1.01	3.00	6.44	1.44	3.27	7.23
0.89	2.69	5.56	1.07	2.92	5.85	1.33	2.98	7.05
0.89	2.69	5.85	1.04	2.95	6.00	1.27	2.99	7.31
ปริมาณน้ำฝนความเข้มเท่ากับ 300 มิลลิเมตรต่อวัน ณ ช่วงเวลาสูงสุด 5 วัน								
มุมลาดเอียง 25 องศา			มุมลาดเอียง 35 องศา			มุมลาดเอียง 45 องศา		
ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0
1.30	2.89	6.56	1.07	2.76	6.99	1.33	2.72	5.92
0.92	2.69	6.37	0.97	2.77	6.99	1.31	2.81	7.78
0.88	2.58	6.60	0.97	2.81	7.09	1.41	2.71	8.09

ตารางที่ ข2 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของการไหลของน้ำผ่านมวลดินเพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นใน
แบบจำลองหลังเสริมกำลังด้วยรากค้ำไม่สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

ความลึกของน้ำฝนที่ซึมลงโดเมนที่ศึกษา (เมตร) สำหรับดินชุดตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3								
ปริมาณน้ำฝนความเข้มเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวัน ณ ช่วงเวลาสูงสุด 5 วัน								
มวลลาดเอียง 25 องศา			มวลลาดเอียง 35 องศา			มวลลาดเอียง 45 องศา		
ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0
0.91	2.15	4.19	1.01	2.40	4.55	1.18	2.98	4.02
0.90	2.12	4.30	1.02	2.36	4.52	1.20	2.60	4.17
0.92	2.22	4.21	1.03	2.36	4.56	1.18	2.61	3.92
ปริมาณน้ำฝนความเข้มเท่ากับ 200 มิลลิเมตรต่อวัน ณ ช่วงเวลาสูงสุด 5 วัน								
มวลลาดเอียง 25 องศา			มวลลาดเอียง 35 องศา			มวลลาดเอียง 45 องศา		
ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0
1.04	2.63	5.91	1.16	2.86	6.32	1.29	3.06	6.35
1.04	2.60	5.94	1.13	2.78	6.45	1.25	3.03	6.47
1.05	2.59	5.87	1.18	2.78	6.54	1.27	2.83	6.49
ปริมาณน้ำฝนความเข้มเท่ากับ 300 มิลลิเมตรต่อวัน ณ ช่วงเวลาสูงสุด 5 วัน								
มวลลาดเอียง 25 องศา			มวลลาดเอียง 35 องศา			มวลลาดเอียง 45 องศา		
ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0	ks = 0.02	ks = 0.20	ks = 2.0
1.12	2.76	6.85	1.25	3.03	7.48	1.41	3.32	7.89
1.13	2.80	6.90	1.21	3.09	7.37	1.35	3.50	7.85
1.14	2.90	6.83	1.21	3.04	7.54	1.35	3.54	7.60



ภาพที่ ข1 ผลการศึกษาความลึกของการไหลของน้ำผ่านมวลดินจากผิวดินเพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นในแบบจำลองก่อนเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน



ภาพที่ ข2 ผลการศึกษาความลึกของการไหลของน้ำผ่านมวลดินจากผิวดินเพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นในแบบจำลองหลังเสริมกำลังด้วยรากต้นไม้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

ภาคผนวก ฅ

รายละเอียดโปรแกรมสำหรับจำลองการไหลของน้ำผ่านมวลดิน และวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

1. รายละเอียดโปรแกรมเพื่อสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำผ่านมวลดิน

เมื่อได้ชุดข้อมูลต่างๆบนระนาบใน 2 มิติ ในทุกหน้าตัดของลาดเอียงแล้วนำข้อมูลชุดนี้เข้าสู่ซอฟต์แวร์ COMSOL และบันทึกรายละเอียดรูปแบบ M-file เพื่อเรียกคำสั่งต่อไป และสามารถนำกลับมาแก้ไขในภายหลังในซอฟต์แวร์ MATLAB โดยมีรายละเอียดของโปรแกรมดังนี้

```
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Some geometry objects are stored in a separate file.
%
flclear fem
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.5';
vrsn.ext = 'a';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 603;
vrsn.rcs = '$Name: $';
fem.version = vrsn;
flbinaryfile='';
% Constants
fem.const = {'rho_s','1920[kg/m^3]', ...
    'rho_f','1000[kg/m^3]', ...
    'C0','1790[kg/m^2]', ...
    'phi','18.66*pi[rad]/180', ...
    'FSfold','5', ...
    'theta','25*pi[rad]/180', ...
```

```

'n1','50');

% Geometry

clear draw

g3=flbinary('g3','draw',flbinaryfile);

draw.s.objs = {g3};

draw.s.name = {'CO1'};

draw.s.tags = {'g3'};

fem.draw = draw;

fem.geom = geomcsg(fem);

fem.mesh = flbinary('m1','mesh',flbinaryfile);

% Application mode 1

clear appl

appl.mode.class = 'Richards_equation';

appl.mode.type = 'cartesian';

appl.dim = {'p'};

appl.sdim = {'x','y','z'};

appl.name = 'esvr';

appl.module = 'ES';

appl.shape = {'shlag(2,"p')'};

appl.gporder = 4;

appl.cporder = 2;

appl.sshape = 2;

appl.border = 'off';

appl.assignsuffix = '_esvr';

clear prop

prop.elemdefault='Lag2';

prop.variable='H';

prop.analysis='time';

prop.frame='ref';

clear weakconstr

weakconstr.value = 'off';

```

```

weakconstr.dim = {'lm2'};
prop.weakconstr = weakconstr;
prop.constrtype='ideal';
appl.prop = prop;
clear pnt
pnt.tpf = {};
pnt.tN0 = {};
pnt.p0 = {};
pnt.tNf = {};
pnt.tp0 = {};
pnt.N0 = {};
pnt.ind = [1,1,1,1];
appl.pnt = pnt;
clear bnd
bnd.Hp0 = 0;
bnd.Rb = 0;
bnd.Hpb = 0;
bnd.Db = 0;
bnd.pb = 0;
bnd.p0 = 0;
bnd.H0 = {'H_esvr',0,10,20};
bnd.name = "";
bnd.Hb = 0;
bnd.N0 = {'-5*5.3148e-4',0,'N0',0};
bnd.type = {'Hw','Nz','N0','Nz'};
bnd.ind = [1,2,3,4];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.eta = 1;
equ.Ks = 2.3148e-7;
equ.Ar = 1;

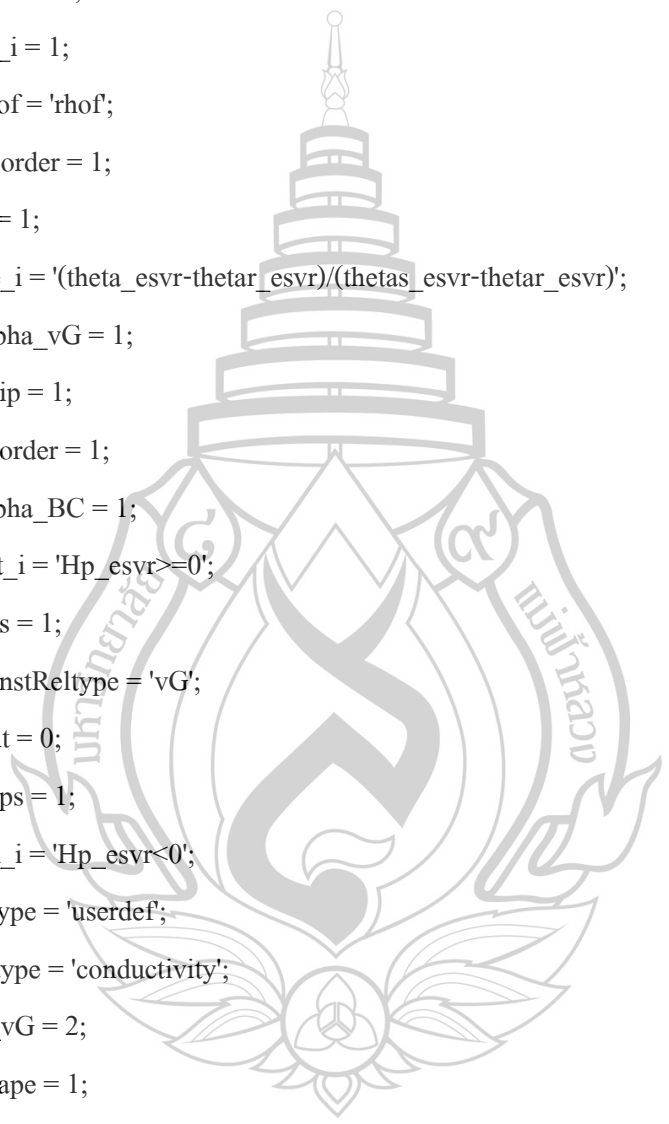
```



```

equ.C_i = 'd(theta_esvr,p)*rhof_esvr*g_esvr';
equ.rho_head = 'rhof_esvr';
equ.thetar = 0;
equ.thetas = 0.25;
equ.Aron = 0;
equ.kr_i = 1;
equ.rhof = 'rhof';
equ.gporder = 1;
equ.S = 1;
equ.Se_i = '(theta_esvr-thetar_esvr)/(thetas_esvr-thetar_esvr)';
equ.alpha_vG = 1;
equ.chip = 1;
equ.cporder = 1;
equ.alpha_BC = 1;
equ.sat_i = 'Hp_esvr>=0';
equ.Cts = 1;
equ.constReltype = 'vG';
equ.init = 0;
equ.kaps = 1;
equ.un_i = 'Hp_esvr<0';
equ.Stype = 'userdef';
equ.Ktype = 'conductivity';
equ.n_vG = 2;
equ.shape = 1;
equ.l_BC = 2;
equ.chif = 1;
equ.n_BC = 1;
equ.Qs = 0;
equ.l_vG = 0.5;
equ.usage = 1;
equ.theta_i = 'thetas_esvr';

```



```

equ.ind = [1];
appl.equ = equ;
appl.var = {'tscale','0', ...
    'g','9.82', ...
    'D','0'};
fem.appl{1} = appl;
fem.sdim = {'x','y'};
fem.frame = {'ref'};
% Simplify expressions
fem.simplify = 'on';
fem.border = 1;
fem.outform = 'general';
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;
% Scalar expressions
fem.expr = {'Mtheta','cos(theta)+(tan(phi)*sin(theta)/FSfold)', ...
    'Md','((C0*b0)+(b0*((rho_s*y)-(rho_f*H_esvr))*tan(phi))/(Mtheta))', ...
    'Mr','rho_s*b0*y*sin(theta)', ...
    'b0','55[m]/n1', ...
    'FS','Md/Mr', ...
    'FS1','((FS>1)+(FS==1))*1+(FS<1)*0', ...
    'N0','1.15741e-6', ...
    'N1','N0*(-0.02939*(x-10)*(x-27.5)+0.51429*(x-10)+1)'};
% Descriptions
clear descr
descr.expr= {'Mtheta','Mtheta','b0','width of slope','Mr','moment','Md','moment driving'};
fem.descr = descr;
% Global expressions
fem.globalexpr = {};
% Functions

```

```

clear fcns

fem.functions = {};

% Descriptions
descr = fem.descr;

descr.const= {'n1','no of slice','theta','angle of slope','C0','Coulomb
cohesion','FSfold','Factor safety initial','rho_s','soil density','phi','Coulomb friction
angle','rhof','water density'};

fem.descr = descr;

% Solution form
fem.solform = 'general';

% ODE Settings
clear ode
clear units;
units.basesystem = 'SI';
ode.units = units;
fem.ode=ode;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem, ...
    'geoms',[1], ...
    'eqvars','on', ...
    'cplbndeq','on', ...
    'cplbndsh','off', ...
    'linshape',[1], ...
    'linshapetol',0.1, ...
    'dofversion',1);

% Retrieve solution
fem.sol=flbinary('sol1','solution',flbinaryfile);

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;

```

```

% Plot solution
postplot(fem, ...
    'contdata',{'H_esvr','cont','internal','recover','pprint','unit','m'}, ...
    'contcolordata',{'H_esvr','unit','m'}, ...
    'contlevels',45, ...
    'contlabel','on', ...
    'contcolorbar','on', ...
    'contcolormap','Cyclic', ...
    'contcolormapstyle','reverse', ...
    'contfill','off', ...
    'solnum','end', ...
    'phase',0, ...
    'title','Time=4.32e5 Contour: Hydraulic head Contour Color: Hydraulic head
[m]', ...
    'refine','auto', ...
    'geom','on', ...
    'geomnum',1, ...
    'sdl',{[1]}, ...
    'complexfun','on', ...
    'matherr','off', ...
    'axisvisible','on', ...
    'axisequal','on', ...
    'grid','off', ...
    'axis',[4.6781609195402325,50.32183908045977,-
2.7496720018057994,30.060672825780408]);

% Plot solution
postplot(fem, ...
    'contdata',{'H_esvr','cont','internal','recover','pprint','unit','m'}, ...
    'contcolordata',{'H_esvr','unit','m'}, ...
    'contlevels',45, ...
    'contlabel','on', ...

```



```

'contcolorbar','on', ...
'contcolormap','Cyclic', ...
'contcolormapstyle','reverse', ...
'contfill','off', ...
'solnum','end', ...
'phase',0, ...
'title','Time=4.32e5   Contour: Hydraulic head   Contour Color: Hydraulic head
[m]', ...
'refine','auto', ...
'geom','on', ...
'geomnum',1, ...
'sdl',{[1]}, ...
'complexfun','on', ...
'matherr','off', ...
'axisvisible','on', ...
'axisequal','on', ...
'grid','off', ...
'axis',[4.614942528735634,50.38505747126437,-
2.7496720018057994,30.060672825780408]);
flbinaryfile=";
% Plot solution
postplot(fem, ...
'contdata',{'H_esvr','cont','internal','recover','pprint','unit','m'}, ...
'contcolordata',{'H_esvr','unit','m'}, ...
'contcolordlim',[0.05 1.8201746559455567], ...
'contlevels',45, ...
'contlabel','on', ...
'contcolorbar','on', ...
'contcolormap','Cyclic', ...
'contcolormapstyle','reverse', ...
'contfill','off', ...

```

```

'solnum','end', ...
'phase',0, ...
'title','Time=4.32e5   Contour: Hydraulic head   Contour Color: Hydraulic head
[m]', ...

'refine','auto', ...
'geom','on', ...
'geomnum',1, ...
'sdl',{[1]}, ...
'complexfun','on', ...
'matherr','off', ...
'axisvisible','on', ...
'axisequal','on', ...
'grid','off', ...
'axis',[7.313024030622948,47.68697596937705,-
0.8155500411987306,28.12655086517334]);
% Plot solution
postplot(fem, ...
'contdata',{'H_esvr','cont','internal','recover','pprint','unit','m'}, ...
'contcolordata',{'H_esvr','unit','m'}, ...
'contcolordlim',[0.05 1.8201746559455567], ...
'contlevels',45, ...
'contlabel','on', ...
'contcolorbar','on', ...
'contcolormap','Cyclic', ...
'contcolormapstyle','reverse', ...
'contfill','off', ...
'solnum','end', ...
'phase',0, ...
'title','Time=4.32e5   Contour: Hydraulic head   Contour Color: Hydraulic head
[m]', ...
'refine','auto', ...

```

```
'geom','on', ...
'geomnum',1, ...
'sdl',{[1]}, ...
'complexfun','on', ...
'matherr','off', ...
'axisvisible','on', ...
'axisequal','on', ...
'grid','off', ...
'axis',[7.313024030622948,47.68697596937705,-
0.8556360535344288,28.16663687750904]);
```

2. รายละเอียดโปรแกรมเพื่อสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

หลังจากที่ทำการคำนวณค่าศักย์รวมของน้ำ(Hydraulic head) โดยโปรแกรม COMSOL บนระนาบใน 2 มิติ ในทุกหน้าตัดของลาดเอียงแล้ว นำข้อมูลชุดนี้กลับนำเข้าสู่การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB และบันทึกรายละเอียดรูปแบบ M-file เพื่อเรียกคำสั่ง และสามารถนำกลับมาแก้ไขในภายหลัง โดยมีรายละเอียดของโปรแกรกดังนี้

```
%- This program calculates and plots the Factor safety -
%- (Infinite Slope method and without solve tree root model) -
%- along any slope angle and varies any depth of water pressure. -
%- varies any depth of water pressure. -
% Created by Surachai amnuaypornlert and Dr.rungrote nilthong -
function FS=FS_IFS(c,h,hw,theta,rhoS,phi)
%c=input('soil cohesion(t/sq.m)=');
%b=input('Horizontal distance of slope(m)=');
%n=input('No.of slice=');
%hw1=input('depth of water pressure(m)=');
%theta=input('angle of slope(degree)=');
%rhoS=input('soil density(t/cu.m)=');
%phi=input('internal friction angle(degree)=');
%varies any slope(degree) at depth of water pressure(hw1)
clc;
```

```

FSMin = 0;
NLoop = 0;
smTemp=0;%degree
hTemp=0;%metre
hwTemp=0;%metre
mTemp=0;%metre
c=1.79;%ton/sq.m
theta=45;%degree
rhoS=1.920;%gramma saturated equal gramma moisture(ton/cu.m)
phi= 18.66;%degree
rhoW=1;%ton/cu.m
h=8.0;%metre
hw=8.0;%metre
fprintf('\n');
%fprintf('slope No.cal of(m)    hw    h    Force resisting    Force driving
FACTOR SAFETY\n')
fprintf('slope    No.cal of(m)    FACTOR SAFETY\n')
%
for sm=[25:10:theta]
    for hw=0:2:hw
        for h=2:2:h
            m=hw/h;
            Fr=(c+(h*(cos(sm)*pi()/180))^2*tan(phi*pi()/180))*(((1-m)*rhoS)+(m*(rhoS-rhoW)));
            Fd=(0.50*h*sin(2*sm*pi()/180))*(((1-m)*rhoS)+(m*rhoS));
            FSinf=Fr/Fd;
            if FSinf >= 0
                if FSinf < FSMin
                    FSMin=FSinf;
                    NL = NLoop;
                    smTemp = sm;
                    hTemp = h;

```

```

hwTemp = hw;
mTemp = m;
end;
fprintf('%12.1f %12.3f %12.1f %12.1f %12.3f %12.3f %12.3f\n',sm,m,hw,h,Fr,Fd,FSinf)
fprintf('%12.1f %12.3f %12.3f\n',sm,m,FSinf);
%end;
figure(1);
hold on
plot(m,FSinf,'r--*');
legend('Angle of slope(degree)');
grid on
title('Effect of increasing moisture in slope on factor of safety');
xlabel('No. of m moisture');
ylabel('FSinf');end;
%
figure(2);
hold on
plot(h,m,'B--*');
legend('h1=2.0metre','h2=4.0metre','h3=6.0metre','h4=8.0 metre');
grid on
title('Effect of increasing water pressure on failure plane(hw=0 to 8.0 metre)');
xlabel('Depth of failure plane');
ylabel('m');
%
figure(3);
hold on
hw=[1:1:4];
h=8;
FSinf1=Fr/Fd;
if FSinf1 >= 0

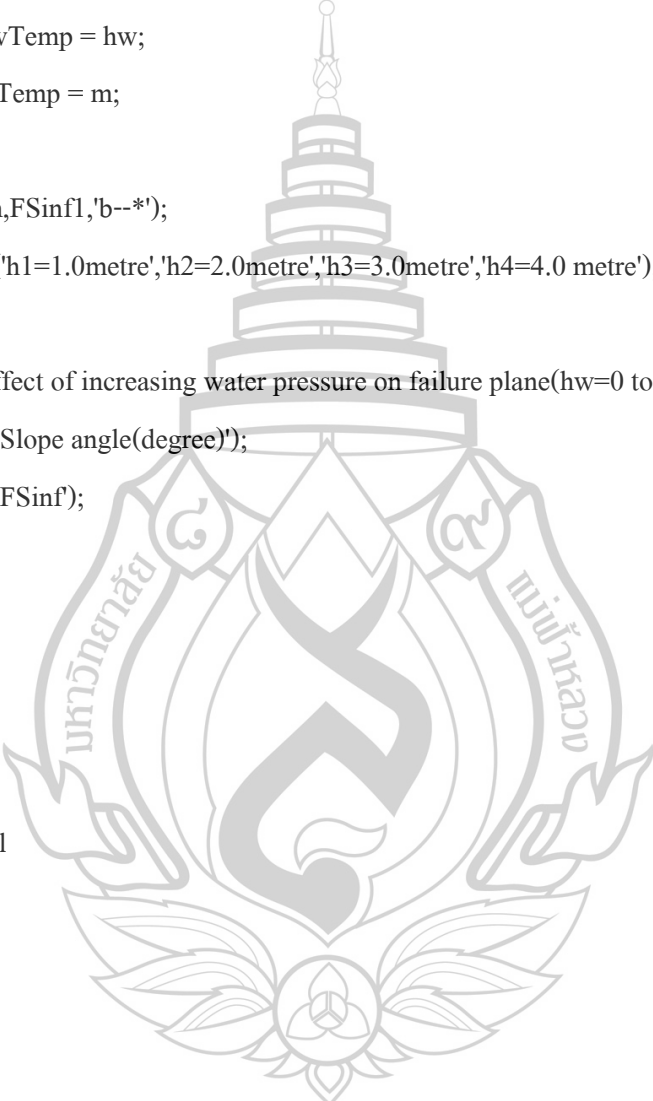
```



```

if FSinf1 < FSMin
    FSMin=FSinf1;
    NL = NLoop;
    smTemp = sm;
    hTemp = h;
    hwTemp = hw;
    mTemp = m;
end;
plot(sm,FSinf1,'b--*');
legend('h1=1.0metre','h2=2.0metre','h3=3.0metre','h4=4.0 metre');
grid on
title('Effect of increasing water pressure on failure plane(hw=0 to 8.0 metre)');
xlabel('Slope angle(degree)');
ylabel('FSinf');
end;
end;
end;
end;
%end;
clear all

```





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ
วัน เดือน ปีเกิด	4 เมษายน 2517
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	5 หมู่ที่ 23 ซอย 1 บ้านใหม่จอมแ่ว ตำบลเมืองพาน อำเภอลือพาน จังหวัดเชียงราย 57120
ประวัติการศึกษา	ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมโยธา(วิศวกรรมโครงสร้าง) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
2543-2547	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ศูนย์กลาง ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ
ประวัติการทำงาน	หัวหน้าคณะวิชาโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเชียงราย
2547-ปัจจุบัน	หัวหน้าแผนกวิชาช่างโยธา หัวหน้าแผนกอาคารสถานที่ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเชียงราย
2545-2546	