

## บทที่ 5

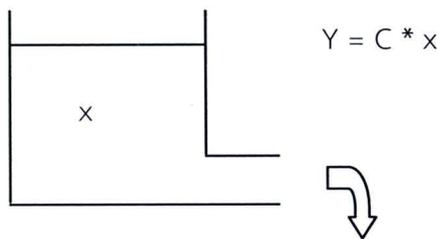
### การพัฒนาแบบจำลองการไหลซึม

#### 5.1 การพัฒนาแบบจำลองเพื่อหาค่าความชื้นสะสมวิกฤติในดิน

ดินถล่มนำมาซึ่งความสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมากที่เกิดขึ้นในประเทศไทยนั้นพบว่าเกิดจากฝนตกหนักทำให้ดินอุ้มน้ำจนไม่สามารถรับน้ำหนักของมวลดินได้จึงเกิดการเคลื่อนพัง ดังนั้นสุทธิศักดิ์ และคณะ (2551) ได้สร้างแบบจำลองการวิเคราะห์ค่าเกณฑ์ดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤติ ( $API_{cr}$ ) สำหรับเตือนภัยดินถล่ม และในการวิจัยครั้งนี้ได้รวบรวมและคัดเลือกแบบจำลองการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดินเพื่อหาปริมาณความชื้นในมวลดิน ณ เวลาใดๆ จากปริมาณฝนที่ตกจริงในแต่ละพื้นที่ ได้แก่ แบบจำลองถัง (Tank Model) แบบจำลอง SINMAP และแบบจำลองการไหลซึมของ Green and Ampt (G.A.Model) แนวคิดในแต่ละแบบจำลองมีดังนี้

#### 5.2 แบบจำลองถัง (Tank Model)

ทงศักดิ์ (2547) ได้รวบรวมการศึกษาและหลักการของแบบจำลองถังว่า Tank Model เป็นแบบจำลองทางกายภาพที่ใช้ในการหาปริมาณน้ำท่าจากปริมาณน้ำฝน แนวความคิดในการทำแบบจำลองถัง (Tank Model) ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Zoch ในปีค.ศ.1934 หลักการเบื้องต้น ตามแนวความคิดของ Zoch เราสามารถแทนลุ่มน้ำ (Drainage Area) ได้ด้วย Tank 1 ใบ อัตราการไหลของน้ำท่าจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในลุ่มน้ำนั้น ถ้าปริมาณน้ำสะสมอยู่มากอัตราการไหลของน้ำท่าก็จะมาก ถ้าในลุ่มน้ำนั้นมีปริมาณน้ำสะสมอยู่น้อยอัตราการไหลของน้ำท่าก็จะน้อยด้วย การที่ฝนตกลงในลุ่มน้ำจะเป็นการเพิ่มการสะสมน้ำในลุ่มน้ำซึ่งจะมีผลทำให้อัตราการไหลของน้ำท่าเพิ่มขึ้นและการไหลของน้ำท่าจะทำให้ปริมาณน้ำที่สะสมในลุ่มน้ำลดลง ทำให้การไหลของน้ำท่าลดลงด้วยหลักการเบื้องต้นของ Tank Model แสดงได้ในรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 หลักการเบื้องต้นของแบบจำลองถัง (Tank model)

โดยที่

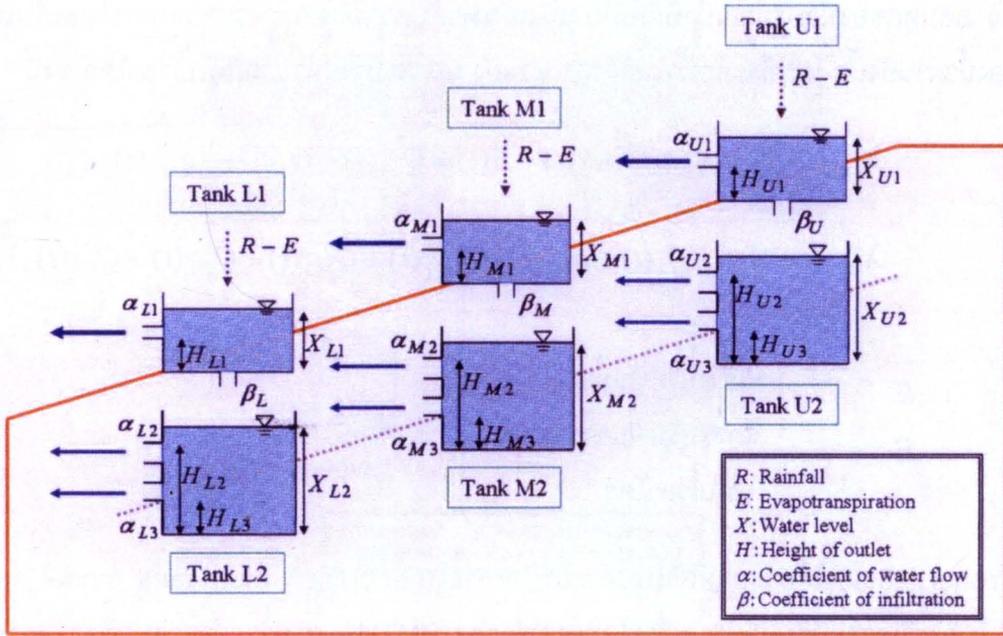
|   |     |                                     |
|---|-----|-------------------------------------|
| Y | คือ | อัตราการไหลของน้ำท่า                |
| X | คือ | ปริมาณน้ำที่สะสมในลุ่มน้ำหรือในถัง  |
| C | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล Tank Model |

Tank Model ของ Sugawara (1972) เป็นแบบที่พัฒนาขึ้นครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นซึ่งเหมาะสำหรับพื้นที่ชุ่มชื้นตลอดปี ซึ่งเป็นแบบจำลองแนวคิด (conceptual model) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าทั้งที่ไหลบนดินและน้ำใต้ดิน ประกอบด้วย Tank หลายใบวางซ้อนกันในแนวตั้ง Tank ทุกใบจะมีทางน้ำออก 2 ทางคือทางด้านข้างและทางด้านล่าง ทางน้ำออกทางด้านข้างจะแทนการไหลของน้ำลงสู่แม่น้ำไปเป็นน้ำท่า ส่วนทางน้ำออกด้านล่างจะแทนการไหลซึมลงสู่ใต้ดิน Tank ใบบนจะแทนการเกิด Direct Runoff และ Infiltration ใบที่ 2 จะแทน Interflow และ Percolation ใบถัดลงไปทั้งหมดจะแทน Ground Water

Sugawara (1979) พัฒนาการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองถัง (Tank Model) ซึ่งใช้ข้อมูลน้ำฝนและอัตราการระเหยเป็นตัวแปรต้นในแบบจำลองโดยนำค่าปริมาณน้ำที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับค่าจริง จากการปรับค่าพารามิเตอร์สามารถเห็นรูปร่างของไฮโดรกราฟที่ได้รับ วิธีนี้เมื่อนำไปใช้กับลุ่มน้ำ Kitami ในประเทศญี่ปุ่นพบว่าให้ผลที่น่าพอใจ และประยุกต์ใช้กับ Upper Nzoia ในลุ่มน้ำไนล์ตอนบนซึ่งมีสถานีวัดน้ำฝนน้อยสถานีปรากฏว่าค่าความสัมพันธ์ของน้ำท่าให้ค่าที่ดีเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าจริง

วีระพล (2531) นำหลักการของแบบจำลองถัง (Tank Model) คือการแทนการเก็บกัก (Storage) ต่างๆ ของลุ่มน้ำและลำน้ำด้วยถังขนาดต่าง ๆ โครงสร้างของแบบจำลองถัง (Tank Model) ที่จะใช้วิเคราะห์น้ำท่าจะเป็นรูปแบบง่ายๆ ซึ่งประกอบด้วยถัง 4 ใบเรียงกันตามแนวตั้งพารามิเตอร์ที่ใช้กับแบบจำลองถังประกอบด้วย 2 กลุ่มใหญ่ด้วยกัน กลุ่มแรกจะเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์ของจุดออก (Outlet) ของถังต่างๆ กลุ่มที่ 2 ได้แก่พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการเก็บกัก (Storage) ต่างๆ ข้อมูลที่สำคัญที่ใช้ในแบบจำลองถังก็คือข้อมูลปริมาณน้ำฝน ข้อมูลการคายน้ำรวมการระเหย และข้อมูลเกี่ยวกับความชื้นในดิน

Ohtsu และคณะ (2005) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองถังในการวิเคราะห์ดินถล่ม โดยพัฒนาแบบจำลองถังระบบหลายใบ (multi-tank model system: MTMS) โดยเพิ่มแบบจำลองถังพื้นฐานในแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 5-2 ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองถัง 3 ชุด แบบจำลอง MTMS สามารถวิเคราะห์สมดุลน้ำทั้งในและบนลาดดินได้แต่ไม่สามารถวิเคราะห์การไหลซึมในชั้นดินไม่อิ่มน้ำได้ แบบจำลอง MTMS ใช้แทนพฤติกรรมของน้ำใต้ดิน Supawiwat และคณะ (2006) ได้ใช้วิธีแบบจำลอง MTMS เพื่อประเมินความเสี่ยงของลาดดินโดยประมาณระดับน้ำใต้ดินเนื่องจากฝนตก



รูปที่ 5-2 แบบจำลองถังหลายใบ (Multi-Tank Model System: MTMS)

ที่มา: Yohei Hotta (2009)

จากแบบจำลองถังหลายใบสามารถหาปริมาณน้ำการไหลบ่าหน้าดินและการไหลซึมในถังได้ ดังแสดงตัวอย่างสมการของแบบจำลองถังชุดกลาง ณ เวลาใดๆ ข้างล่างนี้

$$q_{M1} = \beta_{M1} \cdot X_{M1} \quad (5-1)$$

$$Q_{M1} = \alpha_{M1} \cdot (X_{M1} - H_{M1}) \quad (5-2)$$

$$Q_{M2} = \alpha_{M2} \cdot (X_{M2} - H_{M2}) \quad (5-3)$$

$$Q_{M3} = \alpha_{M3} \cdot (X_{M3} - H_{M3}) \quad (5-4)$$

|       |                            |   |
|-------|----------------------------|---|
| เมื่อ | $q_{M1}$                   | แทนปริมาณการไหลซึม(Infiltration) จากถัง M1 ไปยังถัง M2    |
|       | $Q_{M1}$                   | แทนปริมาณการไหลล้น (Runoff) จากถัง M1 ไปยังถัง L1         |
|       | $Q_{M2}, Q_{M3}$           | แทนปริมาณการไหลล้น (Runoff) จากถัง M2                     |
|       | $\alpha_{M1}$              | แทนสัมประสิทธิ์การไหลบ่า (Coefficient of runoff)          |
|       | $\alpha_{M2}, \alpha_{M3}$ | แทนสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำ (Coefficient of infiltration) |
|       | $\beta_{M1}$               | แทนสัมประสิทธิ์การไหลซึม (Coefficient of infiltration)    |
|       | $X$                        | แทนระดับน้ำในถัง  |
|       | $H$                        | แทนความสูงทางออกของน้ำในถัง                               |

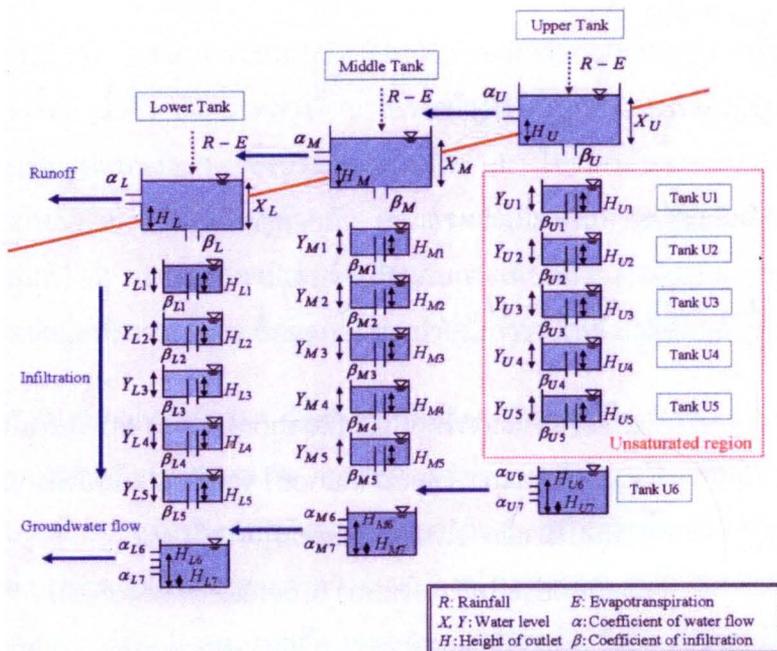
จากสมมูลของน้ำปริมาณน้ำที่กักเก็บอยู่ในถังเท่ากับความแตกต่างระหว่างการไหลเข้าและการไหลออกของน้ำผ่านถังนั้น โดยที่ระดับน้ำในถัง M1 และถัง M2 สามารถคำนวณได้ในเวลาใดๆ ดังนี้

$$X_{M1}(t+1) = X_{M1}(t) + R(t) - E(t) + Q_{U1}(t) - Q_{M1}(t) - q_{M1}(t) \quad (5-5)$$

$$X_{M2}(t+1) = X_{M2}(t) + q_{M1}(t) - Q_{M2}(t) - Q_{M3}(t) + Q_{U2}(t) + Q_{U3}(t) \quad (5-6)$$

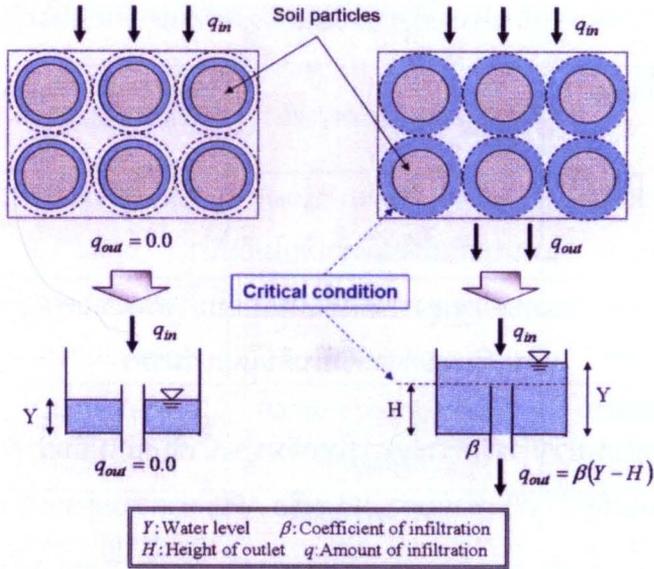
|       |     |                   |
|-------|-----|-------------------|
| เมื่อ | $R$ | แทนปริมาณน้ำฝน    |
|       | $E$ | แทนปริมาณการระเหย |
|       | $t$ | แทนเวลาใดๆ        |

Yohei (2009) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองถังหลายใบ (modified multi-tank model system: MMTMS) ในการวิเคราะห์ดินถล่มแบบตื้น โดยแบบจำลอง MMTMS สามารถจำลองพฤติกรรมการสะสมความชื้นในชั้นดินที่ไม่อิ่มน้ำที่มีโอกาสเคลื่อนพังลักษณะตื้นจากการกระตุ้นด้วยปริมาณน้ำฝน ดังแสดงในรูปที่ 5-3 แบบจำลอง MMTMS ประกอบด้วยถังชั้นหน้าดิน 1 ใบ ถึงชั้นดินไม่อิ่มน้ำ 5 ใบ และถึงชั้นน้ำใต้ดิน 1 ใบ จัดวางตำแหน่งไว้ 3 แถว คือ ตอนบน ตอนกลาง และตอนล่างของลาดดิน สมมติฐานของการไหลซึมของน้ำชั้นไม่อิ่มน้ำเนื่องจากน้ำฝนในถังจะไหลเฉพาะแนวตั้งเท่านั้นไม่มีการไหลซึมในแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 5-4 ส่วนการหาค่าปัจจัยต่างๆ ของแบบจำลอง MMTMS ใช้วิธีการทางตัวเลข (algorithms) และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)



รูปที่ 5-3 แบบจำลองถังหลายใบปรับปรุงใช้กับดินถล่มแบบตื้น

ที่มา: Yohei Hotta (2009)



รูปที่ 5-4 แบบจำลองการไหลซึมในแนวตั้งของชั้นดินไม่อิ่มน้ำ

ที่มา: Yohei Hotta (2009)

พฤติกรรมของการไหลซึมของน้ำในชั้นดินไม่อิ่มน้ำถูกจำกัดให้ไหลเฉพาะในแนวตั้งเท่านั้น คือ

$$\text{If } \begin{cases} Y_{M1} - H_{M1} \leq 0 & q_{M1} = 0 \\ Y_{M1} - H_{M1} > 0 & q_{M1} = \beta_{M1}(Y_{M1} - H_{M1}) \end{cases} \quad (5-7)$$

|       |              |  |
|-------|--------------|--|
| เมื่อ | $q_{M1}$     | แทนปริมาณการไหลซึม(Infiltration) จากถัง M1 ไปยังถัง M2 |
|       | $Y_{M1}$     | แทนระดับน้ำในถัง M1                                    |
|       | $H_{M1}$     | แทนความสูงของรูระบายออกของถัง M1                       |
|       | $\beta_{M1}$ | แทนสัมประสิทธิ์การซึมจากถัง M1 ไปยังถัง M2             |

จากสมมูลของน้ำปริมาณน้ำที่กักเก็บอยู่ในถังเท่ากับความแตกต่างระหว่างการไหลเข้าและการไหลออกของน้ำผ่านถังนั้น โดยที่ระดับน้ำในถัง M1 สามารถคำนวณได้ในเวลาใดๆ ดังนี้

$$Y_{M1}(t+1) = Y_{M1}(t) + q_M(t) - q_{M1}(t) \quad (5-8)$$

สุทธิศักดิ์และคณะ, 2550 ศึกษาเสถียรภาพของลาดดินในเทศบาลเมืองตำบลป่าตอง อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต พบว่ากำลังเฉือนที่ความชื้นสะสมในดินร้อยละ 93 ทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินเท่ากับ 1.0 ที่ความหนาวิกฤติ และใช้ค่า  $API_{cr}$  ในการเตือนภัย โดยมีสมมุติฐานว่ามีการสะสมความชื้นเท่ากันตลอดทั้งความหนาวิกฤติ เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำชั้นดินไม่อิ่มน้ำด้วย

แบบจำลอง MMTMS ระดับน้ำในถังคำนวณได้จากปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตรคูณกับความสูงของถังหรือความหนาของชั้นดิน

$$Y = D \times \theta \quad (5-9)$$

|       |          |  |
|-------|----------|--|
| เมื่อ | Y        | แทนระดับน้ำในถังชั้นดินไม่อิ่มน้ำ                      |
|       | D        | แทนความสูงของถังชั้นดินไม่อิ่มน้ำหรือแทนความหนาชั้นดิน |
|       | $\theta$ | แทนปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตร                       |

จากสมการข้างต้นพบว่าการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำชั้นดินไม่อิ่มน้ำด้วยแบบจำลอง MMTMS ได้ค่าระดับน้ำในถังชั้นดินไม่อิ่มน้ำ (Y) เท่ากับค่า  $API_t$  หรือ  $API_{cr}$  ค่าความสูงของถังชั้นดินไม่อิ่มน้ำ (D) จากการรวมกันเท่ากับความหนาชั้นดิน หรือความหนาชั้นดินวิกฤติ ค่าปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตร ( $\theta$ ) เท่ากับ ค่า  $n \cdot S_{r,cr}$  เมื่อ n แทนความพรุน  $S_{r,cr}$  แทนระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถทราบปริมาณความชื้นสะสมในดินเนื่องจากฝนตกได้จากการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำชั้นดินไม่อิ่มน้ำด้วยแบบจำลอง MMTMS

### 5.3 โปรแกรม SINMAP

SINMAP (Stability INdex MAPping) เป็นโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยมลรัฐยูทาห์ประเทศสหรัฐอเมริกาทำงานร่วมกับโปรแกรม Arcview GIS ของ ESRI โดยอ้างอิงจากแบบจำลองเสถียรภาพของลาดดินแบบอนันต์ ซึ่งเป็นสมดุลระหว่างองค์ประกอบที่ให้ขาดเสถียรภาพของค่าแรงโน้มถ่วงกับองค์ประกอบแรงต้านของความฝืดและความเชื่อมแน่นบนระนาบการพิบัติชานานกับพื้นดิน โปรแกรมรวมการวิเคราะห์สภาพอุทกวิทยาแบบสมำเสมอกับการวิเคราะห์

แบบจำลองเสถียรภาพของลาดดินแบบอนันต์หรือหลักการเดียวกับการคิดแรงดันน้ำโดยสมมุติให้เป็นอัตราส่วนของค่าการไหลด้านข้างต่อพื้นที่จำเพาะของกลุ่มน้ำ (specific catchment area) ซึ่งโปรแกรมจะดำเนินการวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาพทางภูมิประเทศโดยอัตโนมัติจากข้อมูล DEM เช่น ความชัน และ พื้นที่จำเพาะของกลุ่มน้ำ เป็นต้น ส่วนค่าตัวแปรอื่น ได้แก่กำลังรับแรงเฉือนของดิน และคุณสมบัติการไหลซึมน้ำในมวลดินโปรแกรมให้ป้อนข้อมูลความไม่แน่นอนของค่าจำเพาะของตัวแปรในรูปของค่าขอบเขตสูงสุดกับค่าขอบเขตต่ำสุดในช่วงที่สามารถเป็นไปได้ โดยผลลัพธ์จากการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของค่าดัชนีเสถียรภาพความมั่นคง (stability index, SI) ซึ่งนิยามของช่วงชั้นเสถียรภาพของลาดชันของโปรแกรม SINMAP แสดงดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 นิยามของช่วงชั้นเสถียรภาพของลาดชันของโปรแกรม SINMAP

| Condition         | Class | Predicted State            | Parameter Range                                    | Possible Influence of Factors Not Modeled                      |
|-------------------|-------|----------------------------|--|--|
| $SI > 1.5$        | 1     | Stable slope zone          | Range cannot model instability                     | Significant destabilizing factors are required for instability |
| $1.5 > SI > 1.25$ | 2     | Moderately stable zone     | Range cannot model instability                     | Moderate destabilizing factors are required for instability    |
| $1.25 > SI > 1.0$ | 3     | Quasi-stable slope zone    | Range cannot model instability                     | Minor destabilizing factors could lead to instability          |
| $1.0 > SI > 0.5$  | 4     | Lower threshold slope zone | Pessimistic half of range required for instability | Destabilizing factors are not required for instability         |
| $0.5 > SI > 0.0$  | 5     | Upper threshold slope zone | Optimistic half of range required for stability    | Stabilizing factors may be responsible for stability           |
| $0.0 > SI$        | 6     | Defended slope zone        | Range cannot model stability                       | Stabilizing factors are required for stability                 |

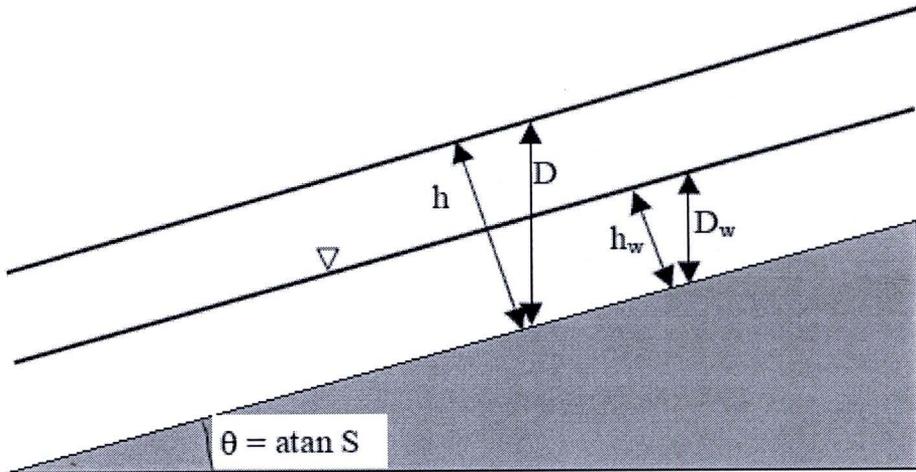
### 5.3.1 แบบจำลองเสถียรภาพลาดดินอนันต์

ค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินอนันต์ โดยประยุกต์ใช้ได้ทั้งสำหรับหน่วยน้ำหนักดินแห้งและดินเปียก (Hammond et al., 1992)

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_s g (D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g) D_w] \tan \phi}{D \rho_s g \sin \theta \cos \theta} \quad (5-10)$$

เมื่อ  $C_r$  คือค่าความเชื่อมั่นแรงรูดพิช [N/m<sup>2</sup>]  $C_s$  คือค่าความเชื่อมั่นของดิน [N/m<sup>2</sup>]  $\theta$  คือค่ามุมของลาดชัน  $\rho_s$  คือค่าความหนาแน่นของดินเปียก [kg/m<sup>3</sup>]  $\rho_w$  คือค่าความหนาแน่นของน้ำ [kg/m<sup>3</sup>]  $g$  คือค่าความเร่งของแรงโน้มถ่วง (9.81 m/s<sup>2</sup>)  $D$  คือค่าความหนาของชั้นดินแนวดิ่ง [m]  $D_w$  คือค่าความสูงของระดับน้ำภายในชั้นดิน [m] และ  $\phi$  คือค่ามุมเสียดทานภายในของดิน มุมของลาดชัน  $\theta$  คือค่า  $\tan^{-1} S$  เมื่อ  $S$  คือสัดส่วนระยะแนวดิ่งต่อแนวราบ ดังรูปที่ 5-5 แบบจำลองแปลความหนาของชั้นดินที่ตั้งฉากกับลาดชันมากกว่าความลึกของชั้นดินแนวดิ่ง โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นดิน  $h$  [m] กับความลึกตั้งสมการ

$$h = D \cos \theta \quad (5-11)$$



รูปที่ 5-5 แบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดชันนันท

ที่มา: Pack R. T. (2005)

และสามารถลดรูปสมการ FS เป็น

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - wr] \tan \phi}{\sin \theta} \quad (5-12)$$

เมื่อ

$$w = D_w / D = h_w / h \quad (5-13)$$

โดยที่  $w$  คือค่าความเปียกชื้นสัมพัทธ์ (Relative wetness)

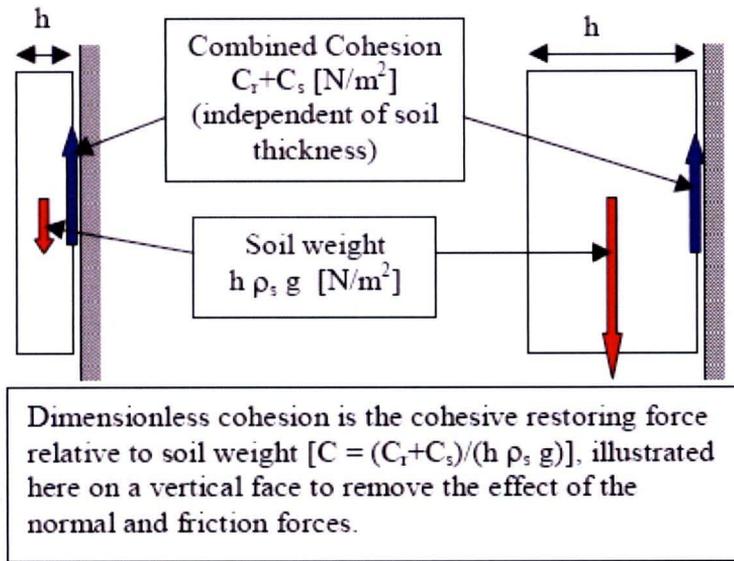
$$C = (C_r + C_s) / (h \rho_s g) \quad (5-14)$$

โดยที่  $C$  คือค่าผลรวมของความเชื่อมแน่นถูกทำให้ไร้มิติโดยเทียบกับความหนาตั้งฉากลาดชันและ

$$r = \rho_w / \rho_s \quad (5-15)$$

โดยที่  $r$  คือค่าอัตราส่วนของความหนาแน่นของน้ำกับความหนาแน่นของดิน

สมการที่ 5-12 คือแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันนันทในรูปแบบไร้มิติหรือไร้นหน่วย สมการที่ 5-14 คือผลรวมของค่าความเชื่อมแน่นต่อความหนาแน่นของดินและความหนาของดินในรูปแบบไร้มิติ แนวคิดของสัดส่วนระหว่างค่าความเชื่อมแน่นรวมต่อน้ำหนักของดินแสดงในรูปที่ 5-6



รูปที่ 5-6 แนวคิดปัจจัยผลรวมค่าความเหนียวแน่นไร้มิติ

ที่มา: Pack R. T. (2005)

### 5.3.2 ดัชนีความเปียกแห้งของภูมิประเทศ (Topographic Wetness Index)

โปรแกรม SINMAP ได้นำหลักการของแบบจำลอง TOPography based hydrological MODEL (TOPMODEL) (Beven, 1997) เพื่อวิเคราะห์ค่าความเปียกชื้นสัมพัทธ์ของภูมิประเทศ ในรูปแบบตัวแปรพื้นที่จำเพาะของกลุ่มน้ำ (specific catchment area, a) โดยนิยามจากค่าพื้นที่ด้านบนของลาดชันต่อความยาวของเส้นชั้นความสูง [ $m^2/m$ ] ดังแสดงในรูปที่ 5-7 จากการสังเกตในสนามซึ่งปริมาณความชื้นในดินสูงๆหรือพื้นที่ชุ่มชื้นผิวดินมักเกิดบริเวณพื้นที่ที่เป็นหลุมมีการไหลมารวมกันและบริเวณดังกล่าวมีรายงานว่าปกติมีการเกิดดินถล่ม

จากแบบจำลอง TOPMODEL ในโปรแกรม SINMAP มีข้อสมมุติฐานดังนี้

สมมุติฐานที่ 1 การไหลภายใต้ชั้นดินเป็นการไหลด้านข้างแบบตื้นตามลักษณะของมุมมองทางภูมิประเทศ ซึ่งสามารถกำหนดจากค่าพื้นที่จำเพาะของกลุ่มน้ำ ดังรูปที่ 5-5

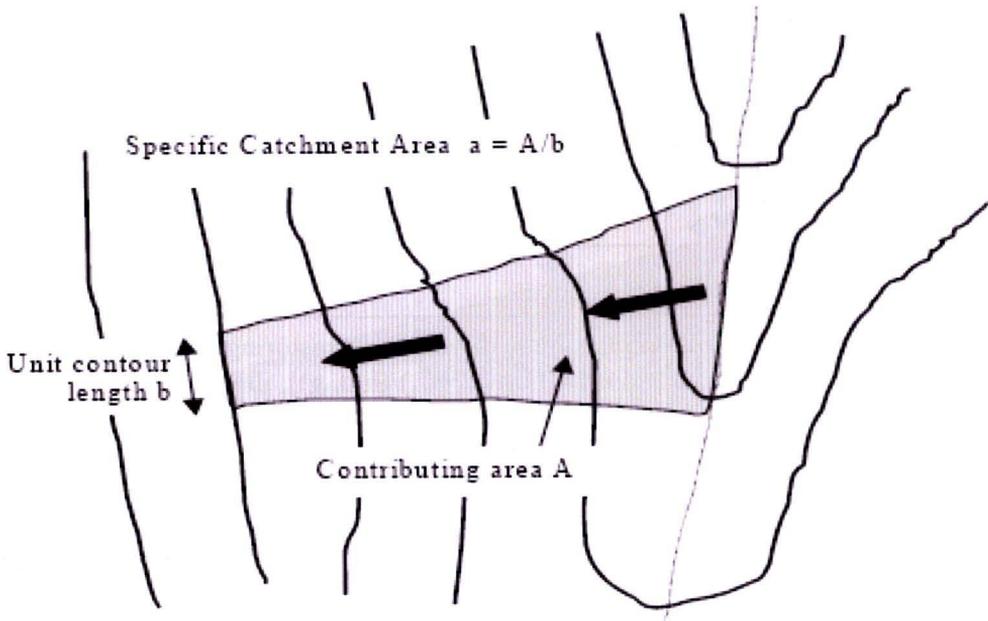
สมมุติฐานที่ 2 ปริมาณการไหลด้านข้าง ณ จุดใดๆ คือสมมูลกับการไหลในสภาพสม่ำเสมอ R [ $m/hr$ ]

สมมุติฐานที่ 3 ความสามารถสำหรับการไหลด้านข้าง ณ จุดใดๆ คือ  $T \sin \theta$  เมื่อ T คือค่าความสามารถการไหลผ่านดิน [ $m^2/hr$ ] เช่น hydraulic conductivity [ $m/hr$ ] คูณกับความหนาชั้นดิน [ $m$ ]

สมมุติฐานข้อ (1) และข้อ (2) รวมกันได้ปริมาณการไหลด้านข้าง q [ $m^2/hr$ ]

$$q = Ra$$

(5-16)



รูปที่ 5-7 นิยามของพื้นที่จำเพาะของกลุ่มน้ำ

ที่มา: Pack R. T. (2005)

สมมติฐานที่ 3 ต่างจากแบบจำลอง TOPMODEL คือไม่สมมติว่าค่า hydraulic conductivity ลดลงตามความลึก หรือทฤษฎีของแบบจำลองตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การไหลของน้ำผ่านชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำประมาณด้วยการไหลสะสมของพื้นที่ (a) ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในพื้นที่ลุ่มน้ำ (grid) และค่าความต่างศักย์ของน้ำในดิน (hydraulic gradient) ของชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งประมาณด้วยค่าความลาดชันของพื้นที่ ( $\tan \theta$ ) โดยนำสมมติฐานดังกล่าวหาความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นในดินส่วนที่เหลือภายหลังสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (storage deficit below saturation) กับค่าดัชนีสภาพภูมิประเทศ ( $T, \ln(a/\tan \theta)$ ) (Beven, 1997) แต่โปรแกรมใช้สมมติฐานว่าค่า hydraulic conductivity มีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้งชั้นดินตั้งแต่ชั้นหินขึ้นมาและใช้ค่า  $\sin \theta$  แทนค่า  $\tan \theta$  เนื่องจากระยะทางการไหลเป็นการไหลตามลาดชันดังนั้นสามารถเขียนสมการของความเปียกชื้นสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$w = \text{Min}\left(\frac{Ra}{T \sin \theta}, 1\right) \quad (5-17)$$

ความเปียกชื้นสัมพันธ์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 ค่าที่เกินจากนี้สมมติให้เป็นการไหลบนดิน อัตราส่วนค่า  $R/T$  ในสมการที่ 5-17 มีหน่วยเป็น  $[m^{-1}]$

### 5.3.3 ค่าดัชนีเสถียรภาพความมั่นคง (Stability Index Definition)

นิยามดัชนีค่าเสถียรภาพความมั่นคง โดยแทนค่าความเป็ยกขึ้นสัมพันธ์สมการที่ 5-17 ลงในสมการสัดส่วนค่าความปลอดภัยไว้มิติจากสมการที่ 5-12 ได้ดังนี้

$$FS = \frac{C + \cos \theta \left[ 1 - \min \left( \frac{R}{T} \frac{a}{\sin \theta}, 1 \right) r \right] \tan \phi}{\sin \theta} \quad (5-18)$$

ค่าความแปรปรวนของ  $a$  และ  $\theta$  พิจารณาจากลักษณะของสภาพภูมิประเทศ ค่าตัวแปร  $C, \tan \phi, r$  และ  $R/T$  โดยค่าอัตราส่วนความหนาแน่น  $r$  กำหนดให้เป็นค่าคงที่ (มีค่าเท่ากับ 0.5) แต่อนุญาตให้ใส่ค่าความไม่แน่นอนของอีกสามตัวแปรเป็นการกระจายแบบสมมาตร เมื่อกำหนดให้ค่า  $R/T = x, \tan \phi = t$  และมีการกระจายค่าแบบสมมาตรกับค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดดังนี้

$$\begin{aligned} C &\approx U(C_1, C_2) \\ x &\approx U(x_1, x_2) \\ t &\approx U(t_1, t_2) \end{aligned} \quad (5-19)$$

ค่าน้อยที่สุดของ  $C$  และค่า  $t$  (เช่น  $C_1, t_1$ ) ร่วมกับค่ามากที่สุดของ  $x$  (เช่น  $x_2$ ) จะเป็นกรณีแย่มากที่สุด ซึ่งกรณีที่แย่มากที่สุดค่า  $FS$  มีค่ามากกว่า 1 ค่า  $SI$  จะเท่ากับค่า  $FS_{\min}$  ดังสมการ

$$SI = FS_{\min} = \frac{C_1 + \cos \theta \left[ 1 - \min \left( x_2 \frac{a}{\sin \theta}, 1 \right) r \right] t_1}{\sin \theta} \quad (5-20)$$

สำหรับพื้นที่ที่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่า 1 มีโอกาสเกิดการพิบัติ มีความน่าจะเป็นเชิงพื้นที่เนื่องจากความไม่แน่นอนในค่า  $C, \tan \phi, T$  และความน่าจะเป็นชั่วคราวของกริดในคุณสมบัติของ  $R$  และค่าดัชนีเปียกชื้น  $a$  ซึ่งเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา ดังนั้นความไม่แน่นอนในตัวแปร  $x$  มีผลรวมของความน่าจะเป็นเชิงพื้นที่กับความน่าจะเป็นแบบชั่วคราว ในพื้นที่นี้ ( $FS_{\min} < 1$ ) ถูกนิยามดังนี้

$$SI = Prob(FS > 1) \quad (5-21)$$

จากการกระจายค่าของ  $C, x, t$  (สมการที่ 5-19) สถานการณ์ที่ดีที่สุดคือเมื่อ  $C = C_2, x = x_1$  และ  $t = t_2$  ได้สมการดังนี้

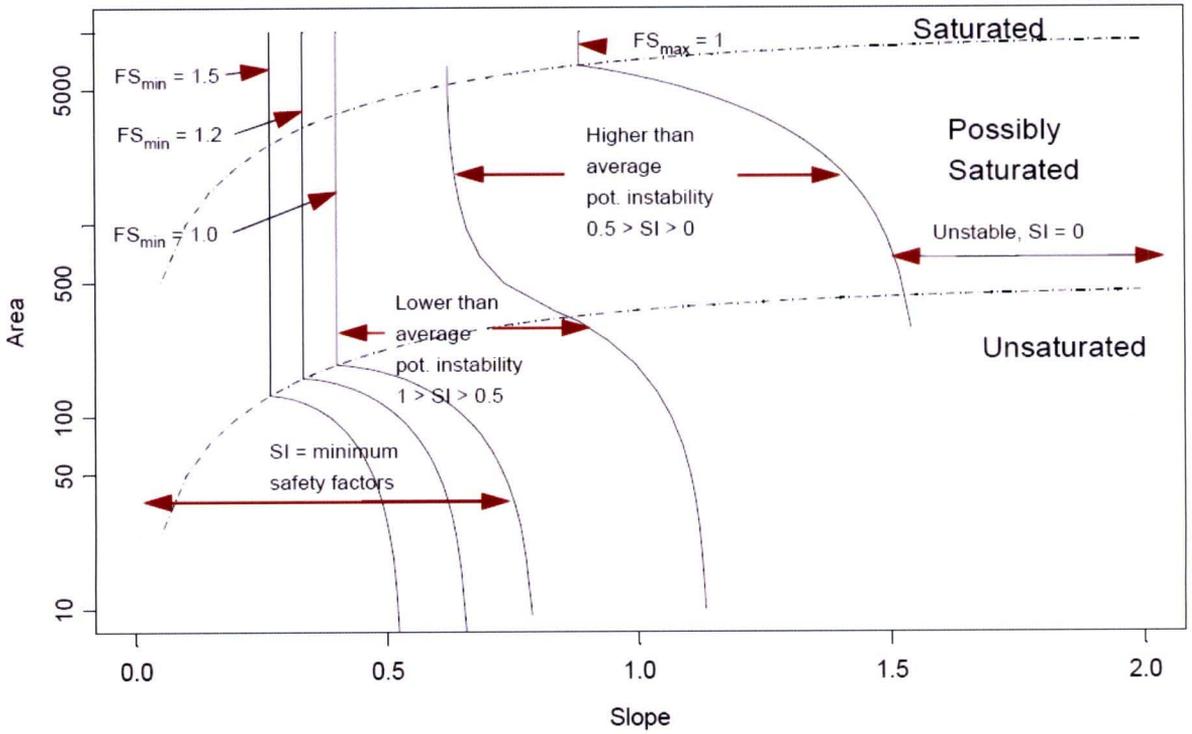
$$FS_{\max} = \frac{C_2 + \cos \theta \left[ 1 - \min \left( x_1 \frac{a}{\sin \theta}, 1 \right) r \right] t_2}{\sin \theta} \quad (5-22)$$

ในกรณีที่  $FS_{max} < 1$  ดังนั้น

$$SI = Prob(FS > 1) = 0 \tag{5-23}$$

พื้นที่ส่วนที่  $SI > 1 (FS_{min} > 1), 0 < SI < 1$  และ  $SI = 0 (FS_{max} < 1)$  ดังแสดงในรูปที่

5-8

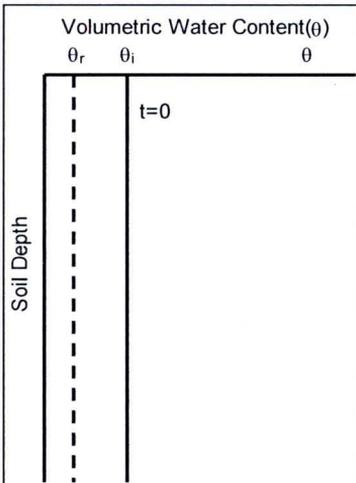


รูปที่ 5-8 ดัชนีเสถียรภาพความมั่นคง

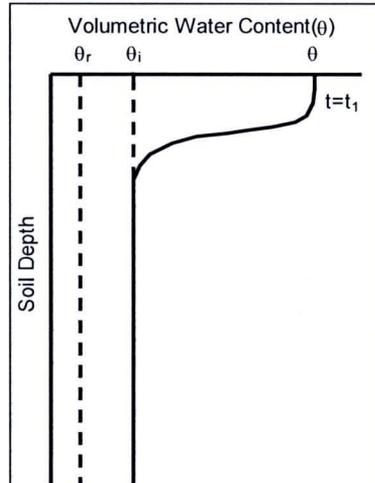
ที่มา: Pack R. T. (2005)

### 5.4 แบบจำลองของ Green and Ampt (Green and Ampt Model, GA\_Model)

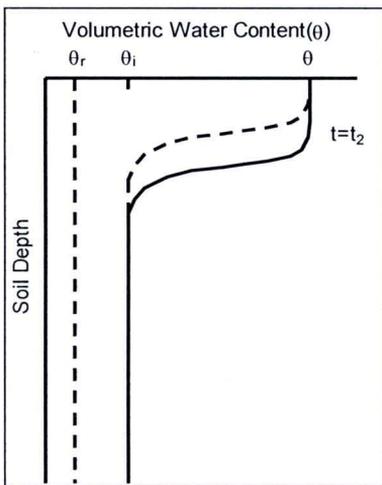
GA\_Model เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินเนื่องจากฝนตก เสนอโดย Green and Ampt ในปี 1911 (Hillel,1998) ในแบบจำลองพิจารณาให้การไหลซึม (Infiltration) ในชั้นดินที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ (Homogeneous) เกิดขึ้นทันทีเมื่อเกิดฝนตก โดยมีอัตราการไหลซึม (Hydraulic conductivity, K) เท่ากับความเข้มข้นน้ำฝนแต่ไม่เกินอัตราการไหลซึมที่อิ่มตัว (Saturated hydraulic conductivity, Ks) ปริมาณน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้นตามความลึก ดังแสดงในรูปที่ 5-9



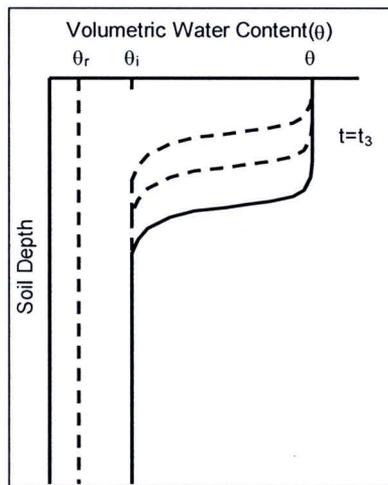
ก. ปริมาณน้ำในดินที่เวลา  $t_0$



ข. ปริมาณน้ำในดินที่เวลา  $t_1$



ค. ปริมาณน้ำในดินที่เวลา  $t_2$



ง. ปริมาณน้ำในดินที่เวลา  $t_3$

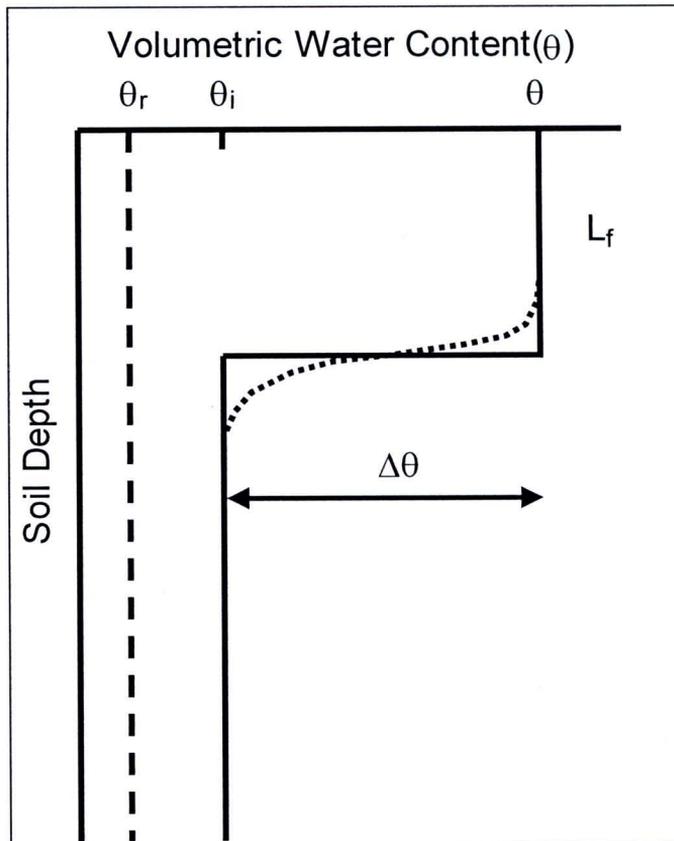
รูปที่ 5-9 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินสำหรับ GA\_Model

จากรูปที่ 5-9 ก. กำหนดให้ปริมาณน้ำในดินเริ่มต้นที่เวลา  $t_0$  เท่ากับ  $\theta_i$  ตลอดทั้งความลึกของชั้นดินที่พิจารณา โดยที่  $\theta_r$  เป็นความชื้นต่ำสุดของดิน เมื่อเกิดฝนตกที่อัตราคงที่ ความชื้นจะเพิ่มขึ้นทันที ดังแสดงในรูปที่ 5-9 ข. และเมื่อเวลาผ่านไปความชื้นในมวลดินที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าคงที่และขยายขอบเขตลงสู่ชั้นดินด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 5-9 ค. และ 5-9 ง. ขอบเขตของชั้นดินที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นเรียกว่า Wetting front

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของดินดังกล่าวสามารถเขียนเป็นรูปร่างง่ายได้ดังแสดงในรูปที่ 5-10 ในการวิเคราะห์พิจารณาให้การไหลของน้ำผ่านมวลดินเป็นไปตามกฎของ Darcy (Darcy's law) ดังแสดงในสมการที่ 5-24

$$v = K \frac{\partial H}{\partial z} \tag{5-24}$$

|        |                                 |  |
|--------|---------------------------------|--|
| โดยที่ | $v$                             | = ความเร็วของการไหล (L/T)                                    |
|        | $K$                             | = ความสามารถในการซึมผ่านของดิน (Hydraulic conductivity, L/T) |
|        | $H$                             | = แรงดันน้ำ (L)  |
|        | $Z$                             | = ระยะการไหล (L)   |
|        | $\frac{\partial H}{\partial z}$ | = ความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient)                    |



รูปที่ 5-10 แบบจำลองการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินของ GA\_Model

ในกรณีที่ ดินเป็นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ การไหลเป็นแบบไม่คงที่ (Unsteady flow) โดยมีอิทธิพลของแรงดึงน้ำในดิน (Matric suction) เข้ามาเกี่ยวข้อง และความลึกของ Wetting front เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ฝนตกดังแสดงในสมการที่ 5-25

$$\Delta\theta \frac{dL_f}{dt} = K \frac{H_0 - H_f + L_f}{L_f} \quad (5-25)$$

|       |                |  |
|-------|----------------|--|
| เมื่อ | $\Delta\theta$ | = ปริมาณน้ำในดินที่เพิ่มขึ้น ( $\theta_i - \theta$ ) |
|       | $K$            | = ความสามารถในการซึมผ่านของดิน (L/T)                 |
|       | $H_0$          | = แรงดึงน้ำในดินที่อยู่ด้านล่างของ Wetting front (L) |

Hf = แรงดึงน้ำในดินที่ผิวดิน (L)

Lf = ความลึกของ Wetting front (L)

คำนวณหาค่า Lf โดยทำการ Integration สมการที่ 5-25 จะได้ผลดังนี้

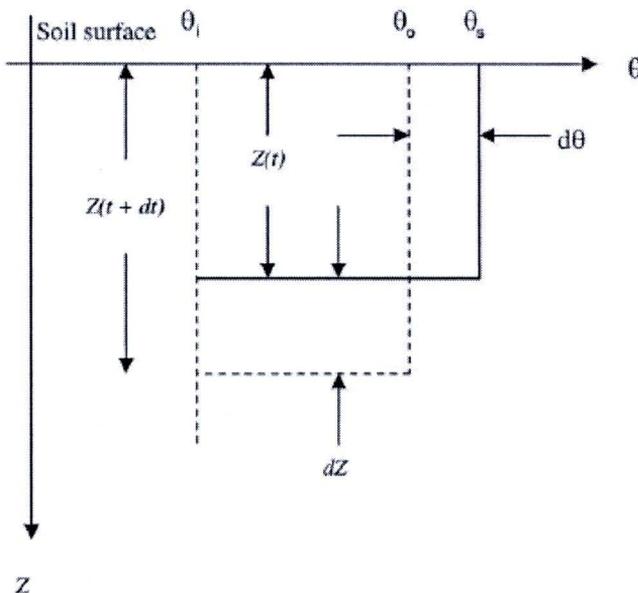
$$L_f = \frac{Kt}{\Delta\theta} + (H_0 - H_f) \ln \left[ 1 + \frac{L_f}{(H_0 - H_f)} \right] \quad (5-26)$$

ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาความลึกของ Wetting front ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากฝนตกคงที่ในช่วงเวลา

$$\Delta t = t^{j+1} - t^j$$

$$L_f^{j+1} = L_f^j + \frac{K\Delta t}{\Delta\theta} + (H_0 - H_f) \ln \left[ \frac{H_0 - H_f + L_f^{j+1}}{H_0 - H_f + L_f^j} \right] \quad (5-27)$$

กรณีที่ฝนตกไม่คงที่ (Non-uniform rainfall) หรือไม่ต่อเนื่อง ปริมาณน้ำในมวลดินสามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นได้เมื่อฝนตกในอัตราที่สูงกว่าความสามารถในการซึมน้ำของดินขณะที่พิจารณา และลดลงได้เมื่อฝนหยุดตกหรือมีความเข้มต่ำกว่าความสามารถในการซึมน้ำของดิน จากผลงานวิจัยของ Krzysztof (1993) และ Ogden and Saghafian (1997) ได้นำเสนอการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินเนื่องจากฝนตกไม่คงที่ด้วยแบบจำลองของ Green and Ampt โดยที่ Krzysztof (1993) ได้พัฒนาแบบจำลอง Piston Model ส่วน Ogden and Saghafian (1997) ได้พัฒนาแบบจำลอง Green-Ampt Infiltration with Redistribution Model โดยมีหลักการสมดุลความชื้นดังแสดงในรูปที่ 5-11



รูปที่ 5-11 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินเนื่องจากฝนตกไม่คงที่

ที่มา: Ogden and Saghafian (1997)

เมื่อความเข้มของน้ำฝน ( $r$ ) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ในช่วงเวลา  $dt$  ทำให้ปริมาณน้ำส่วนที่อยู่เหนือ Wetting front เกิดการเปลี่ยนแปลง ขณะเดียวกันความลึกของ Wetting front ยังคงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5-11 และสมการที่ 5-28

$$\frac{dZ}{dt}(\theta_0 - \theta_i) + Z \frac{d\theta}{dt} = r - K(\theta_i) \quad (5-28)$$

|        |                       |   |
|--------|-----------------------|---|
| โดยที่ | $\frac{dZ}{dt}$       | = อัตราการเปลี่ยนแปลงความลึกของ Wetting front ต่อเวลา |
|        | $\theta_0 - \theta_i$ | = ปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป                      |
|        | $Z$                   | = ความลึกของ Wetting front ( $L$ )                    |
|        | $\frac{d\theta}{dt}$  | = อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามเวลา                  |
|        | $r$                   | = ความเข้มน้ำฝน ( $L/T$ )                             |
|        | $K(\theta_i)$         | = ความสามารถในการซึมน้ำของดินที่ความชื้น $\theta_i$   |

เนื่องจากความสามารถในการซึมน้ำของดิน ( $K$ ) ความชื้นในมวลดิน ( $\theta$ ) และแรงดึงน้ำในดิน (Matric suction) สัมพันธ์กัน ซึ่งมีนักวิจัยได้สร้างรูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าวไว้หลายท่าน ตัวอย่าง เช่น Brooks and Corey (1964) ดังแสดงในสมการที่ 5-29

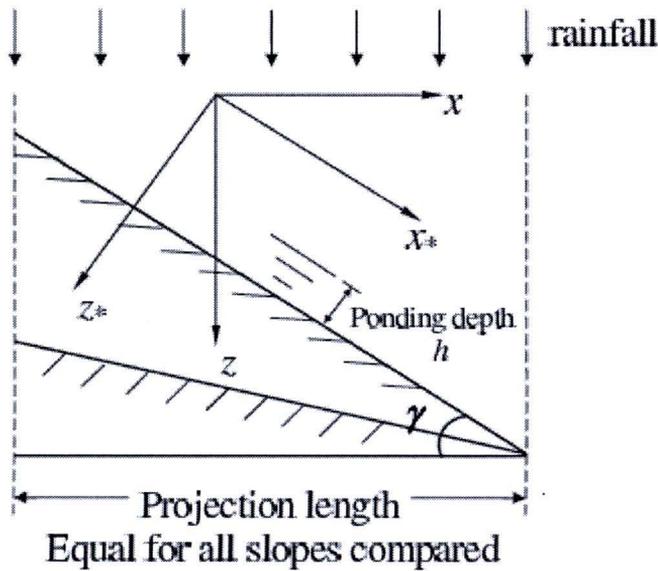
$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{h_b}{h} \right)^\lambda \quad (5-29)$$

$$K_r = \frac{K(h)}{K_s} = \Theta^{3+2/\lambda} \quad (5-30)$$

|        |            |   |
|--------|------------|---|
| โดยที่ | $\Theta$   | = ปริมาตรความชื้นสัมพัทธ์                     |
|        | $\theta$   | = ปริมาตรความชื้นใดๆ                          |
|        | $\theta_r$ | = ปริมาตรความชื้นต่ำสุด                       |
|        | $\theta_s$ | = ปริมาตรความชื้นเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำ       |
|        | $K_r$      | = ความสามารถในการซึมน้ำสัมพัทธ์               |
|        | $K(h)$     | = ความสามารถในการซึมน้ำที่แรงดึงน้ำใดๆ        |
|        | $K_s$      | = ความสามารถในการซึมน้ำเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำ |
|        | $h$        | = แรงดึงน้ำในดิน                              |
|        | $h_b$      | = แรงดึงน้ำในดินที่ความชื้นต่ำสุด             |

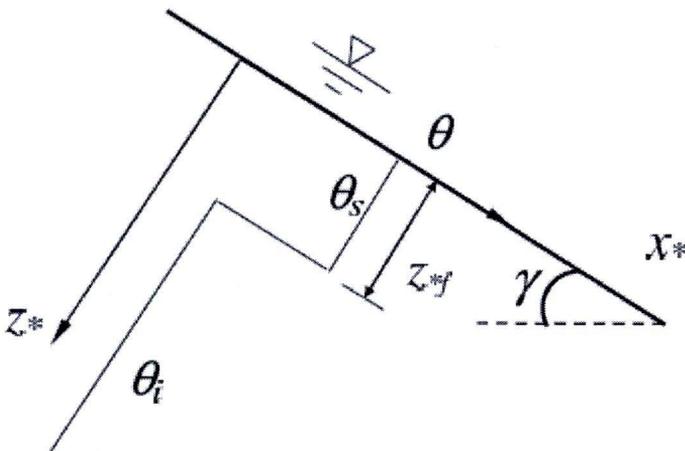
แบบจำลอง GA\_Model สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินบนลาดเอียง ได้แก่ผลงานวิจัยของ Li and Young (2006) ดังแสดงในรูปที่ 5-12 โดยพิจารณาให้ดินมีคุณสมบัติสม่ำเสมอ และเท่ากันทุกทิศทาง (Homogeneous and Isotropic properties)

การวิเคราะห์ดำเนินการเช่นเดียวกับในแนวราบโดยหมุนแกนจากพิกัด X-Z ซึ่งเป็นแนวราบและแนวตั้งตามทิศทางของแรงโน้มถ่วง ไปเป็น X\*-Z\* ซึ่งเป็นแกนขนานกับลาดเอียงที่มีมุมความลาดชันเท่ากับ  $\gamma$  และใช้แบบจำลอง GA\_Model ในการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 5-13



รูปที่ 5-12 แบบจำลองการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินบนลาดเอียง

ที่มา: Li and Young (2006)



รูปที่ 5-13 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินบนลาดเอียงด้วยแบบจำลอง GA\_Model

ที่มา: Li and Young (2006)

การวิเคราะห์ความลึกของ Wetting front พิจารณาอิทธิพลของลาดเอียงดังแสดงในสมการที่ 5-31 และ 5-32

$$\Delta\theta \frac{dZ_{*f}}{dt} = K_e \frac{Z_{*f} \cos \gamma + S_f + H}{Z_{*f}} \quad (5-31)$$

$$Z_{*f} = \frac{K_e \cos \gamma t}{\Delta\theta} + \frac{(S_f + H)}{\cos \gamma} \ln \left[ \frac{Z_{*f} \cos \gamma + S_f + H}{S_f + H} \right] \quad (5-32)$$

โดยที่  $Z_{*f}$  = ความลึกของ Wetting front ในแนวแกน  $Z^*$   
 $\gamma$  = มุมของลาดเอียง  
 $S_f$  =  $H_0 - H_f$   
 $H$  = ความลึกของน้ำกรณีที่มีน้ำท่วมผิวดิน

สำหรับการไหลในทิศทางขนานกับลาดเอียง ( $X^*$ ) ที่ความยาวของลาดเอียงยาวกว่าความลึกมากๆ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินน้อยมาก (Iverson, 2000 และ Li and Young, 2006) เนื่องจากปริมาณน้ำที่ไหลเข้าจะเท่ากับปริมาณน้ำที่ไหลออกไป

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินบนลาดเอียง มีขอบเขตการวิเคราะห์เป็นแบบ 1 มิติ (One Dimensional infiltration analysis) โดยมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบเอียงซึ่งพิจารณาให้เป็นลาดอนันต์ (Infinite slope) สามารถนำมาวิเคราะห์ในเชิงพื้นที่ร่วมกับข้อมูลความชันในระบบ GIS ได้ และเนื่องจากการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ ทำให้สามารถดำเนินการได้ในแต่ละ Pixel แยกเป็นอิสระต่อกัน นอกจากนี้เนื่องจาก GA\_Model เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ใช้ระยะเวลาในการคำนวณน้อย ทำให้สามารถคำนวณในเชิงพื้นที่ได้จำนวนมาก ซึ่งเหมาะสมกับการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในดินเนื่องจากฝนรายชั่วโมง

อย่างไรก็ตามขอบเขตของแบบจำลองซึ่งเป็นแบบ 1 มิติ อาจได้รับผลจากบริเวณที่การเปลี่ยนแปลงความชัน ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในบริเวณดังกล่าว รวมทั้งไม่ได้พิจารณาถึงพฤติกรรมที่มีผลกระทบจากพื้นที่ข้างเคียงซึ่งอยู่ติดกัน ดังนั้นแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ได้ในพื้นที่ขนาดใหญ่ที่มีจำนวน Pixel มากๆ

แบบจำลองที่นำเสนอดังกล่าวข้างต้น มีข้อดีข้อเสียในการนำมาใช้งานแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 ข้อดีข้อเสียการประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อปรับปรุงแบบจำลองดัชนีความชุ่มชื้นของดิน

|   | แบบจำลองเพื่อปรับปรุง<br>แบบจำลองดัชนีความชุ่มชื้นของดิน |        |                   |
|---|--|--------|-------------------|
|   | Tank<br>Model  | SINMAP | Green<br>and Ampt |
| 1. การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นในดินอย่างง่ายและวิเคราะห์เชิง 1 มิติ  | ✗  | ✗      | ✓                 |
| 2. วิเคราะห์ความชุ่มชื้นเชิง 3 มิติ   | ✓  | ✓      | ✗                 |
| 3. วิเคราะห์เชิงพื้นที่บริเวณกว้างได้และประยุกต์กับโปรแกรมภูมิศาสตร์สารสนเทศได้ (GIS)   | ✓  | ✓      | ✓                 |
| 5. การไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดินเพื่อหาปริมาณความชื้นในมวลดิน ณ เวลาใดๆ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณฝนที่ตกจริงในแต่ละพื้นที่ (antecedent moisture) | ✓  | ✓      | ✓                 |
| 6. พิจารณาถึงการไหลด้านข้างของการเปลี่ยนความชื้นของกริดรอบข้าง  | ✓  | ✓      | ✗                 |
| 7. การวิเคราะห์พฤติกรรมดินไม่อิ่มน้ำ  | ✓  | ✓      | ✓                 |
| 8. การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน   | ✓  | ✓      | ✗                 |
| 9. พิจารณาตัวแปรที่มีความไม่แน่นอนของค่าคุณสมบัติของดิน   | ✗  | ✓      | ✗                 |
| 10. โปรแกรมสำเร็จรูป  | ✗  | ✓      | ✗                 |
| 11. ความเหมาะสมด้านเวลาการวิเคราะห์   | ✓  | ✗      | ✓                 |

จากการศึกษารวบรวมข้อมูลเปรียบเทียบข้อจำกัดของแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองคณะผู้วิจัยเห็นว่า แบบจำลองของ Green and Ampt เหมาะสมต่อการพัฒนาแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาด้านดินถล่ม รายละเอียดการพัฒนาแบบจำลองและการใช้แบบจำลองรวมทั้งการได้มาซึ่งค่าตัวแปรคุณสมบัติของดินทางวิศวกรรม ดังจะกล่าวต่อไปนี้

#### 5.4.1 แบบจำลองเพื่อหาค่าความชื้นสะสมวิกฤติในดิน

ในการวิเคราะห์ความชื้นสะสมวิกฤติในดินเนื่องจากฝนตกบนพื้นที่ลาดเอียง คณะผู้วิจัยได้พัฒนา แบบจำลองวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน โดยพิจารณาถึงพฤติกรรมของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) ตามแบบจำลองของ Green and Ampt ผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปแบบแผนที่พลวัตของความชื้นในดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ศึกษา โดยมีหลักการและวิธีการดังต่อไปนี้

#### 5.4.1.1. หลักการของแบบจำลองการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน

พิจารณาพฤติกรรมของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) ความสามารถในการซึมผ่านของดิน (Hydraulic Conductivity) และแรงดึงน้ำของดิน (Matric Suction) ไม่คงที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำในดิน (Volumetric Water Content) แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน ใช้วิธีการของ Green and Ampt และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินและแรงดึงน้ำของดิน (Soil Water Characteristic Curve, SWCC) และความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการซึมผ่านและแรงดึงน้ำของดิน (Permeability Function, PF) ใช้วิธีการของ Van Genuchten (1980)

อิทธิพลของลาดเอียงพิจารณาการไหลซึมผ่านชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำด้วยการประยุกต์ใช้วิธี Green and Ampt ที่เสนอโดย Li and Young (2006) โดยพิจารณาการไหลซึมแบบ 1 มิติ (One-Dimensional Flow) ในทิศทางตั้งฉากกับผิวเอียงของลาด ส่วนการไหลในทิศทางขนานกับผิวเอียงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน (Li and Young, 2006)

อิทธิพลของความไม่คงที่หรือความไม่ต่อเนื่องของน้ำฝนที่ซึมผ่านชั้นดินทำให้อัตราการไหลซึมผ่านชั้นดินไม่คงที่ ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามวิธีการของ Krzysztof (1993) และ Ogden and Saghafian (1997)

สำหรับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นการดำเนินการในระบบ GIS โดยการเขียนรหัส (Code) ควบคุมการทำงานด้วยภาษา Visual Basic ในโปรแกรม ArcGIS ซึ่งจะช่วยอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้ โดยจะทำหน้าที่ตั้งแต่การรับข้อมูลปริมาณน้ำฝน การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน และแสดงผลการวิเคราะห์

#### 5.4.1.2. วิธีการวิเคราะห์ของแบบจำลอง

แบบจำลองการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน ดำเนินการโดยการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของ GIS โดยให้คำนวณการไหลซึมตามแบบจำลอง Green and Ampt โดยในการดำเนินงานแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 5-14 ประกอบด้วย

##### 5.4.1.2.1 การจัดเตรียมแผนที่ความชัน (Slope Map)

ในขั้นตอนนี้ใช้ ArcGIS สร้างข้อมูลความชันในพื้นที่ศึกษาจากข้อมูลความสูงของพื้นที่

##### 5.4.1.2.2 การกำหนดค่าระดับ API วิกฤต (API<sub>cr</sub>)

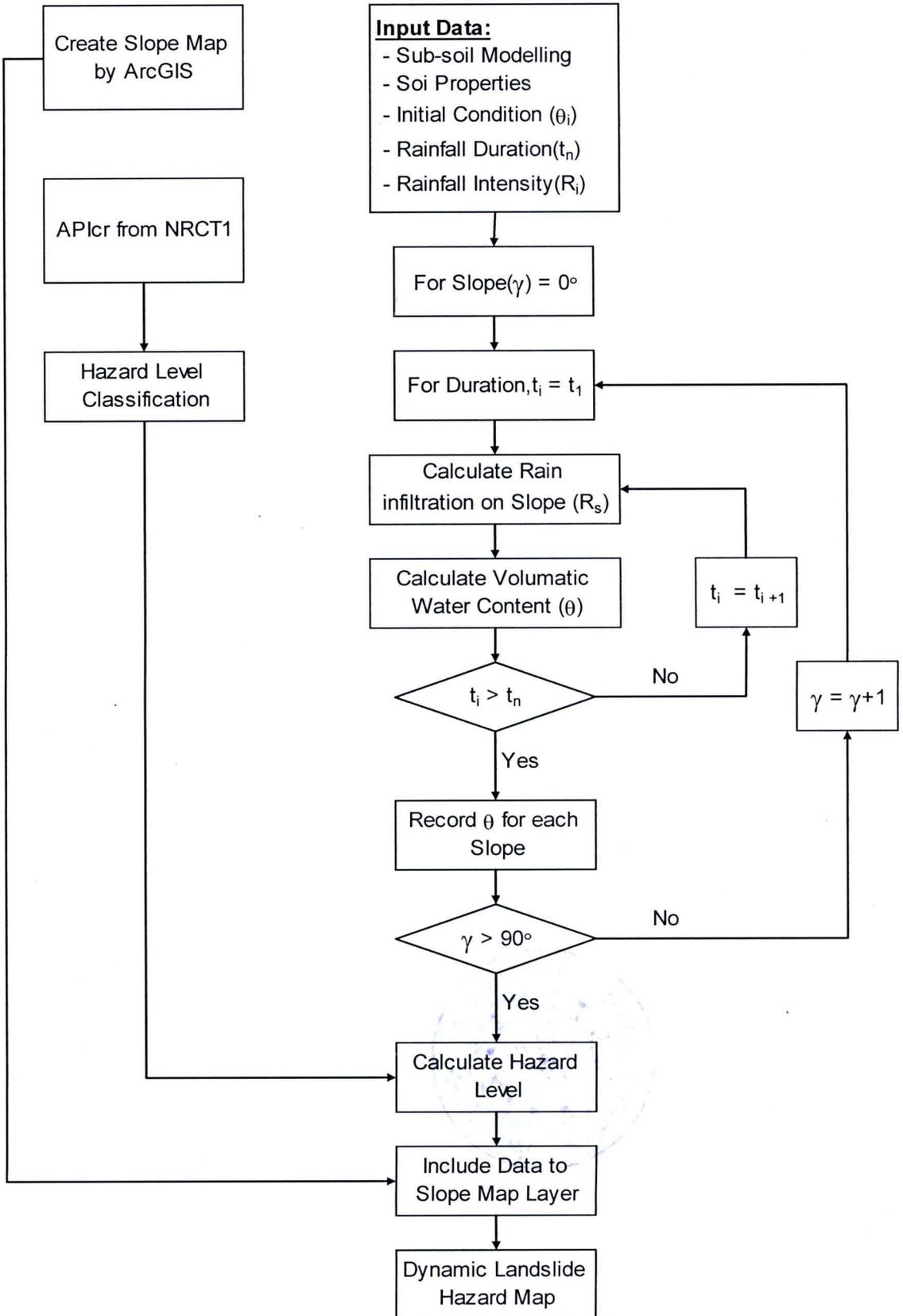
ค่า API วิกฤตที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้จากโครงการ วช.1 โดยแปลงจากปริมาณน้ำในหน่วยความสูงของน้ำ เป็นปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร และระดับความลึกวิกฤตซึ่งได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดเอียงแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope)

#### 5.4.1.2.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน

เป็นส่วนหลักของการวิเคราะห์ มีขั้นตอนดังนี้

- ก. จำลองลักษณะชั้นดินบนลาดเอียง โดยการกำหนดความลึกของชั้นดิน (Soil Depth) หน่วยเป็น เมตร และแบ่งเป็นชั้นย่อยโดยกำหนดเป็นจำนวนชั้นย่อย
- ข. กำหนดคุณสมบัติด้านการซึมน้ำของดินได้แก่ Parameter ในแบบจำลองของ Van Genuchten (1980) และค่า Saturated Hydraulic Conductivity (Ks)
- ค. กำหนดค่าปริมาณน้ำในดินในแต่ละชั้นดินในสถานะเริ่มต้น (Initial Condition)
- ง. กำหนดช่วงเวลาที่ฝนตก (Duration) หน่วยเป็น ชั่วโมง และปริมาณน้ำฝนในแต่ละชั่วโมง
- จ. การวิเคราะห์ ดำเนินการโดยใช้วิธีการของ Green and Ampt โดยเริ่มทำการวิเคราะห์ตั้งแต่ความลาดชัน  $0^\circ$  จนถึง  $89^\circ$  ครึ่งละ  $1^\circ$  โดยในแต่ละความลาดชันจะทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินเนื่องจากฝนตกครึ่งละ 1 ชั่วโมงเริ่มตั้งแต่ชั่วโมงแรกจนถึงชั่วโมงสุดท้ายตามที่ได้กำหนดไว้ ผลลัพธ์จะได้เป็นปริมาณน้ำโดยปริมาตร (Volumetric Water Content) ในแต่ละชั้นดินย่อย
- ฉ. เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละชั้นดินในทุกองศาความลาดชันกับปริมาณน้ำวิกฤติที่ได้จากการวิเคราะห์  $API_{cr}$  จากงานวิจัยทุนสนับสนุน วช. 1(2551) กำหนดระดับวิกฤติที่ความลาดชันต่างๆ
- ช. นำเข้าผลที่ได้ในแผนที่ความลาดชันที่เตรียมไว้
- ฌ. แสดงผลในรูปแบบแผนที่แสดงระดับ API วิกฤตเชิงพลวัต





รูปที่ 5-14 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความชื้นสะสมวิกฤตในดินเนื่องจากฝนตกบนพื้นที่ลาดเอียง

### 5.4.1.3 การวิเคราะห์ความชื้นด้วยแบบจำลอง

ค่า Parameter ต่างๆ ที่เป็นคุณสมบัติของดินที่เกี่ยวข้องกับการซึมน้ำของน้ำฝน ได้แก่ ความสามารถในการซึมน้ำของดิน (Hydraulic Conductivity) Soil Water Characteristic Curve (SWCC) และ Permeability Function (PF) ได้จากการทดสอบคุณสมบัติดินจากโครงการ การศึกษา พฤติกรรมการเกิดน้ำท่วม-ดินถล่ม ในพื้นที่ต้นแบบ เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับกำหนดเกณฑ์ และวิธีการในการเตือนภัยโดย (2551) ที่ SWCC และ PF จะใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ของ Van Genuchten (1980) ดังแสดงในสมการที่ 5-33 และ 5-34

Soil-water characteristic curve, SWCC

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (5-33)$$

Permeability function, PF

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (5-34)$$

โดยที่

|             |   |  |
|-------------|---|--|
| $\theta$    | = | ความชื้นโดยปริมาตรในมวลดิน   |
| $\theta_s$  | = | ความชื้นโดยปริมาตรในมวลดินในสภาวะอิ่มตัว   |
| $\theta_r$  | = | ความชื้นต่ำสุดโดยปริมาตรในมวลดิน   |
| $\alpha$    | = | Parameter ซึ่งเป็นฟังก์ชันของจุดที่อากาศเข้าไปในช่องว่างในมวลดิน   |
| $n$         | = | Parameter ซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงอัตราการลดลงของความชื้นในดิน<br>หลังจากจุดที่อากาศเข้าไปในช่องว่างในมวลดิน |
| $m$         | = | Parameter ซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงจุดที่ความชื้นคงค้างในมวลดิน,<br>$m=1-1/n$                                 |
| $h$         | = | แรงดึงน้ำในมวลดิน  |
| $K(\theta)$ | = | ความสามารถในการซึมน้ำของดิน (cm/h)   |
| $K_s$       | = | ความสามารถในการซึมน้ำของดินที่สภาวะอิ่มตัว (cm/h)  |

เนื่องจาก SWCC และ PF ไม่ได้ดำเนินการทดสอบโดยตรง แต่เป็นการประมาณโดยวิธีทางอ้อมจากคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ซึ่งดำเนินการโดยวิธีที่เสนอโดย Zapata (1999) ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติการกระจายตัวของเม็ดดินและความเหนียว (Plasticity, PI) ของดิน กับค่า Parameter ของแบบจำลองความสัมพันธ์ SWCC ของ Fredlund and Xing (1994) ดังแสดงในสมการที่ 5-35 และ 5-36

$$\theta = C(h) \frac{\theta_s}{\left[ \ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{h}{a} \right)^b \right] \right]^c} \quad (5-35)$$

เมื่อ

$$C(h) = 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{h_r} \right)} \quad (5-36)$$

|        |            |  |
|--------|------------|--|
| โดยที่ | $\theta$   | = ความชื้นโดยปริมาตรในมวลดิน   |
|        | $\theta_s$ | = ความชื้นโดยปริมาตรในมวลดินในสภาวะอิ่มตัว   |
|        | a          | = Parameter ซึ่งเป็นฟังก์ชันของจุดที่อากาศเข้าไปในช่องว่างในมวลดิน                                     |
|        | b          | = Parameter ซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงอัตราการลดลงของความชื้นในดินหลังจากจุดที่อากาศเข้าไปในช่องว่างในมวลดิน |
|        | c          | = Parameter ซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงจุดที่ความชื้นคงค้างในมวลดิน   |
|        | h          | = แรงดึงน้ำในมวลดิน  |
|        | hr         | = แรงดึงน้ำในมวลดินที่ความชื้นต่ำสุดโดยปริมาตร   |

Zapata (1999) ได้ทำการศึกษาจากดิน 190 ประเภท โดยจำแนกดินออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ดินที่มีความเหนียว ( $PI > 0$ ) ประมาณ 70 ชนิด และดินที่ไม่มีมีความเหนียว ( $PI = 0$ ) ประมาณ 120 ชนิด โดยที่ดินกลุ่มที่มีความเหนียวจะพิจารณาความสัมพันธ์จากปริมาณของมวลดินที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 และดัชนีความเหนียว (PI) ส่วนกลุ่มดินที่ไม่มีมีความเหนียวจะพิจารณาจากขนาดของเม็ดดินที่มีปริมาณของดินขนาดเล็กกว่าอยู่ 60% โดยน้ำหนัก ( $D_{60}$ ) ค่า Parameter ต่างๆ หาได้ดังนี้

สำหรับดินที่มีความเหนียว ( $PI > 0$ )

$$a = 0.00364(wPI)^{3.35} + 4(wPI) + 11 \quad (5-37)$$

$$\frac{b}{c} = -2.313(wPI)^{0.14} + 5 \quad (5-38)$$

$$c = 0.0514(wPI)^{0.465} + 0.5 \quad (5-39)$$

$$\frac{h_r}{a} = 32.44e^{0.0186(wPI)} \quad (5-40)$$

โดยที่

- wPI = Passing#200xPI  
 Passing#200 = ปริมาณของมวลดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 เทียบเป็นทศนิยม  
 PI = ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index)

สำหรับดินที่ไม่มีค่าความเหนียว ( $PI = 0$ )

$$a = 0.8627(D_{60})^{-0.751} \quad (5-41)$$

$$\bar{b} = 7.5 \quad (5-42)$$

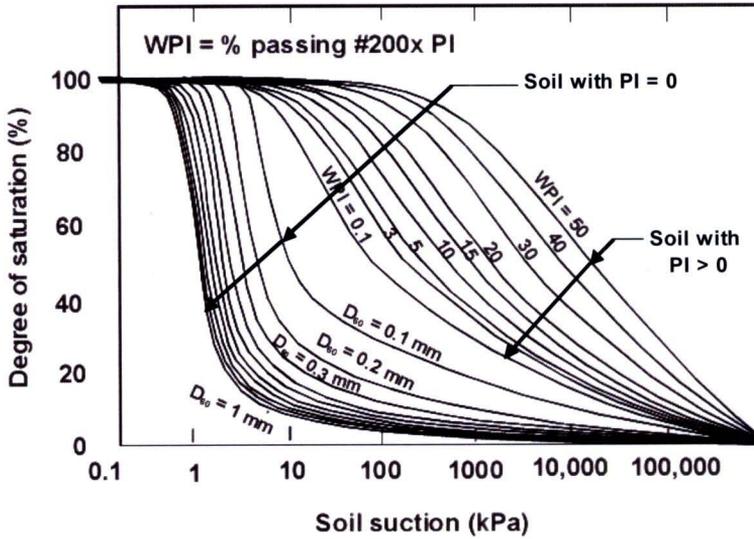
$$c = 0.1772 \ln(D_{60}) + 0.7734 \quad (5-43)$$

$$\frac{h_r}{a} = \frac{1}{D_{60} + 9.7e^{-4}} \quad (5-44)$$

โดยที่

- $D_{60}$  = ขนาดของเม็ดดินที่มีปริมาณของดินขนาดเล็กลงอยู่ 60% (mm)

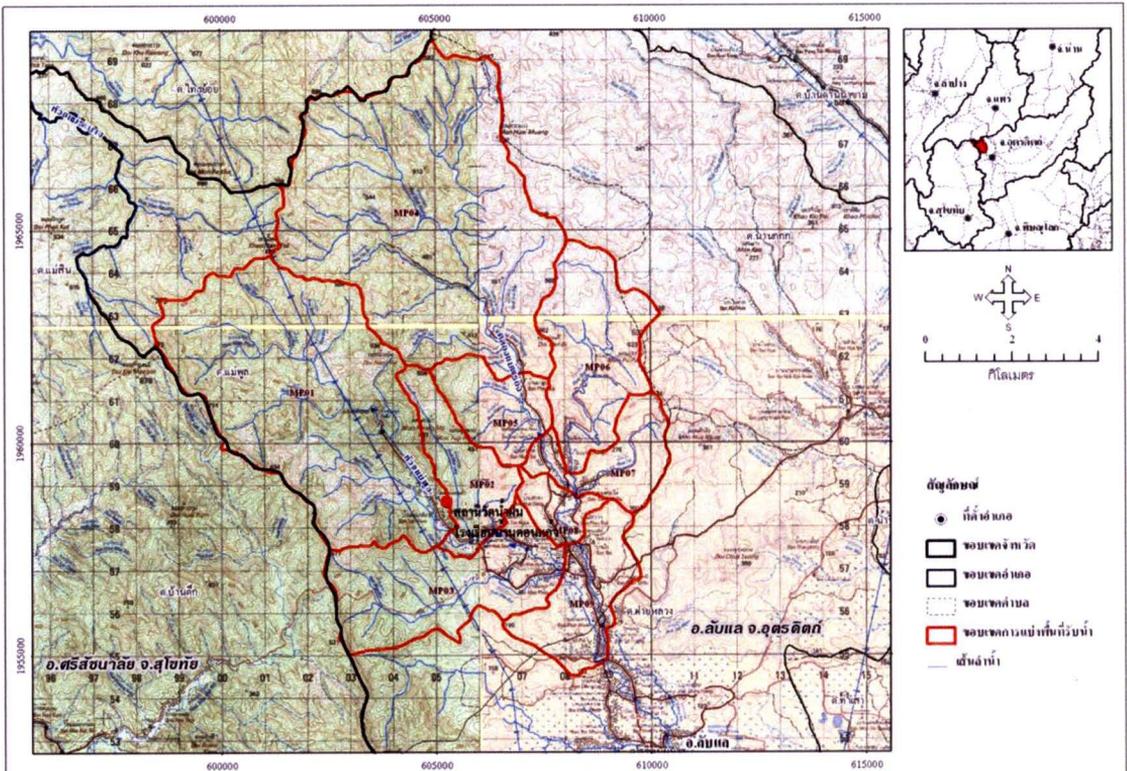
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำในมวลดินกับปริมาณน้ำในมวลดินซึ่งพิจารณาในรูปของระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ตามค่า wPI และ  $D_{60}$  โดยวิธีการประมาณของ Zapata (1999) แสดงในรูปที่ 5-15



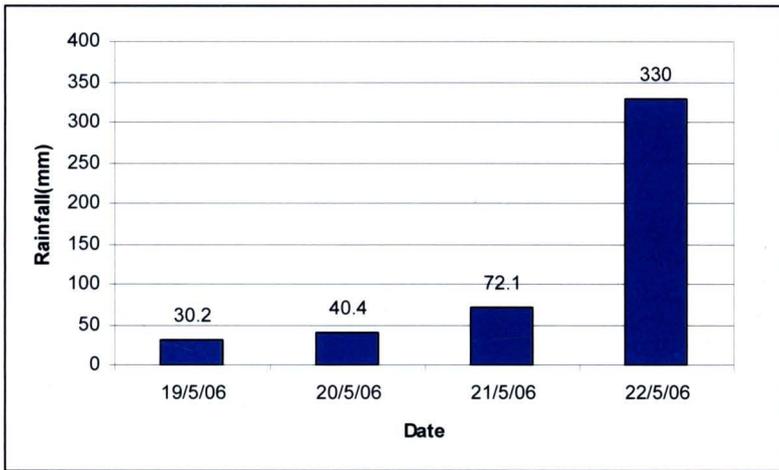
รูปที่ 5-15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในมวลดินกับแรงดึงน้ำในดิน (Zapata, 1999)

#### 5.4.1.4 การทดสอบการทำงานของแบบจำลอง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในพื้นที่ศึกษาตำบลแม่พูล โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝนดังแสดงในรูปที่ 5-16 ข้อมูลน้ำฝนที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นข้อมูลในช่วงวันที่ 19 - 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2549 ซึ่งเป็นช่วงที่เคยเกิดดินถล่ม ดังแสดงในรูปที่ 5-17



รูปที่ 5-16 ตำแหน่งสถานีวัดน้ำฝนในพื้นที่แม่พูล อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์



รูปที่ 5-17 ปริมาณน้ำฝนที่ตกในช่วงวันที่ 19-22 พฤษภาคม พ.ศ. 2549

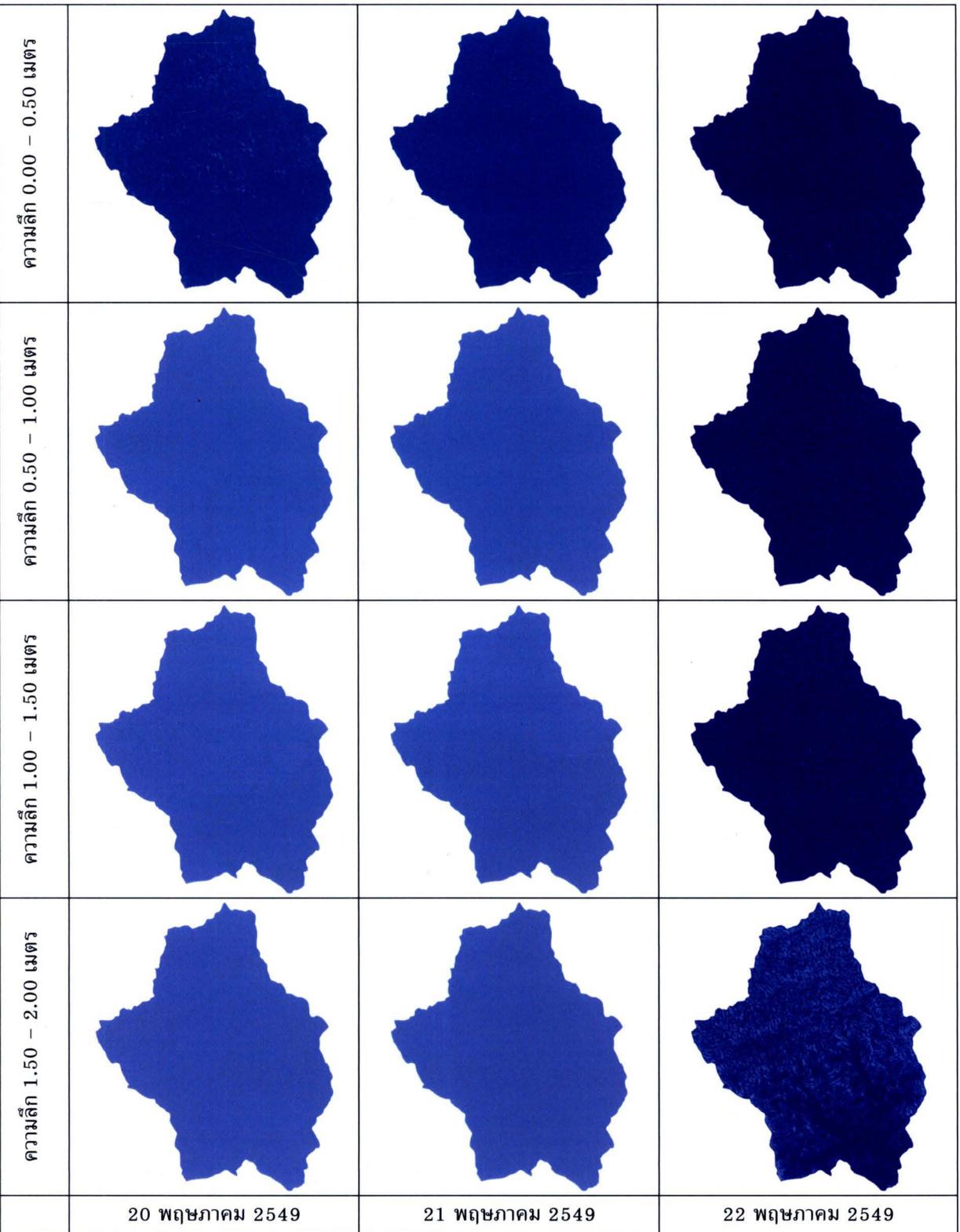
การจำลองลักษณะของลาดเอียงในพื้นที่ศึกษาและกำหนดคุณสมบัติของดินดังนี้

- ความลึกของดินที่ทำการวิเคราะห์ 6 m
- จำนวนชั้นดินย่อย 12 ชั้น
- ความสามารถในการซึมน้ำเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำ  $1 \times 10^{-5}$  m/sec
- ค่า Parameter สำหรับ SWCC และ PF
- ความชื้นในดินโดยปริมาตรขณะที่อิ่มตัวด้วยน้ำ 0.43
- ความชื้นในดินต่ำสุดโดยปริมาตร 0.10
- Parameter  $\alpha$  .08
- Parameter n 1.5
- Parameter m 0.333
- ความชื้นในดินเริ่มต้น 0.2

ข้อมูลดังกล่าวจะถูกกรอกลงในกรอบตอบรับข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 5-18 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมที่เขียนขึ้น

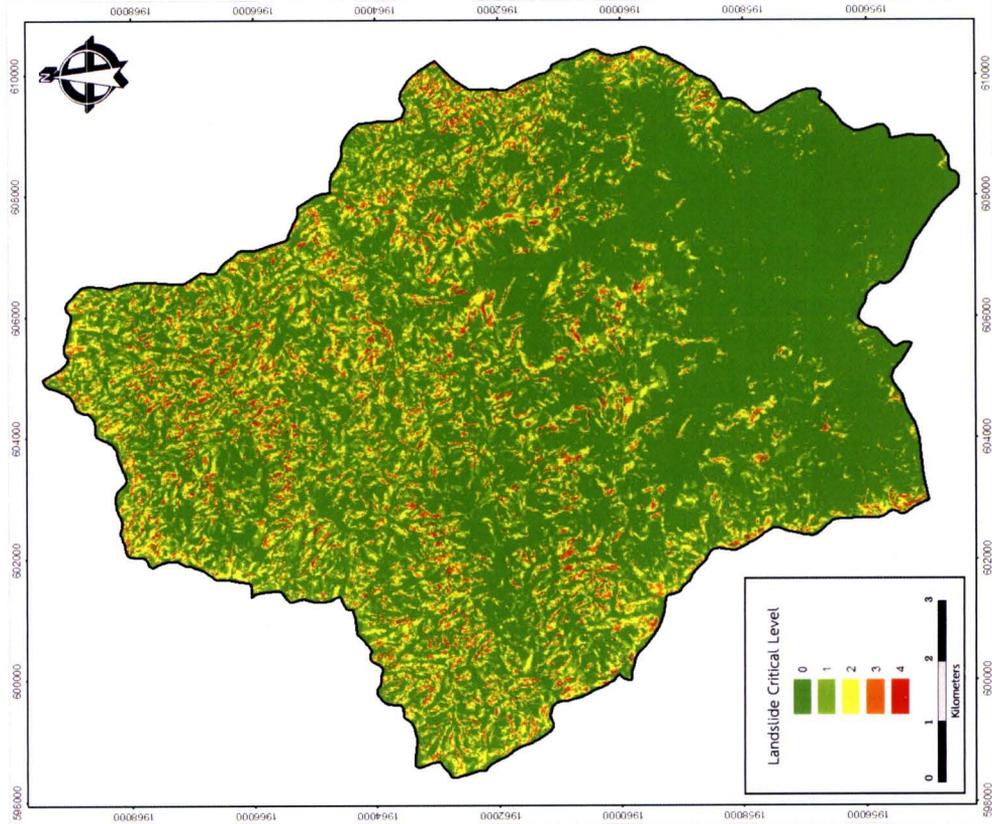
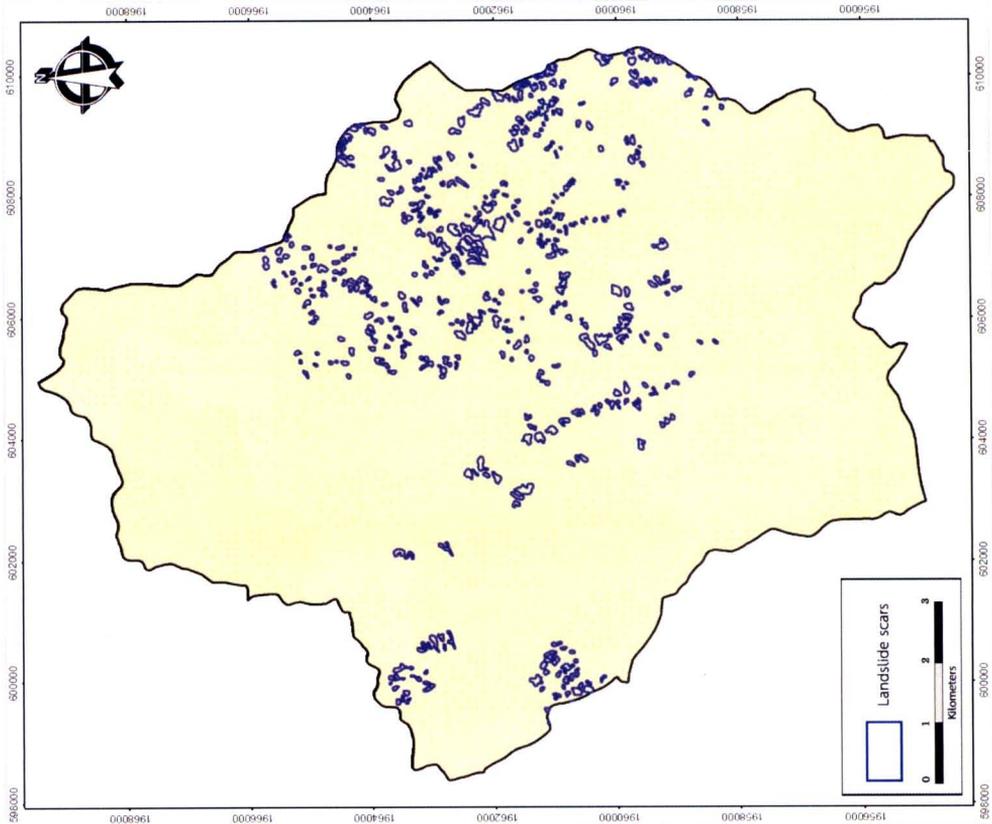
รูปที่ 5-18 กรอบตอบรับข้อมูล

ผลการวิเคราะห์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินในพื้นที่ศึกษา ที่เกิดจากปริมาณน้ำฝนติดต่อกัน แต่ไม่สม่ำเสมอ โดยในวันสุดท้ายจะมีปริมาณฝนสูงสุดประมาณ 330 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5-19 ซึ่งจากรูปจะพบการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นในวันที่ 2 ในชั้นดินที่ 0.00-0.50 เมตร ส่วนในชั้นที่ถัดลงมายังไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปริมาณน้ำฝนในวันนั้นไม่มาก (72.1 มม.) ปริมาณน้ำที่ไหลซึมยังไม่สามารถลงไปชั้นดินระดับลึกได้ หลังจากนั้น เมื่อเข้าสู่วันที่ 3 ปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นมาก (330 มม.) ปริมาณน้ำในดินเพิ่มสูงขึ้นจนเกือบถึงระดับอิ่มตัว (Saturation) ปริมาณน้ำฝนไหลซึมลงไปชั้นดินได้ลึกมากขึ้น จะสังเกตเห็นจากระดับความอิ่มตัวของดินที่ระดับความลึก 2 เมตร เมื่อนำผลระดับความอิ่มตัวของดินจากการวิเคราะห์การไหลซึมเปรียบเทียบกับระดับความอิ่มตัวของดินร้อยละ 90 ของแต่ละความลึกวิกฤตในแต่ละความลาดชัน จากงานวิจัยของวรวิษฐ์และสุทธิศักดิ์ (2552) เป็นเกณฑ์กำหนดถึงสภาวะสมดุลของลาดดินหรืออัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 ซึ่งหมายความว่า ในพื้นที่ใดที่มีระดับความอิ่มตัวของดินสูงกว่าร้อยละ 90 ของความหนาชั้นดินวิกฤตในแต่ละความลาดชัน พื้นที่ดังกล่าวจะมีอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.0 ซึ่งมีศักยภาพการพิบัติของลาดดินสูง ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของดินที่เกิดการพิบัติเปรียบเทียบกับร่องรอยจากเหตุการณ์ดินถล่มเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม 2549 พบว่า มีความสอดคล้องกันมากกว่าร้อยละ 60 อาจเนื่องมาจากรอยการเกิดดินถล่มจากการแปลภาพถ่ายทางอากาศนั้นรวมขอบเขตของการไหลลงมากองกันบริเวณดินลาดด้วยจึงเห็นเป็นรอยใหญ่กว่าความเป็นจริงได้ ดังแสดงในรูปที่ 5-20



Degree of Saturation: <80% 80% - 85% 85% - 90% 90% - 95% 95% - 100%

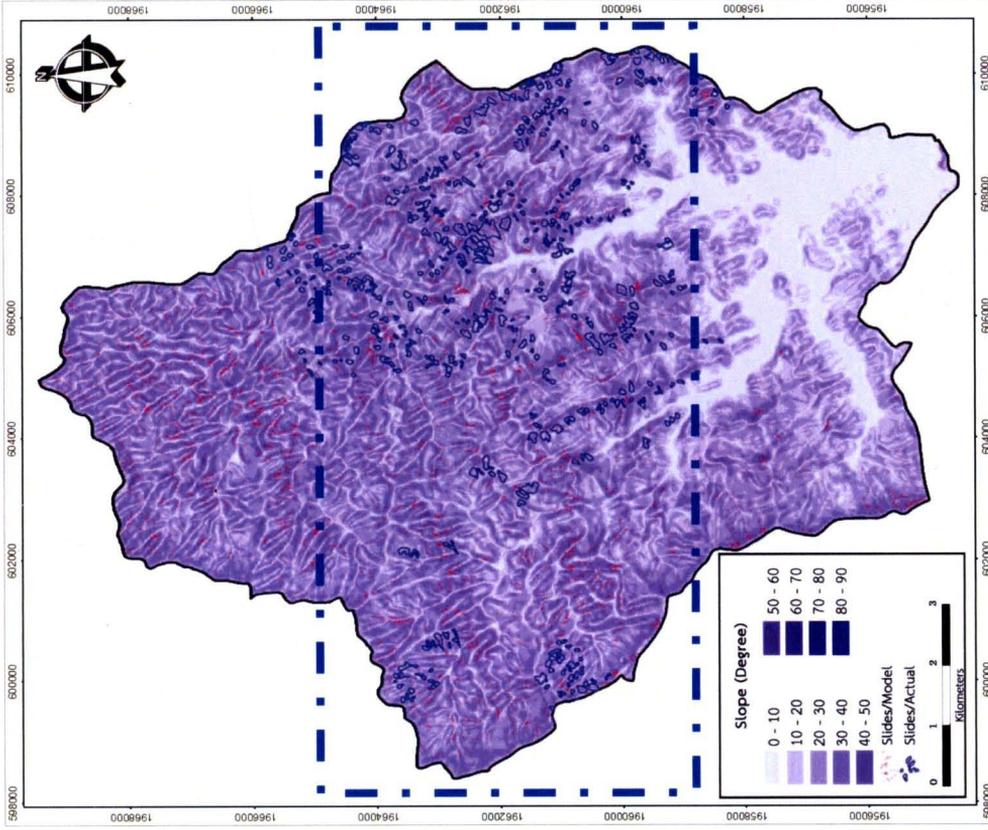
รูปที่ 5-19 ผลการวิเคราะห์การไหลซึม



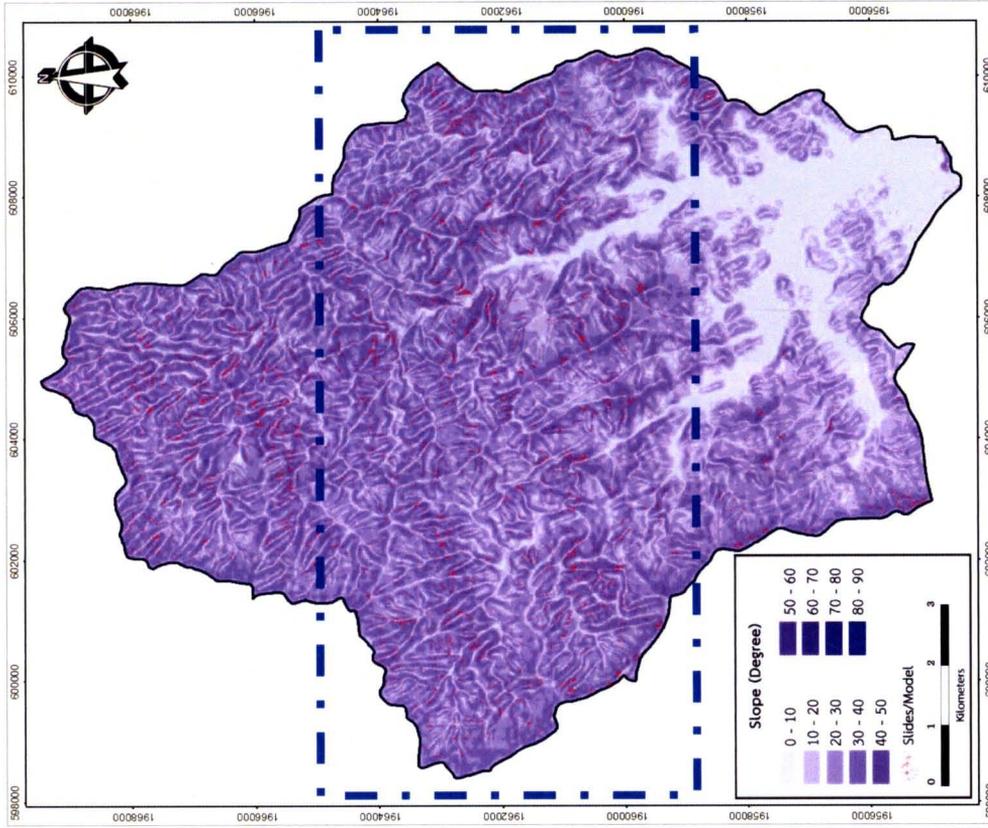
ข) รอยการเกิดดินถล่มเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2549

ก) ผลการวิเคราะห์ระดับวิกฤตของดินถล่ม

รูปที่ 5-20 ผลการวิเคราะห์การเกิดดินถล่มเนื่องจากฝนตกแบบพลวัตเปรียบเทียบกับความลาดชันในพื้นที่

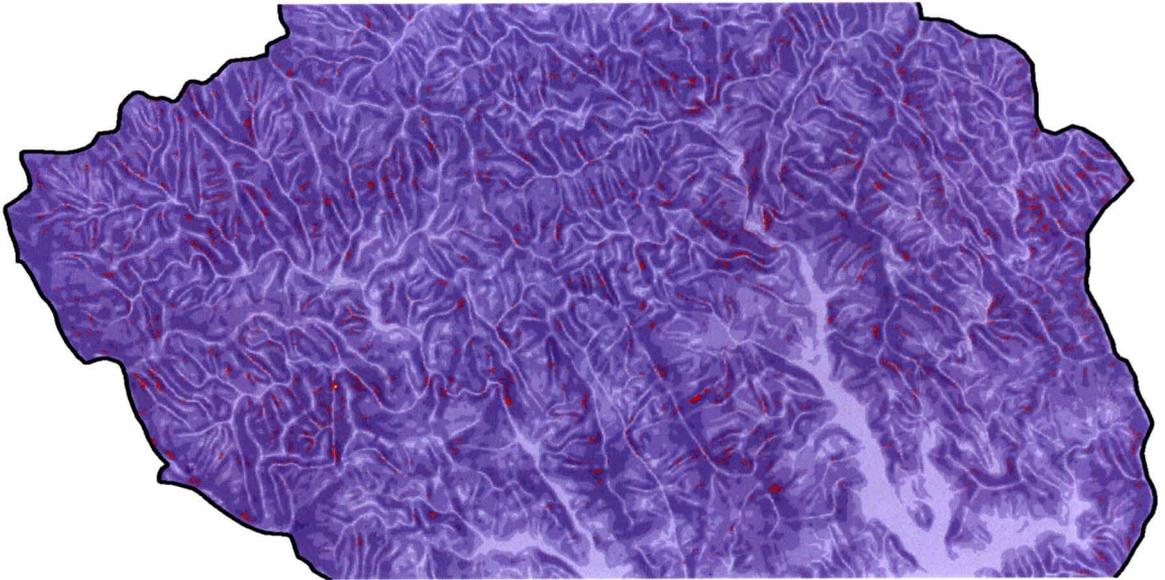


จ) รอยการเกิดดินถล่มเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2549

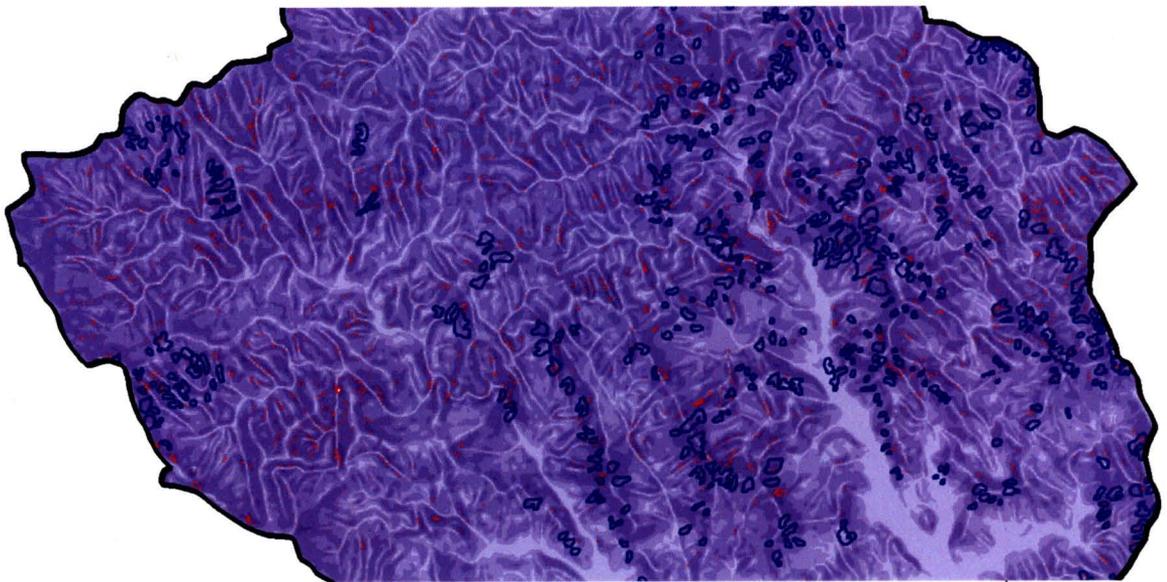


ค) ผลการวิเคราะห์ระดับวิกฤติของดินถล่ม

รูปที่ 5-20 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์การเกิดดินถล่มเนื่องจากฝนตกแบบพลาวัตเปรียบเทียบกับความลาดชันในพื้นที่



ก) ผลการวิเคราะห์ระดับวิกฤตของดินถล่ม



ข) รอยการเกิดดินถล่มเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2549

### รูปที่ 5-21 ภาพขยายแสดงตำแหน่งของการเกิดดินถล่มจากผลการวิเคราะห์

ทั้งนี้ แบบจำลองการวิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม โดยอาศัยแบบจำลองการไหลซึมที่พัฒนาขึ้นนั้น ยังขาดในส่วนของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในสภาวะที่มีการไหลซึมลงไปของน้ำฝน ซึ่งในเบื้องต้นยังต้องอาศัยเกณฑ์กำหนดจากผลงานวิจัยของ วรวัชรและสุทธิศักดิ์ (2552) เป็นเกณฑ์กำหนดไปก่อน คณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะวิจัยต่อยอดแบบจำลองดังกล่าว โดยการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองรวมถึงเพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในสภาวะความอิ่มตัวต่างๆ ให้อยู่ในแบบจำลองเดียวกันเพื่อง่ายต่อการนำไปใช้งานในลำดับถัดไป