

Sự ổn định mái dốc do mưa lớn kéo dài:
 Mô phỏng số kết hợp SEEP/W VÀ SLOPE/W

Slope stability due to prolonged heavy rainfall: numerical simulation using SEEP/W AND SLOPE/W

TS. Tống Anh Tuấn^{1*}, TS. Đào Huy Hoàng², ThS. Trần Đại Quang³

¹ Trường Đại học Giao thông Vận tải

² Trường Đại học Xây dựng Miền Tây

³ Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

*Email: tatuan@utc.edu.vn

■Nhận bài: 15/04/2024 ■Sửa bài: 19/05/2024 ■Duyệt đăng: 14/06/2024

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu kết quả phân tích sự ổn định của mái dốc nền đào do mưa lớn kéo dài bằng việc sử dụng kết hợp các mô hình số SEEP/W và SLOPE/W. Các kết quả phân tích dòng thấm không ổn định do mưa thấm vào mái dốc đất không bão hòa bằng mô hình SEEP/W được tích hợp vào mô hình SLOPE/W để phân tích ổn định của mái dốc theo thời gian. Kết quả cho thấy hệ số ổn định càng nhỏ khi cường độ mưa càng lớn và thời gian mưa kéo dài. Các mô hình mưa tăng dần và mưa phân bố đều ảnh hưởng bất lợi nhất đến hệ số ổn định so với các mô hình mưa giảm dần và mô hình mưa phân phối chuẩn.

Từ khóa: Sự ổn định mái dốc, mưa lớn kéo dài, mô phỏng số, SEEP/W, SLOPE/W.

ABSTRACT

This article presents results of slope stability analysis due to prolonged heavy rainfall using a coupled model SEEP/W and SLOPE/W. The results of transient seepage analysis due to rainfall into unsaturated soil of the slope using the SEEP/W model are integrated into the SLOPE/W model to analyze the slope stability over time. The results show that the factor of safety becomes smaller when the rain intensity is greater and the rain duration is longer. The delayed and uniform patterns have a more adverse effect than the advanced and normal pattern.

Keywords: Slope stability, heavy rainfall, numerical simulation, SEEP/W, SLOPE/W.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gần đây, sự cố sạt lở mái dốc ở Việt Nam xảy ra ngày càng phổ biến, quy mô ngày càng lớn, mức độ thiệt hại ngày càng tăng, đe dọa đến an sinh cộng đồng. Mưa lớn liên tục từ ngày 14/11 đến 16/11/2023, đoạn từ Km495+200 – Km511 và Km590 – Km601 đường Trường Sơn Đông bị sạt lở taluy dương, hàng trăm mét khối đất, đá tràn xuống và lấp mặt đường; một số vị trí bị hư hỏng hệ lan mềm, cây cối ngã xuống mặt đường gây mất an toàn giao thông. Mưa lớn kéo dài tại Quảng Ninh từ 13/8 đến 15/8/2017 đã gây sạt lở nghiêm trọng tại 10 điểm/37 điểm sạt lở

với hàng chục nghìn m³ đất đá bị trôi lấp dọc tuyến đường cao tốc Hạ Long – Vân Đồn làm hư hỏng nhiều hạng mục của dự án¹. Chỉ tính riêng 6 tháng đầu năm 2023, đồng bằng sông Cửu Long xảy ra hơn 120 vụ sạt lở². Sạt lở bờ, mưa lớn xảy ra trên địa bàn tỉnh Vĩnh Long gây thiệt hại cả về người và tài sản. Số liệu thống kê của Ban Chỉ đạo quốc gia về phòng, chống thiên tai 7 tháng đầu năm 2023 trên địa bàn tỉnh Vĩnh Long ước tính thiệt hại hơn 67,9 tỷ đồng³.

1. Nguồn: <http://baoquangninh.com.vn/>

2. Nguồn: <https://vtv.vn/>

3. Nguồn: <https://phongchongthientai.mard.gov.vn/>

Sạt lở mái dốc do mưa lớn kéo dài trở thành một trong những thiên tai mà Việt Nam đang phải đối mặt, liên quan đặc biệt đến công tác quản lý và xây dựng cơ sở hạ tầng. Trong số các nguyên nhân gây sạt lở taluy như: mưa, lũ, lũ quét; mưa đóng vai trò là tác nhân làm tăng nguy cơ sạt lở taluy. Hiện tượng sạt lở taluy tại Việt Nam thường xảy ra tại các khu vực có địa hình đồi núi, mái dốc lớn nhất là khi có mưa lớn kéo dài.

Khi có mưa, một phần nước mưa chảy tràn trên mái taluy, một phần thấm xuống đất tạo nên cấu trúc ba pha bao gồm: đất, khí và nước [5, 9, 13]. Nghiên cứu ổn định mái taluy tại Việt Nam chủ yếu tiếp cận theo hướng giải pháp hơn là tiếp cận từ các mô hình vật lý và mô hình toán. Số lượng các nghiên cứu từ mô hình toán về sự ổn định của mái taluy có xét đến ảnh hưởng kết hợp của các yếu tố như: áp suất khí lỗ rỗng, áp suất nước lỗ rỗng, độ bão hòa, lực dính và góc ma sát trong còn hạn chế [7].

Bài báo giới thiệu cơ sở lý thuyết về sự ổn định của mái taluy và dòng thấm trong đất không bão hòa bằng việc tích hợp các mô hình SEEP/W và SLOPE/W. Kết quả phân tích dòng thấm bằng mô hình SEEP/W được đưa vào mô hình SLOPE/W để phân tích ổn định của mái dốc. Nghiên cứu phân tích ổn định mái taluy tại Km13+640 thuộc dự án đường cao tốc Hạ Long – Vân Đồn được giới thiệu và thảo luận.

2. DÒNG THẨM TRONG ĐẤT KHÔNG BÃO HÒA VÀ SỰ ỔN ĐỊNH MÁI DỐC

Dòng thấm trong đất không bão hòa: Từ định luật Darcy, chuyển động của dòng thấm (2D) đẳng hướng, không ổn định trong đất không bão hòa được mô tả theo phương trình (1) biểu thị sự cân bằng giữa biến thiên thể tích nước vào và ra khỏi một phân tử với tốc độ thay đổi thể tích nước theo thời gian [2, 3, 6, 11]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + q = m_w \rho_w g \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

trong đó: $H = y + \frac{u_w}{\rho_w g}$ tổng cột áp, u_w áp suất nước lỗ rỗng, $\rho_w g$ khối lượng riêng của nước, g gia tốc trọng trường; k_x và k_y các hệ số thấm theo các hướng x và y ; q điều kiện biên lưu lượng do mưa; m_w hệ số thay đổi thể tích nước phụ thuộc độ hút dính $(u_a - u_w)$, u_a áp suất pha khí; và t thời gian [10, 12].

Nước mưa thấm qua mái dốc vào đất, hình thành dòng thấm không ổn định trong đất không bão hòa. Các hệ số k_x và k_y thay đổi theo vào độ hút dính. Module SEEP/W cho phép phân tích dòng thấm không ổn định trong đất không bão hòa. Mô hình mái dốc nghiên cứu được rời rạc dưới dạng lưới phi cấu trúc, trong đó ứng suất của đất, áp suất và lưu tốc thấm được định nghĩa tại các nút ở mỗi bước thời gian. Với dòng thấm không ổn định, SEEP/W giả thiết áp suất pha khí u_a bằng áp suất không khí. Sự thay đổi hàm lượng nước do mưa bổ sung vào đất làm thay đổi độ hút dính $(u_a - u_w)$. Biến thiên hàm lượng nước ở về phải phương trình (1) sau mỗi bước thời gian được tính toán, áp suất nước lỗ rỗng u_w được cập nhật cho phép tính toán hàm lượng nước cho bước thời gian tiếp theo [10]. SEEP/W cho phép lựa chọn thuật toán giải trực tiếp phương trình (1) tại mỗi bước thời gian. Kết quả phân bố áp suất nước lỗ rỗng của dòng thấm nhận được từ SEEP/W làm đầu vào cho SLOPE/W phân tích ổn định mái taluy bằng phương pháp cân bằng giới hạn [4, 12].

Sự ổn định mái dốc: Mưa đóng vai trò tác nhân kích hoạt nguy cơ sạt lở mái dốc [7]. Dòng thấm do mưa làm mở rộng vùng từ không bão hòa đến bão hòa, tăng áp suất nước lỗ rỗng và giảm độ hút dính [10]. Khi cường độ mưa hoặc thời gian mưa vượt quá một giới hạn nhất định, sức kháng cắt của đất giảm và sạt lở mái dốc xảy ra. Sức kháng cắt tới hạn Mohr – Coulomb của đất không bão hòa có thể được xác định theo Bishop hoặc Fredlund [1, 11]:

$$\tau_f = \begin{cases} c' + [(\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi' & \text{(Bishop)} \\ c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b & \text{(Fredlund)} \end{cases} \quad (2)$$

trong đó: τ_f sức kháng cắt tới hạn; c' lực dính hiệu dụng của đất; φ' góc ma sát trong hiệu dụng của đất; φ^b góc ma sát tăng theo độ hút dính; σ_n ứng suất pháp của đất tại mặt trượt; u_a áp suất khí; u_w áp suất nước lỗ rỗng; χ thông số đặc trưng cho mức độ độ bão hòa của đất, phụ thuộc loại đất và độ ẩm thể tích [11]:

Phương trình (2) cho thấy, sự có mặt của độ hút dính làm tăng sức kháng cắt của

đất không bão hòa. Tuy nhiên, sự gia tăng của áp suất nước lỗ rỗng làm giảm độ hút dính dẫn đến giảm sức kháng cắt của đất nguy cơ mất ổn định mái taluy. Mỗi độ ẩm thể tích cho phép xác định một độ hút dính ($u_a - u_w$) từ đường cong đặc trưng đất – nước (SWCC¹) [10].

Hệ số ổn định mái dốc của đất không bão hòa có thể xác định theo Bishop [8]:

$$F_s = \frac{c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi'}{\rho_s g z_s \sin \alpha \cos \alpha}$$

(3)

trong đó: F_s là hệ số ổn định; α là góc nghiêng của mái dốc; z_s là chiều cao của khối đất; ρ_s là khối lượng riêng của đất.

Bài báo phân tích sự ổn định mái taluy trong điều kiện mưa kéo dài bằng việc kết hợp các module SEEP/W và SLOPE/W. Các trường dữ liệu của dòng thấm không ổn định nhận được từ SEEP/W được đưa vào SLOPE/W để phân tích ổn định mái taluy theo thời gian. Với một mặt trượt giả định, lực tác dụng lên mỗi phân tố được tính toán (bao gồm: trọng lượng bản thân, áp lực lên các mặt bên và đáy), trong đó áp lực nước lên đáy được tính toán từ trường dữ liệu nhận được từ SEEP/W. SLOPE/W tìm kiếm mặt trượt và

tính toán hệ số ổn định theo phương pháp cân bằng giới hạn của Bishop.

3. HỆ SỐ ỔN ĐỊNH MÁI DỐC DO MƯA LỚN KÉO DÀI

Đặc trưng của đất và mô hình mái dốc: Các đặc trưng của đất khu vực nghiên cứu được lấy từ “Hồ sơ khảo sát, bổ sung xử lý sụt trượt từ Km13+640 đến Km13+840” được lập 08/2017 bởi tư vấn thiết kế dự án “Đường cao tốc Hạ Long – Vân Đồn và cải tạo, nâng cấp QL18, đoạn Hà Long – Mông Dương theo hình thức BOT”. Vị trí mái dốc nghiên cứu tại Km13+640 thuộc dự án đường cao tốc Hạ Long – Vân Đồn, tỷ lệ mô hình 1:1 (Bảng 1) [15].

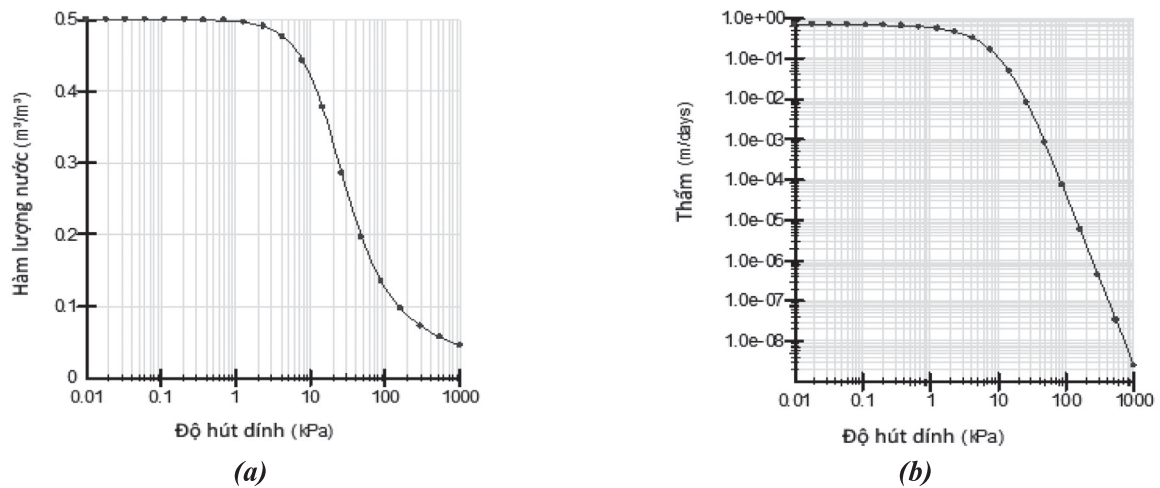
Bảng 1. Đặc trưng của các lớp đất

	Lớp 1 (Sét pha cát)	Lớp 2 (Sét lẫn sạn sỏi)	Lớp 3 (Đá sét kết)
$\gamma (kN / m^3)$	19	20.5	27.3
$c'(kPa)$	30.9	20.1	50
$\varphi'(^\circ)$	11.07	10.27	28
$\theta_s(m^3 / m^3)$	0.50	0.55	0.60
$\theta_r(m^3 / m^3)$	0.050	0.045	0.04
$k_{sat}(m / s)$	10^{-6}	0.85×10^{-6}	0.75×10^{-6}
$m_w(kPa^{-1})$	0.00050	0.00045	0.00040

Đường cong mẫu SWCC được xây dựng cho từng loại đất, phụ thuộc độ bão hòa và hệ số thay đổi thể tích nước. Hàm thấm được xây dựng cho từng loại đất theo Van Genuchten căn cứ hệ số thấm bão hòa, hàm lượng nước dư và đường cong SWCC của loại đất tương

ứng [10]. Đường cong SWCC xây dựng cho lớp sét pha cát (lớp 1) được biểu thị trên Hình 1(a) trong khi hàm thấm của lớp này được chỉ ra trên Hình 1(b).

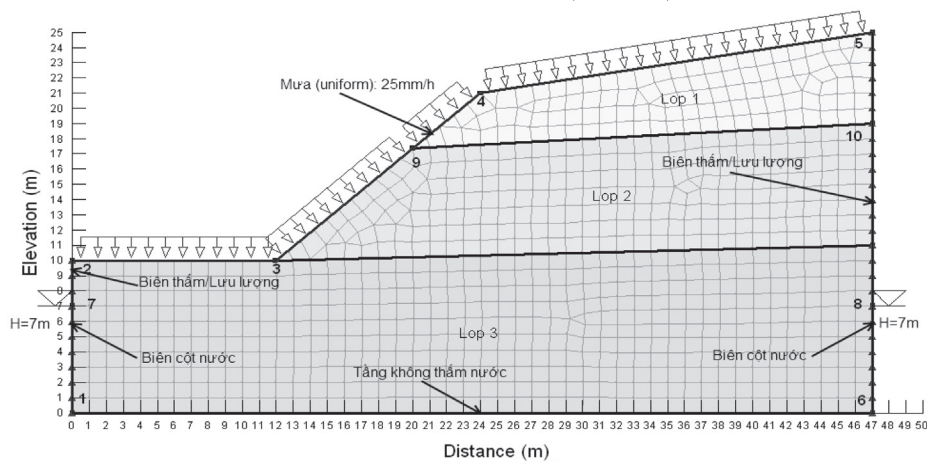
4. Soil Water Characteristic Curve



Hình 1. Đường cong đặc trưng đất – nước a), và khả năng thấm (b) của lớp sét pha cát

Mái dốc nghiên cứu có chiều cao $37m$ với độ dốc taluy thay đổi (phần gần mặt đất là 43° và phần trên là 10°) (Hình 2). Cao độ mặt đất được giả thiết tại chân của mái taluy và tầng không thấm nước ở độ sâu $10m$ tính từ cao độ mặt đất. Lưới phi cấu trúc với kích thước tối đa là $0.5m$. Điều kiện biên: Ban đầu khi chưa có mưa, mực nước ngầm ở độ sâu $3m$ kể từ mặt đất. Dòng thấm ổn định được phân tích với điều kiện biên về cột

nước $H = 7m$ áp dụng cho các biên 1–7 và 6–8 trong khi các biên còn lại là biên tự do. Kết quả phân tích ở bước thời gian cuối cùng của dòng thấm ổn định được sử dụng là điều kiện ban đầu cho SEEP/W tiếp tục phân tích dòng thấm không ổn định do mưa kết hợp với mực nước ngầm dâng lên. Lúc này, các biên 1–2 và 5–6 là không thấm nước, trong khi đó các biên 2–3–4–5 là các biên mưa và thấm (Hình 2).

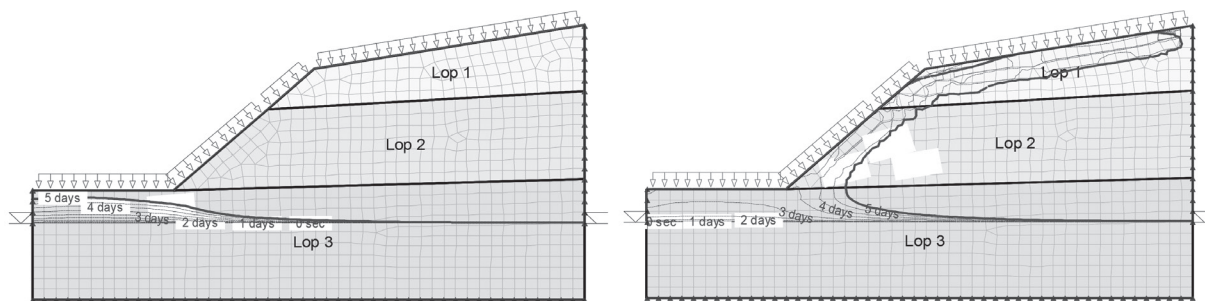


Hình 2. Mô hình mái taluy và các điều kiện biên (Km13+640)

Căn cứ số liệu mưa ngày của một số trận mưa điển hình có lượng $200mm$, $300mm$ và $400mm$ được chia thành 10 khoảng thời gian để xây dựng phân bố mưa tương đương về cường độ trong 120 giờ liên tục. Các mô hình phân bố mưa đều (Uniform), tăng dần (Delayed), giảm dần (Advanced) và chuẩn (Central) được áp dụng trong bài báo để nghiên cứu sự thay đổi của mực nước ngầm [14]. Các kết quả phân tích thấm không ổn định theo thời gian được tích hợp sau đó vào SLOPE/W để phân tích ổn định mái dốc theo phương pháp cân bằng giới hạn

của Bishop với điều kiện biên Entry–Exit [12].

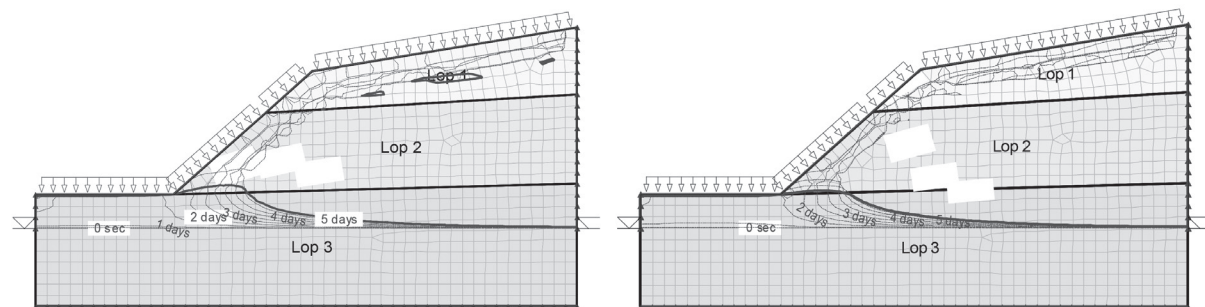
Mực nước ngầm: Các kết quả thay đổi mực nước ngầm trong 5 ngày mưa ứng với các mô hình phân bố mưa khác nhau được giới thiệu trong các Hình 3 và Hình 4. Với cả 4 mô hình mưa, kết quả đều cho thấy mực nước ngầm dâng lên khi thời gian mưa kéo dài, và mực nước ngầm ở gần chân taluy dâng lên nhanh hơn so với các vị trí khác. Với cùng một mô hình mưa, tốc độ dâng của mực nước ngầm tùy thuộc cường độ mưa, cường độ mưa càng lớn mực nước ngầm dâng càng nhanh.



(a) Mưa phân bố đều ($i = 5\text{mm/h}$)

(b) Mưa tăng dần ($i = 10\text{mm/h}$)

Hình 3. Mực nước ngầm thay đổi theo thời gian



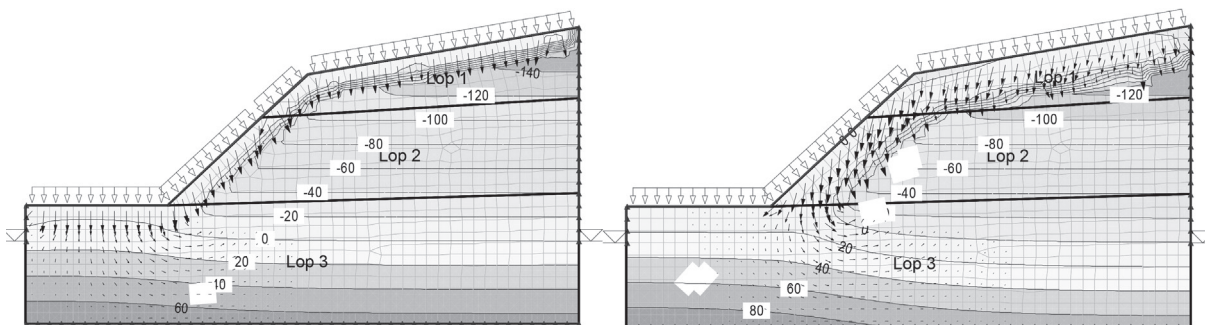
(a) Mưa phân phối chuẩn ($i = 20\text{mm/h}$)

(b) Mưa giảm dần ($i = 25\text{mm/h}$)

Hình 4. Mực nước ngầm thay đổi theo thời gian

Trường vận tốc và áp suất nước lỗ rỗng:
Các kết quả mô phỏng trường vận tốc và áp suất nước lỗ rỗng tại các thời điểm $t = 48h$, $60h$, $72h$ và $120h$ cho các mô hình phân bố mưa và cường độ mưa khác nhau được giới thiệu trong các Hình 5 và Hình 6. Trường vận

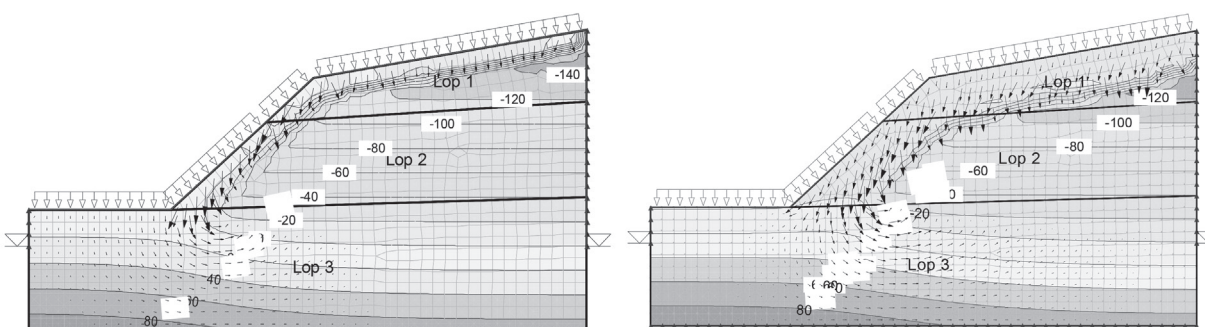
tốc thấm cho thấy lưu tốc thấm khu vực taluy dưới lớn hơn so với các vị trí khác như taluy phía trên và gần mặt đất. Lưu tốc thấm lớn khu vực taluy dưới do gradient thủy lực khu vực này lớn hơn so với khu vực khác bởi khoảng cách ngắn và độ chênh cao.



(a) $t = 72h$

(b) $t = 120h$

Hình 5. Trường vận tốc và áp suất nước lỗ rỗng với phân bố mưa tăng dần ($i = 10\text{mm/h}$)



(a) $t = 60h$

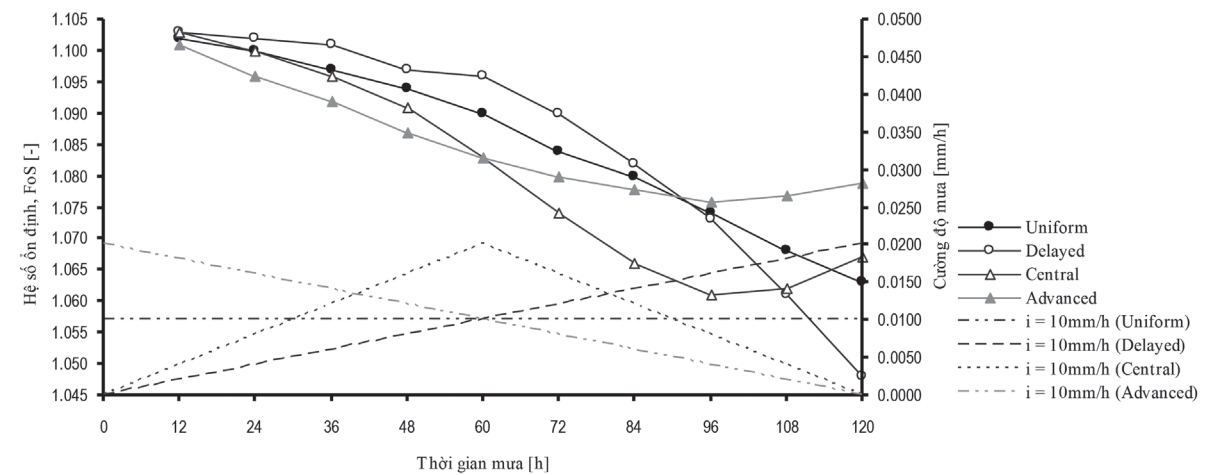
(b) $t = 120h$

Hình 6. Trường vận tốc và áp suất nước lỗ rỗng với phân bố mưa chuẩn ($i = 10\text{mm/h}$)

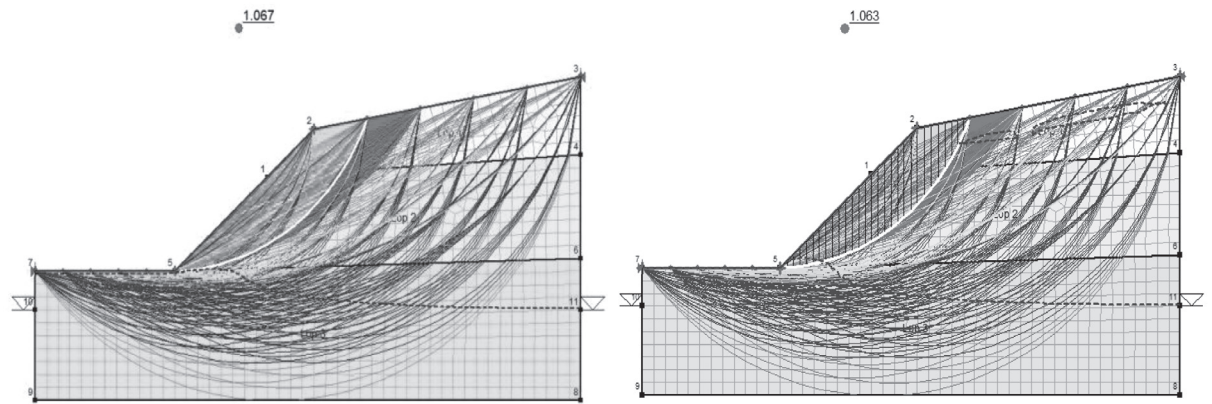
Trường vận tốc thấm lớn ở khu vực cạnh 3–4 cùng với khoảng cách ngắn từ mực nước ngầm đến mặt đất dẫn đến lưu lượng thấm được bổ sung nhiều hơn ở khu vực này làm cho mực nước ngầm tại đó dâng lên nhanh hơn so với các vị trí khác (Hình 5, 6).

Hệ số ổn định mái dốc: Kết quả phân tích hệ số ổn định của mái taluy với các mô hình mưa khác nhau có cùng cường độ mưa được hiển thị trong Hình 7 ($i = 10\text{mm/h}$). Kết quả cho thấy hệ số ổn định đều có xu hướng giảm

trong suốt thời gian mưa là 96h đối với tất cả các mô hình mưa. Hệ số ổn định với các mô hình mưa phân phối chuẩn và mưa giảm dần có xu hướng tăng dần sau 96h (Hình 7) khi mà cường độ mưa đã giảm hẳn, trong khi hệ số ổn định với các mô hình mưa phân bố đều và mưa tăng dần luôn có xu hướng giảm dần trong suốt 120h. Vì vậy, các mô hình mưa phân bố đều và mưa tăng dần ảnh hưởng bất lợi đối với sự ổn định của mái dốc khi thời gian mưa kéo dài.



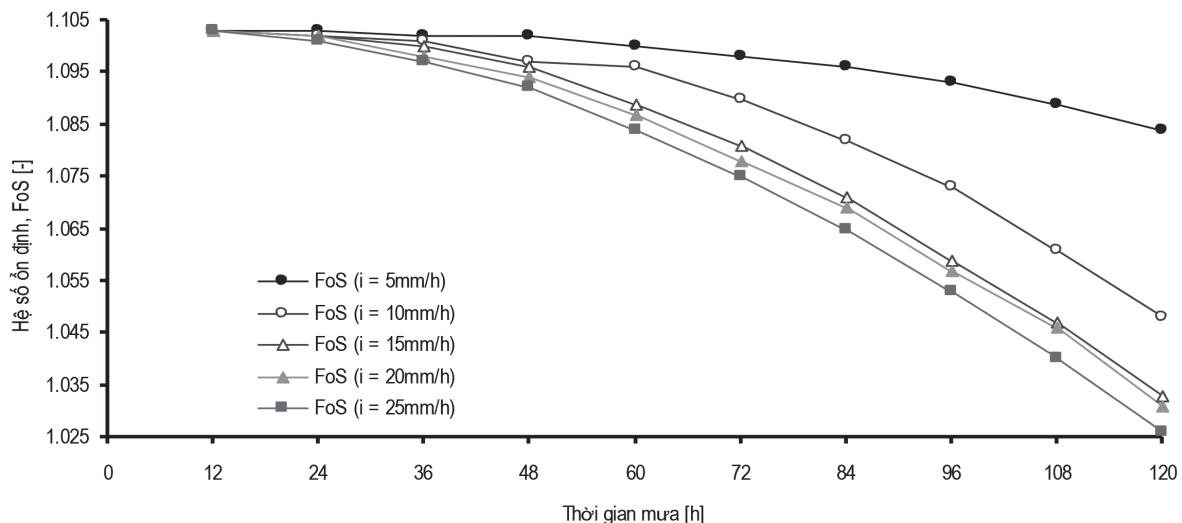
Hình 7. Hệ số ổn định thay đổi theo thời gian ứng với các mô hình phân bố mưa khác nhau có cùng cường độ mưa $i = 10\text{mm/h}$



Hình 8. Hình ảnh toàn bộ các mặt trượt theo thời gian và mặt trượt tới hạn tương ứng với cường độ mưa $i = 10\text{mm/h}$: (a) Mưa phân bố chuẩn; (b) Mưa phân bố đều

Hình ảnh bản đồ mặt trượt theo thời gian tương ứng với các mô hình mưa phân bố chuẩn và mưa phân bố đều được trích xuất và hiển thị trên Hình 8, trong đó mặt trượt tới hạn (mặt trượt nguy hiểm nhất) ứng với hệ số ổn định nhỏ nhất lần lượt là 1.067 (với mô hình mưa phân bố chuẩn) và 1.063 (với mô hình mưa phân bố đều), các giá trị này cũng được hiển thị trên Hình 7.

Kết quả phân tích hệ số ổn định của mái taluy phụ thuộc cường độ mưa ứng với các mô hình mưa hiển thị trong các Hình 9. Kết quả cho thấy với tất cả các mô hình mưa và trong cùng thời gian mưa, hệ số ổn định càng lớn khi cường độ mưa càng nhỏ. Theo thời gian và với một mô hình mưa, hệ số ổn định giảm nhanh hơn khi cường độ mưa càng lớn.



Hình 8. Hệ số ổn định thay đổi theo cường độ mưa ứng với mô hình phân bố mưa tăng dần

Mô hình cường độ mưa giảm dần ảnh hưởng tốt nhất đến hệ số ổn định mái dốc, trong khi cường độ mưa tăng dần ảnh hưởng bất lợi nhất đến hệ số ổn định mái taluy, tiếp đến là cường độ mưa phân bố đều. Các mô hình mưa phân bố đều và mưa tăng dần có thể áp dụng trong trường hợp mưa ngắn nhưng có cường độ mưa lớn.

4. KẾT LUẬN

Quá trình mưa kéo theo làm dâng mực nước ngầm, tăng áp suất nước lỗ rỗng, và kết quả làm giảm độ dính hút, sức kháng cắt và hệ số ổn định của mái dốc. Hệ số ổn định càng nhỏ khi cường độ mưa càng lớn và thời gian mưa kéo dài. Hệ số ổn định có xu hướng giảm dần với các mô hình mưa phân bố đều và mưa tăng dần. Hệ số ổn định có xu hướng tăng dần sau một thời gian mưa nhất định khi mà cường độ mưa đã giảm. Các mô hình mưa tăng dần và mưa phân bố đều ảnh hưởng bất lợi nhất đến hệ số ổn định. Kết quả nghiên cứu chỉ ra khả năng kết hợp giữa các mô hình SEEP/W và SLOPE/W vào phân tích sự ổn định của mái dốc xét đến ảnh hưởng của dòng thấm do mưa kéo dài kết hợp với sự thay đổi mực nước ngầm làm cơ sở phân tích cơ chế mất ổn định và đề xuất các giải pháp phòng tránh sạt lở mái dốc.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] S. Jeong, K. Lee, J. Kim, and Y. Kim, "Analysis of Rainfall-Induced Landslide on Unsaturated Soil Slopes,"

Sustainability, vol. 9, no. 7, p. 1280, Jul. 2017.

- [2] Rahimi Arezoo, Rahardjo Harianto, and Leong Eng-Choon, "Effect of Antecedent Rainfall Patterns on Rainfall-Induced Slope Failure," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 137, no. 5, pp. 483–491, May 2011.
- [3] K. Xue, B. Ajmera, B. Tiwari, and Y. Hu, "Effect of long duration rainstorm on stability of Red-clay slopes," *Geoenviron Disasters*, vol. 3, no. 1, p. 12, Dec. 2016.
- [4] C. Kristo, H. Rahardjo, and A. Satyanaga, "Effect of variations in rainfall intensity on slope stability in Singapore," *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 5, no. 4, pp. 258–264, Dec. 2017.
- [5] Rahardjo Harianto, Nio Alfreando Satyanaga, Leong Eng Choon, and Song Ng Yew, "Effects of Groundwater Table Position and Soil Properties on Stability of Slope during Rainfall," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 136, no. 11, pp. 1555–1564, Nov. 2010.
- [6] V. Tofani, S. Dapporto, P. Vannocci, and N. Casagli, "Infiltration, seepage and slope instability mechanisms during the 20–21 November 2000 rainstorm in Tuscany, central Italy," *Natural Hazards*

- and Earth System Science*, vol. 6, no. 6, pp. 1025–1033, Dec. 2006.
- [7] H. D. Toan and L. D. Hong, “Mối tương quan giữa mưa và trượt mái dốc,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, Sep. 2012.
- [8] F. Sagitaningrum and E. Bahsan, “Parametric study on the effect of rainfall pattern to slope stability,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 101, p. 05005, Jan. 2017.
- [9] A. S. Muntohar and H.-J. Liao, “Rainfall infiltration: infinite slope model for landslides triggering by rainstorm,” *Nat Hazards*, vol. 54, no. 3, pp. 967–984, Sep. 2010.
- [10] G.-S. International, *Seepage Modeling with SEEP/W*. GEO-SLOPE International Ltd, 2014.
- [11] D. G. Fredlund and H. Rahardjo, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, 1 edition. New York: Wiley-Interscience, 1993.
- [12] G.-S. International, *Stability Modeling with SLOPE/W*. GEO-SLOPE International Ltd, 2015.
- [13] H. Rahardjo, E. C. Leong, and R. B. Rezaaur, “Studies of rainfall-induced slope failures,” p. 15.
- [14] Y. Luo, S. He, and J. He, “The influence of rainfall patterns on seepage characteristics and stability of slope,” *Proceedings of Slope*, Sept. 2015.
- [15] N. D. V. Dự án Đường cao tốc Hạ Long – Vân Đồn và cải tạo, nâng cấp QL18, đoạn Hà Long – Mông Dương. *Hồ sơ khảo sát, bổ sung xử lý sạt trượt từ Km13+640 đến Km13+840*, Aug. 2017.