

Nghiên cứu ảnh hưởng của hình học mái dốc đến ổn định mái dốc dưới tác động của biến đổi khí hậu

Trần Trung Việt^{1,*}, Hồ Nhật Quân¹

¹Khoa Xây dựng Cầu Đường, Trường Đại học Bách khoa- Địa học Đà Nẵng

TỪ KHOÁ

Đất không bão hòa
SWCC
Cường độ mưa
Hệ số ổn định
Sức chống cắt không bão hòa

TÓM TẮT

Tại miền Trung và Tây Nguyên Việt Nam, địa hình đồi núi và đất phong hóa (đất sét, á sét) dễ gây sạt lở mái dốc dưới mưa lớn, đặc biệt dọc QL1, QL20, QL27C. Trong nghiên cứu này tập trung phân tích ảnh hưởng của cường độ mưa cũng như đặc trưng hình học của mái dốc đến bài toán ổn định. Nghiên cứu sử dụng lý thuyết dòng thấm không ổn định kết hợp với phương trình SWCC được đề xuất bởi Leong và Rahardjo [7] và lý thuyết đất không bão hòa của Fredlund-Rahardjo. Mô hình nghiên cứu cho mái dốc có chiều cao $H_s = 6-18$ m, góc $\beta = 30^\circ-45^\circ$, ba loại đất ($k_s = 10^{-4}$ đến 10^{-6} m/s, $c' = 10$ kPa, $\varphi' = 26^\circ$), cường độ mưa $I_r = 3-360$ mm/h trong 24 giờ. Kết quả phân tích cho thấy cường độ mưa (I_r) ảnh hưởng rất lớn đến ổn định mái dốc: khi $I_r \geq k_s$, gây bão hòa và mất ổn định ($FoS < 1$) đồng thời giảm FoS từ 5,63-61,2%. Trong khi đó các yếu tố hình học mái dốc ảnh hưởng thấp hơn đến ổn định mái dốc: chiều cao tăng 300% làm giảm FoS 40,7%; góc dốc tăng 50% giảm 11,4-26,2%.

KEYWORDS

Unsaturated soil
SWCC
Rainfall intensities
Factor of Safe
Unsaturated shear strength

ABSTRACT

In the Central and Central Highlands regions of Vietnam, characterized by predominant mountainous terrain and widespread distribution of weathered soils (clays and silty clays), prolonged intense rainfall events frequently induce severe slope failures, particularly along major transportation routes such as National Highways 1, 20, and 27C. This study assesses the influence of rainfall intensity and slope geometry on slope stability under rainfall infiltration. The analysis methodology is grounded in the theory of transient seepage, incorporating the soil-water characteristic curve (SWCC) equation proposed by Leong and Rahardjo [7], combined with the unsaturated soil shear strength model by Fredlund and Rahardjo. Numerical models were developed for slopes with heights $H_s = 6-18$ m, inclination angles $\beta = 30^\circ-45^\circ$, three representative soil types (saturated permeability $k_s = 10^{-4}$ to 10^{-6} m/s, effective cohesion $c' = 10$ kPa, effective friction angle $\varphi' = 26^\circ$), and rainfall intensities $I_r = 3-360$ mm/h over a 24-hour duration. Results indicate that rainfall intensity (I_r) is the dominant factor affecting slope stability: when $I_r \geq k_s$, rapid saturation occurs, leading to instability (factor of safety $FoS < 1$) and FoS reductions ranging from 5.63% to 61.2%. In contrast, geometric factors exert a secondary influence: a 300% increase in slope height results in a 40.7% reduction in FoS ; a 50% increase in inclination angle leads to FoS reductions of 11.4% to 26.2%.

1. Giới thiệu

Trong hơn thập niên gần đây tại khu vực miền Trung và Tây Nguyên, sau các đợt mưa kéo dài, hiện tượng sạt lở mái dốc xảy ra thường xuyên và với quy mô cung xnhuwc mức độ thiệt hại ngày càng nghiêm trọng. Theo thống kê của Cục Quản lý Đê điều và Phòng, chống thiên tai (Bộ NN&PTNT), khối lượng đất đá bị sạt lở trong năm 2025 lên tới khoảng 14,5 triệu m³, phần lớn là kết quả của sạt lở mái dốc tự nhiên và taluy đường do mưa. Tổng thiệt hại kinh tế từ các sự cố thiên tai lên đến hơn 85,099 tỷ đồng, trong đó chi phí xử lý sạt lở mái dốc, khắc phục giao thông và bảo vệ mái dốc chiếm tỷ lệ đáng kể.

Các tuyến giao thông trọng yếu như QL1, QL20, QL27C xảy ra sự cố sạt trượt nghiêm trọng, khiến giao thông bị gián đoạn, làm chậm vận

chuyển hàng hóa, cô lập dân cư, tăng chi phí bảo trì đường bộ hằng năm. Những thiệt hại này cho thấy tính cấp thiết của việc nghiên cứu cơ chế sạt trượt mái dốc do mưa.

Trên thế giới, nghiên cứu về ổn định mái dốc dưới tác động của mưa đã được triển khai rộng rãi trong nhiều bối cảnh địa chất và khí hậu khác nhau. Fredlund và Rahardjo (1993) đặt nền móng cho cơ học đất không bão hòa, chứng minh vai trò của áp lực nước lỗ rỗng và lực hút dính trong sự suy giảm ổn định của mái dốc dưới ảnh hưởng của mưa [1]. Rahardjo và cộng sự (2007) phân tích ảnh hưởng của cường độ mưa, đặc tính cơ lý của đất, vị trí ban đầu của mực nước ngầm và yếu tố hình học của mái dốc như chiều cao, góc nghiêng mái dốc [2].

*Liên hệ tác giả: ttviet@dut.udn.vn

Nhận ngày 08/12/2025, sửa xong ngày 20/02/2026, chấp nhận đăng ngày 25/02/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2026.1198>



Hình 1. Vị trí sạt trượt mái dốc tại Lâm Đồng.

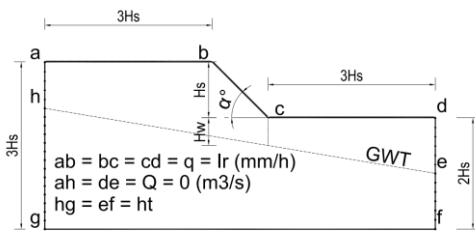
Tại Việt Nam, các nghiên cứu về ổn định mái dốc dưới tác động của mưa đã tập trung tại các tỉnh miền núi có nguy cơ sạt lở cao. Nguyễn Văn Thìn (2007) phân tích ảnh hưởng của cường độ và thời gian mưa đến hệ số ổn định mái dốc [3]. Nguyễn Huy Hiệp và cộng sự (2024) phân tích ổn định của mái dốc có xét ảnh hưởng của lượng mưa và từ biến [4]. Phạm Ngọc Thắng (2024) phân tích sự thay đổi hệ số ổn định mái dốc dưới nhiều hình thái mưa khác nhau [5].

Với đại hình và địa chất đặc thù tại khu vực miền Trung và Tây Nguyên, việc nghiên cứu ổn định mái dốc dưới tác động của mưa đang là bài toán cấp thiết. Trong nghiên cứu này tập trung phân tích ảnh hưởng của cường độ mưa, chiều cao và góc nghiêng của mái dốc đến bài toán ổn định của mái dốc nền đường đào.

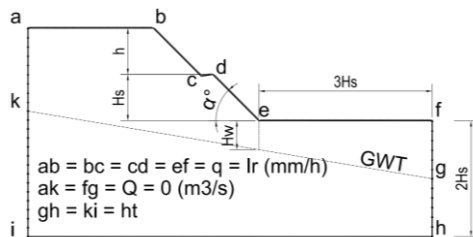
2. Phân tích ổn định mái dốc khi xét đến ảnh hưởng mưa

2.1. Mô hình phân tích

Mô hình mái dốc được thể hiện ở (Hình 2, 3). Trong đó, H_s = chiều cao mái dốc; α = góc nghiêng của mái dốc; GWT = mực nước ngầm ban đầu; H_w = vị trí ban đầu của mực nước ngầm; I_r = cường độ mưa; h_t = áp lực cột nước.



Hình 2. Điều kiện biên mái dốc 1 cơ.



Hình 3. Điều kiện biên mái dốc 2 cơ.

Nghiên cứu xét đến mô hình mái dốc $H_s = [6 \text{ m}; 8 \text{ m}; 10 \text{ m}]$ cùng với sự thay đổi góc nghiêng của mái dốc $\alpha = [30^\circ; 33^\circ; 39^\circ; 45^\circ]$ tương ứng với độ dốc mái taluy theo các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành lần lượt là 1/1,75; 1/1,50; 1/1,25; 1/1. Bên cạnh đó, nghiên cứu xét trường hợp mô hình mái dốc có chiều cao $H_s = H_s + h = [12 \text{ m}; 16 \text{ m}; 18 \text{ m}]$, cơ thử nhất có chiều cao cố định 8 m, bố trí rãnh cơ rộng 2 m và có độ dốc 15° nghiêng vào phía taluy.

Nghiên cứu sử dụng ba bộ thông số của ba loại đất đại diện cho đất cát, đất cát hạt mịn và đất sét hạt mịn lần lượt tương ứng là $f_{10,-4}$; $f_{50,-5}$; $f_{100,-6}$. Lực dính có hiệu $C' = 10 \text{ Kpa}$, góc nội ma sát $\phi' = 26^\circ$, góc nội ma sát tương ứng với lực hút dính $\phi^b = 26^\circ$, dung trọng của đất $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$. Các tham số sức kháng cắt trên được chọn dựa vào báo cáo về đất phong hóa của Rahardjo (2000) [6].

Để đánh giá tập trung ảnh hưởng của mưa đối với mái dốc dưới ảnh hưởng của mưa, nghiên cứu chỉ sử dụng một bộ tham số cường độ kháng cắt của đất.

2.2. Phân tích ổn định mái dốc dưới ảnh hưởng của mưa

Theo đề xuất của Fredlund và Rahardjo (1993), đặc trưng cơ lý quan trọng để phân tích ổn định mái dốc dưới tác động của mưa: (i)- đường cong đặc trưng đất-nước SWCC (Soil Water Characteristic Curve) và (ii)- mô hình dòng thấm trong đất.

2.2.1. Phương trình SWCC

Đối với đất không bão hòa, mối quan hệ giữa độ ẩm và lực hút dính được xác định trong qua đường cong đặc trưng đất – nước (SWCC). Công thức được Leong và Rahardjo [7] kiến nghị sử dụng là:

$$\theta_w = \theta_s C(\psi) \left\{ \frac{1}{\left[\ln \left(e + \left(\frac{u_a - u_w}{a} \right)^n \right)^m \right]} \right\} \quad (1)$$

Trong đó $C(\psi)$: là hàm hiệu chỉnh được xác định bởi công thức sau:

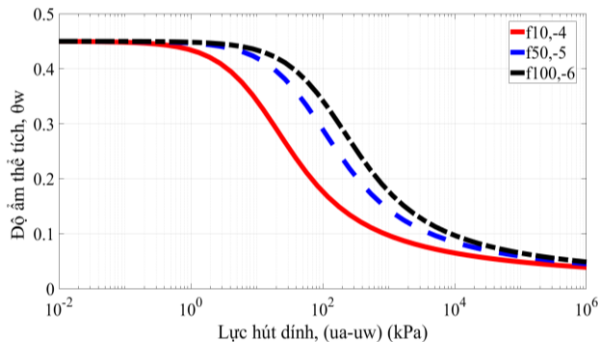
$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left[1 + \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_r} \right]}{\ln \left[1 + \frac{10^6}{(u_a - u_w)_r} \right]} \quad (2)$$

Với $C(\psi) = 1$ [7], θ_w = độ ẩm thể tích; θ_s = độ ẩm bão hòa, a = thông số hiệu chỉnh liên quan đến giá trị khí vào (AEV), m = là thông số liên quan đến độ ẩm dư, n = thông số liên quan đến độ dốc của đường SWCC; $(u_a - u_w)$ = lực hút dính (kPa) với u_a = áp

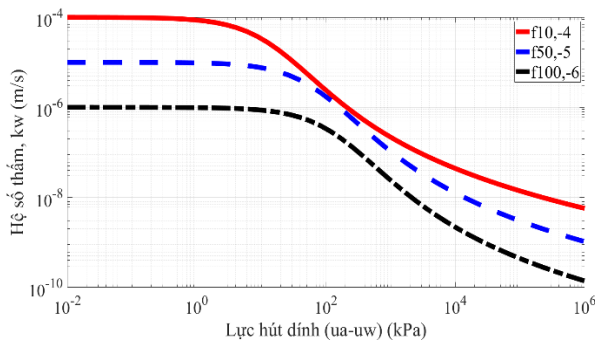
lực khí lỗ rỗng (kPa) và u_w = áp lực nước lỗ rỗng (kPa). Hàm thấm được Leong và Raharjio [8] sử dụng là:

$$k_w = k_s \Theta^p \quad (3)$$

Trong đó, k_w = hệ số thấm liên quan với nước; k_s = hệ số thấm bão hòa; p = thông số tương quan với độ dốc của hàm thấm; $\Theta = (\theta_w / \theta_s) =$ độ ẩm thể tích chuẩn hóa.



Hình 4. Đường cong SWCC.



Hình 5. Hàm thấm.

Bảng 1. Thông số SWCC.

Mẫu đất	Thông số SWCC			
	a	m	n	θ_s
$f_{10,-4}$	10	1	1	0.45
$f_{50,-5}$	50	1	1	0.45
$f_{100,-6}$	100	1	1	0.45

Bảng 2. Thông số hàm thấm.

Mẫu đất	Thông số hàm thấm		
	$k_s (m/s)$	$k_s (mm/h)$	p
$f_{10,-4}$	10	360	4
$f_{50,-5}$	10^{-5}	36	4
$f_{100,-6}$	10^{-6}	3.6	4

2.2.2. Dòng thấm không ổn định và cường độ sức kháng cắt của đất không bão hòa

Nghiên cứu sử dụng bộ phần mềm Geo-studio 2023, mô hình được thực hiện thông qua phân tích dòng thấm bởi mô đun SEEP/W, sau đó kết quả về sự thay đổi áp lực nước lỗ rỗng được đưa vào mô đun SLOPE/W để xác định hệ số an toàn của mái dốc. Nhằm xét đến sự thay đổi của đường bão hòa trong mái dốc dưới ảnh hưởng của mưa, mô đun SEEP/W được dùng để phân tích thấm không ổn định theo thời gian. Phương trình dòng thấm có dạng:

$$m_w^2 \gamma_w \frac{\partial h_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-k_{wx} \frac{\partial h_t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-k_{wy} \frac{\partial h_t}{\partial y} \right) + q$$

Trong đó m_w^2 = độ dốc của đường cong đặc trưng đất và nước; γ_w = dung trọng thể tích của nước, h_t = cột nước thủy lực hoặc cột nước tổng; t = thời gian; k_{wx} = hệ số thấm theo phương x; k_{wy} = hệ số thấm theo phương y; q = điều kiện biên của dòng thấm.

Đối với đất không bão hòa, Fredlund và cộng sự [9] đề xuất biểu thị cường độ kháng cắt thông qua tổ hợp biến trạng thái ứng suất và ứng suất pháp thực $(\sigma - u_a)$ và lực hút dính $(u_a - u_w)$.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (4)$$

Trong đó τ = cường độ kháng cắt của đất; c' là lực dính đơn vị; $(\sigma - u_a)$ = ứng suất pháp thực; ϕ' = góc nội ma sát liên quan đến biến trạng thái ứng suất pháp thực; ϕ^b = góc biểu thị tốc độ tăng độ bền chống cắt có quan hệ với lực hút dính $(u_a - u_w)$; u_a = áp lực khí lỗ rỗng; u_w = áp lực nước lỗ rỗng.

3. Nghiên cứu ảnh hưởng của cường độ mưa và hình học mái dốc đến ổn định mái dốc

3.1. Phân tích ảnh hưởng của mưa đối với mái dốc

Nghiên cứu thực hiện phân tích ổn định mái dốc qua các trường hợp $q < k_s$; $q = k_s$ và $q > k_s$ đối với ba loại đất đại diện với độ dốc mái taluy 1/1 tương ứng với góc nghiêng 45° , chiều cao mái dốc $H_s = 10m$, thời gian mưa $I_d = 24h$.

Bảng 3. Cường độ mưa tác so với hệ số thấm.

Mẫu đất	$q = I_r (mm/h)$		
	$q < k_s$	$q = k_s$	$q > k_s$
$f_{10,-4}$	3	360	3600
$f_{50,-5}$	3	36	3600
$f_{100,-6}$	3	3,6	3600

Kết quả phân tích thể hiện trên hình 6-8. Hình 6 thể hiện sự thay đổi áp lực nước lỗ rỗng trong mái dốc theo thời gian mưa cho các mẫu

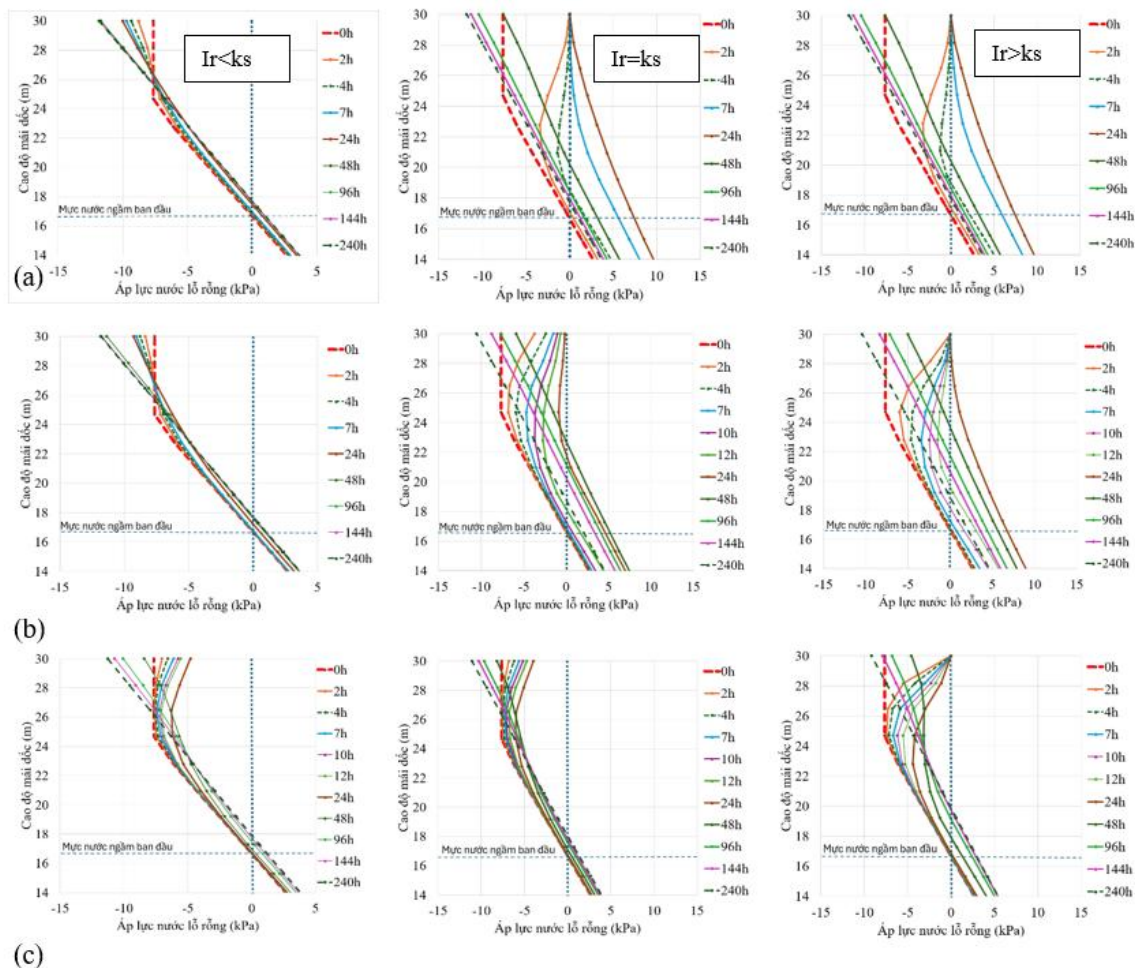
đất $f_{10,-4}$, $f_{50,-5}$, và $f_{100,-6}$ cho 3 trường hợp khác nhau của cường độ mưa $I_r < k_s$, $I_r = k_s$ và $I_r > k_s$. Kết quả cho thấy với 2 mẫu đất $f_{10,-4}$, $f_{50,-5}$ khi cường độ mưa lớn hơn hoặc bằng hệ số thấm ($I_r \geq k_s$), thì sau 2h mưa, mái dốc bắt đầu xuất hiện đường bão hòa ($u_w = 0$) trên vùng bề mặt mái dốc, khu vực nền đất nằm trên MNN ban đầu bắt đầu tăng áp lực nước lỗ rỗng (hình 7b), và sau 24h mưa mái dốc gần như đạt bão hòa và MNN xuất hiện trên bề mặt mái dốc (hình 7c). Trong khi đó, với mẫu đất $f_{100,-6}$ sau 24h mưa, áp lực nước lỗ rỗng trong mái dốc có thay đổi nhưng rất chậm và chưa đạt đến trạng thái bão hòa. Kết quả này có thể được giải thích bởi quá trình thấm chịu tác động chủ yếu do hai yếu tố: (i) hệ số thấm và (ii) chiều cao cột nước thủy lực hay gradien thủy lực. Khi đất có hệ số thấm lớn kết hợp với lượng mưa lớn theo thời gian sẽ tạo ra gradien thủy lực tăng cao và tăng tốc độ nước thấm vào nền đất dẫn đến nền đất nhanh đạt đến trạng thái bão hòa. Ngược lại, với đất có hệ số thấm nhỏ, dù lượng mưa lớn và kéo dài thì gradien thủy lực tạo ra không thay đổi nhiều, lúc này nước mưa phần lớn sẽ tạo thành nước mặt chảy trên mái dốc, chính điều này sẽ làm cho nền đất rất lâu mới đạt đến trạng thái bão hòa.

Kết quả hình 8 cho thấy, dưới tác động của mưa, hệ số ổn định mái dốc giảm theo thời gian mưa và đạt giá trị nhỏ nhất tại thời điểm

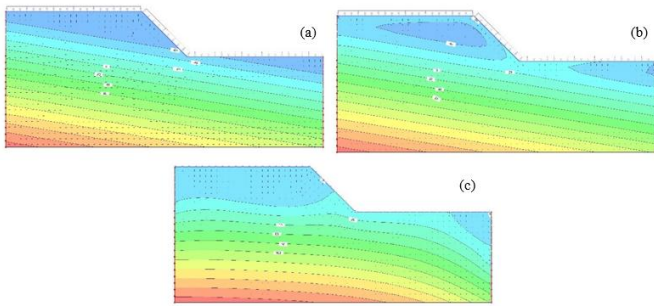
kết thúc đợt mưa (24h). Với hai mẫu đất $f_{10,-4}$, $f_{50,-5}$ cho thấy sau 24h mưa, mái dốc mất ổn định ($FoS = 0.8-1.06$) cho trường hợp $I_r = k_s$ và $I_r > k_s$, trong khi đó với $I_r < k_s$ hệ số FoS không thay đổi đáng kể trong quá trình mưa. Khi $I_r \geq k_s$, với mẫu đất $f_{10,-4}$ trong 2h sau khi bắt đầu mưa, hệ số an toàn FoS giảm 38,7 % ($FoS_{0h} = 2,09$; $FoS_{2h} = 1,28$), sau 24h thì hệ số an toàn giảm 61,2 % ($FoS_{24h} = 0,81$) và đạt lại trị số $FoS = 1.5$ sau khi hết mưa 24h (hình 8a). Tương tự cho mẫu đất $f_{50,-5}$ với tỷ lệ giảm lần lượt là 5,63 % ($FoS_{0h} = 2,09$; $FoS_{2h} = 1,96$), và 49 % ($FoS_{24h} = 1,06$). Cho đến sau 96h hệ số an toàn tăng dần lớn hơn 1,50 (hình 8b).

Đối với mẫu đất $f_{100,-6}$, khác với 2 mẫu đất ở phần trước. Áp lực nước lỗ rỗng trong mái dốc tăng lên khá chậm theo thời gian mưa và vẫn chưa đạt trạng thái bão hòa (hình 6c). Cho nên hệ số an toàn giảm không đáng kể: với cường độ mưa $q = 3600 \text{ mm/h}$, trong 2h sau khi bắt đầu mưa, hệ số an toàn FoS giảm 6,2 % ($FoS_{0h} = 2,09$; $FoS_{2h} = 1,96$), sau 24h thì hệ số an toàn giảm 29,2 % ($FoS_{24h} = 1,48$) (Hình 8c).

Các kết quả trên cho thấy, dưới tác động của mưa, do áp lực nước lỗ rỗng tăng lên trong quá trình mưa trực tiếp làm giảm cường độ chống cắt của đất trong khi làm tăng trọng lượng khối đất bên trên, chính điều này làm suy giảm hệ số ổn định mái dốc.

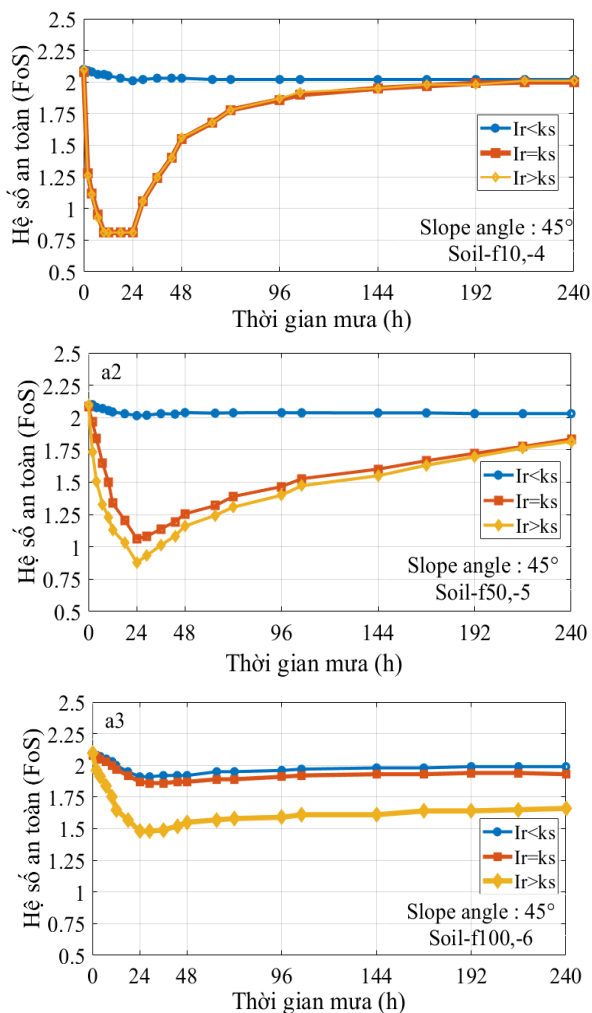


Hình 6. Biểu đồ thay đổi áp lực nước lỗ rỗng ($q > K_s$).



Hình 7. Biểu đồ thay đổi hệ số an toàn theo thời gian.

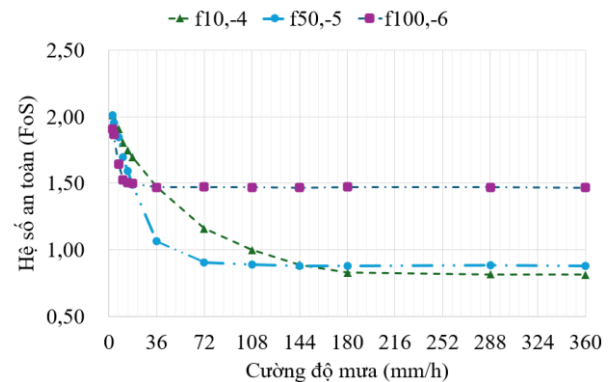
3.2. Ảnh hưởng của cường độ mưa



Hình 8. Biểu đồ thay đổi áp lực nước lỗ rỗng ($q = Ks$).

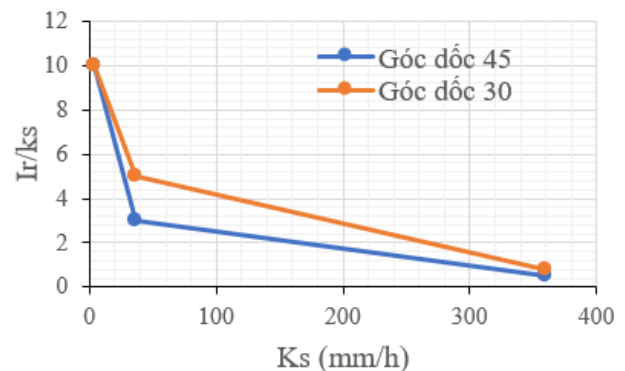
Từ kết quả phân tích trên cho thấy cường độ mưa ảnh hưởng lớn đến hệ số ổn định FoS của mái dốc. Trong phần này, nghiên cứu thực hiện thay đổi cường độ mưa tác động lên mái dốc $Ir = [3; 36; 72; 108; 144; 180; 288; 360]$ với thời gian mưa không thay đổi $Id = 24h$, chiều cao mái dốc không đổi $Hs = 10m$; xét cho mái dốc có góc nghiêng 45° .

Kết quả thể hiện trong hình 9. Kết quả cho thấy hệ số an toàn (FoS_{24h}) của mái dốc có xu hướng giảm nhanh ở giai đoạn đầu và dần tiến tới trạng thái ổn định, trong đó đối với đất có hệ số thấm cao $f_{10,-4}$, sự suy giảm chậm lại khi cường độ mưa đạt $q = 0,5Ks$ (180 mm/h); với mẫu đất $f_{50,-5}$, xu hướng này xuất hiện khi $q = 2Ks$ (72 mm/h). Đối với mẫu đất $f_{100,-6}$, hệ số an toàn gần như không thay đổi kể từ khi cường độ mưa đạt $q = 5Ks$ (18mm/h).



Hình 9. Ảnh hưởng của cường độ mưa đối với hệ số an toàn, mái dốc 45° .

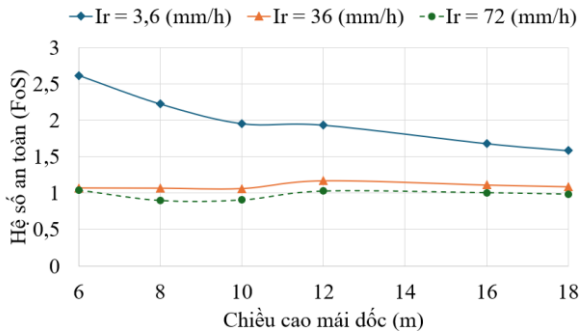
Từ kết quả hình 9, nghiên cứu chỉ ra ảnh hưởng của tỷ số Ir/ks đến hệ số ổn định nhỏ nhất (FoS_{min}) của mái dốc như trong hình 10. Kết quả cho thấy, với mỗi loại đất có hệ số thấm khác nhau sẽ cho tỷ số Ir/ks để mái dốc đạt FoS_{min} khác nhau. Khi nền đất có ks càng nhỏ thì tỷ số này càng lớn. Kết quả này được giải thích bởi mô hình dòng thấm sử dụng trong nghiên cứu, với mỗi loại đất có hệ số thấm nhất định sẽ cho một lượng nước thấm vào nền đất nhất định, khi lượng mưa lớn hơn trị số này, toàn bộ phần chênh lệch sẽ chuyển thành dòng chảy mặt không gây ra gradient thủy lực thấm vào nền đất. Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy, khi góc nghiêng mái dốc càng lớn thì tỷ số này càng nhỏ: điều này có nghĩa là khi mái dốc nghiêng lớn, chỉ cần cường độ mưa nhỏ cũng gây khả năng mất ổn định mái dốc cao hơn.



Hình 10. Quan hệ giữa $Ir-ks$ đến trị số FoS_{min} .

3.3. Ảnh hưởng của chiều cao mái dốc

Xét ảnh hưởng của chiều cao mái dốc cho mẫu đất $f_{50,-5}$ với chiều cao mái dốc thay đổi $H = [6; 8; 10; 12; 16; 18]$ với góc nghiêng mái dốc là 45; trong đó đối với mái dốc có chiều cao $H > 10$ m có bố trí rãnh cơ 2m, cơ đầu tiên cao 8m theo thiết kế khuyến nghị của TCVN hiện hành.



Hình 11. Ảnh hưởng của chiều cao mái dốc đối với hệ số an toàn.

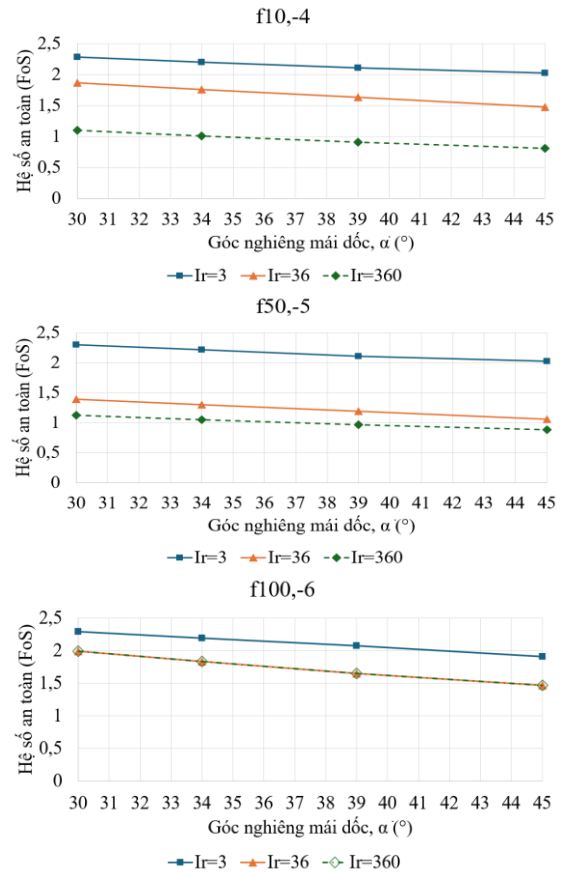
Kết quả cho thấy đối với cả mái dốc 1 cơ (6 m đến 10 m) hay 2 cơ (12 m đến 18 m), khi chiều cao mái dốc tăng thì hệ số an toàn giảm dần. Đối với chiều cao mái dốc thấp, mặc dù hệ số an toàn ban đầu cao hơn nhưng do mực nước ngầm tăng lên, phần đất bị bão hòa hơn nên mái dốc có chiều cao lớn, nên hệ số an toàn của mái dốc vẫn giảm ($FoS < 1$). Ngược lại, với mái dốc có chiều cao lớn, mực nước ngầm không dâng lên nhanh, nhưng vì hệ số an toàn ban đầu thấp nên dưới ảnh hưởng của mưa, áp lực nước lỗ rỗng của phần đất phía trên mực nước ngầm tăng vẫn làm cho mái dốc trở nên nguy hiểm ($FoS < 1$).

Kết quả cho thấy, khi thiết kế cấu tạo mái dốc theo TCVN hiện hành, việc giạt cơ và chiều cao giạt cơ sẽ ảnh hưởng đến ổn định mái dốc dưới tác động của mưa nhiều hơn là chiều cao thuần túy của mái dốc. Kết quả này lần nữa khẳng định giải pháp hình học (giạt cơ mái dốc) là hiệu quả trong phòng chống sạt trượt mái dốc.

3.4. Ảnh hưởng của góc nghiêng mái dốc

Trong phần 3.2 cho thấy góc nghiêng mái dốc có ảnh hưởng đến FoS. Ở mục này, nghiên cứu thực hiện thay đổi góc nghiêng mái dốc $\alpha = [30^\circ; 33^\circ; 39^\circ; 45^\circ]$ cho mái dốc $H_s = 10$ m, xét cho ba cường độ mưa đặc trưng $Ir = [3; 36; 360]$ mm/h. Kết quả thể hiện trong hình 12.

Kết quả cho thấy hệ số an toàn giảm dần khi góc nghiêng mái dốc tăng đối với cả ba loại đất. Khi mái dốc dốc hơn, lực gây trượt tăng lên nên độ ổn định giảm. Khi mái dốc tăng từ 30° lên 45° (tăng 50 %) thì hệ số FoS giảm từ 2.28 xuống 0.81 theo hệ số thấm và cường độ mưa khác nhau: FoS giảm từ 11.4 % ($f_{10,-4}$ và $Ir=3$) đến 26.2% ($f_{10,-4}$ và $Ir=360$).



Hình 12. Ảnh hưởng của góc nghiêng mái dốc $H_s = 10$ m.

4. Kết luận

Nghiên cứu tiến hành phân tích ảnh hưởng của cường độ mưa và kích thước hình học mái dốc đến hệ số ổn định mái dốc FoS cho 3 mẫu đất có đặc trưng cơ lý khác nhau. Kết quả nghiên cứu cho thấy cường độ mưa và hình học mái dốc ảnh hưởng rất lớn đến hệ số ổn định FoS min:

- ✓ Khi $Ir \geq ks$, hệ số FoS giảm từ 5.63-38.7 % khi cơn mưa kéo dài 2h và giảm từ 29.2-61.2 % khi mưa kéo dài trong 24h.
- ✓ Với mỗi loại đất khác nhau, mái dốc sẽ đạt hệ số FoSmin với tỷ số Ir/ks nhất định: tỷ số thay đổi trong khoảng 0.5-10.
- ✓ Chiều cao mái dốc tăng từ 300 % thì FoSmin giảm 40.7 %. Đồng thời chiều cao của cơ mái dốc ảnh hưởng rõ hơn chiều cao thuần của mái.
- ✓ Góc nghiêng của mái dốc tăng 50% làm cho hệ số FoS giảm từ 11.4-26.2 %.

Kết quả nghiên cứu chứng minh tác động của biến đổi khí hậu đến ổn định mái dốc là rất lớn. Cần nhiều nghiên cứu từ thực nghiệm đến mô hình toán để đánh giá và đưa ra các giải pháp phòng tránh kịp thời và phù hợp, đặc biệt trong điều kiện biến đổi khí hậu ngày càng phức tạp.

Tài liệu tham khảo

- [1]. D. G. Fredlund, "Soil mechanics for unsaturated soils," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 12, no. 7, pp. 449–450, 1993, doi: 10.1016/0267-7261(93)90011-f.
- [2]. H. Rahardjo, T. H. Ong, R. B. Rezaury, and E. C. Leong, "Factors Controlling Instability of Homogeneous Soil Slopes under Rainfall," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, no. 12, pp. 1532–1543, 2007, doi: 10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:12(1532).
- [3]. Nguyễn Văn Thìn, "Ảnh hưởng của mưa đến ổn định mái dốc," *Tạp chí giao thông vận tải*, 2007.
- [4]. Nguyễn Huy Hiệp, "Dự báo, tính toán ổn định mái dốc ở KonTum, Tây Nguyên có xét đến ảnh hưởng của lượng mưa và từ biến," *Tạp chí giao thông vận tải*, 2024.
- [5]. Phạm Ngọc Thắng, "Mô phỏng, phân tích ổn định của mái dốc đất không bão hòa sau mưa," *Tạp chí giao thông vận tải*, 2024.
- [6]. H. Rahardjo, L. Eng Choon, M. S. Deutscher, J. M. Gasmo, and T. Sek Kwan, "Rainfall – induced slope failures," 2000.
- [7]. E. C. Leong and H. Rahardjo, "Review of Soil-Water Characteristic Curve Equations," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, no. 12, pp. 1106–1117, 1997, doi: 10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:12(1106).
- [8]. E. C. Leong and H. Rahardjo, "PERMEABILITY FUNCTIONS FOR UNSATURATED SOILS By E. C. Leong," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, no. 12, pp. 1118–1126, 1998.
- [9]. D. G. Fredlund, "Soil mechanics for unsaturated soils," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 12, no. 7, pp. 449–450, 1993, doi: 10.1016/0267-7261(93)90011-f.