

PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA NƯỚC DƯỚI ĐẤT KHÔNG BẢO HÒA TRONG TÍNH TOÁN ỔN ĐỊNH MÁI ĐẤT VÙNG MIỀN NÚI PHÍA BẮC

Hoàng Trọng Ngọc¹, Nguyễn Ngọc Thanh², Phạm Hoàng Hiếu³

¹Viện Khoa học công nghệ xây dựng

^{2,3}Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

Email: ¹hoangngocibst@gmail.com, 0985 877 227; ²nnthanhdhkt@gmail.com, 0943 298 808;

³iamphh2031@gmail.com, 0393 176 368

DOI: <https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses3-11>

TÓM TẮT: Nước dưới đất trong vùng không bão hòa đóng vai trò quan trọng trong cơ chế ổn định mái dốc. Lực hút mao dẫn [1] tạo nên độ bền cắt biểu kiến, góp phần tăng hệ số ổn định mái dốc trong mùa khô. Tuy nhiên, khi xảy ra mưa lớn và kéo dài, hiện tượng thấm nước làm giảm lực hút mao dẫn, dẫn đến giảm độ bền cắt, thậm chí phát sinh áp lực nước lỗ rỗng dương trong các lớp kém thấm, gây mất ổn định. Bài báo này tập trung phân tích cơ sở lý thuyết, ảnh hưởng đặc thù của điều kiện không bão hòa đến ổn định mái đất ở vùng miền núi phía Bắc, đồng thời đề xuất hướng tiếp cận trong mô hình tính toán và biện pháp xử lý phù hợp.

TỪ KHÓA: Nước dưới đất không bão hòa, ổn định mái dốc, lực hút mao dẫn, miền núi phía Bắc.

ABSTRACT: Groundwater in the unsaturated zone plays an important role in the mechanism of slope stability. Matric suction [1] creates apparent shear strength, contributing to increasing the slope stability coefficient in the dry season. However, when heavy and prolonged rain occurs, water seepage reduces suction, leading to a decrease in shear strength, even generating positive pore water pressure in poorly permeable layers, causing instability. This paper focuses on analyzing the theoretical basis and the specific effects of unsaturated conditions on the stability of soil slopes in the Northern mountainous region, and at the same time proposes approaches in calculation models and appropriate treatment measures.

KEYWORDS: Unsaturated groundwater, slope stability, suction, northern mountainous region.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam có địa hình phức tạp, độ dốc lớn, điều kiện mưa tập trung theo mùa và cường độ cao. Đây là khu vực thường xuyên xảy ra hiện tượng sạt trượt đất, gây thiệt hại lớn về người và tài sản.



Hình 1: Toàn cảnh những điểm sạt lở ở Bát Xát, Lào Cai được chụp lại vào chiều 11/9/2024

Một trong những yếu tố thủy văn - địa kỹ thuật quan trọng tác động đến sự ổn định mái dốc là sự tồn tại và biến đổi của nước dưới đất trong vùng không bão hòa. Trong các nghiên cứu truyền thống, nước dưới đất thường được đơn giản hóa theo

trạng thái bão hòa, bỏ qua ảnh hưởng của lực hút mao dẫn. Điều này dẫn đến sự sai lệch trong đánh giá ổn định, đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu làm gia tăng các trận mưa cực đoan. Vì vậy, việc xem xét và mô hình hóa tác động của nước dưới đất không bão hòa trong tính toán ổn định mái đất là cần thiết.

Khi phân tích ổn định mái dốc, hệ số an toàn phụ thuộc các yếu tố như cường độ mưa, hệ số thấm bão hòa, độ sâu mực nước ngầm ban đầu, chiều cao mái dốc, góc mái dốc và các nhân tố khác.



Hình 2: Ảnh hưởng của các yếu tố thời tiết đến sức chống cắt của đất

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Khái niệm đất không bão hòa

Đất không bão hòa là một hỗn hợp của hơn hai pha (thông thường là ba pha gồm: rắn, nước và khí) và có áp lực nước lỗ rỗng là âm (do có áp lực khí lỗ rỗng). Mọi loại đất gần mặt đất, ở môi trường tương đối khô, sẽ chịu áp lực nước lỗ rỗng âm và không bão hòa.

2.2. Hiệu ứng Lực hút mao dẫn

Trong vùng không bão hòa, lực hút mao dẫn giữa pha khí và pha nước làm tăng ứng suất hữu hiệu. Theo mô hình Bishop (1959) [2], ứng suất hữu hiệu được biểu diễn:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.1)$$

Trong đó u_a là áp lực khí, u_w là áp lực lỗ rỗng, χ là hệ số phụ thuộc độ bão hòa.

2.3. Cường độ kháng cắt

Cường độ kháng cắt [3] đóng vai trò như một “lực dính biểu kiến”, góp phần tăng cường ổn định mái dốc khi đất chưa bão hòa:

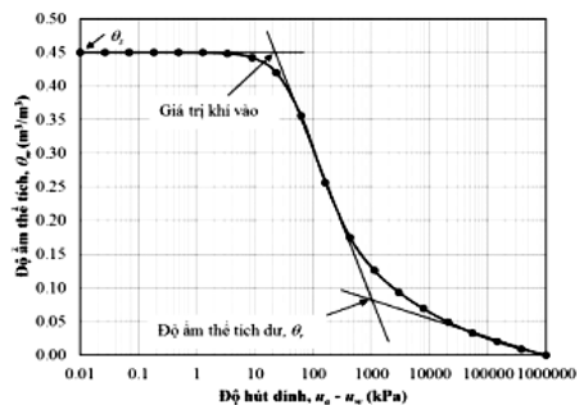
$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.2)$$

Trong đó ϕ^b biểu diễn góc ma sát do lực hút mao dẫn, liên hệ trực tiếp với đường đặc trưng đất - nước (SWCC) [4]

2.4. Mất ổn định do giảm lực hút mao dẫn

Khi mưa lớn xảy ra, lực hút mao dẫn giảm nhanh, đặc biệt ở lớp bề mặt và tại ranh giới với lớp kém thấm, làm giảm đáng kể lực kháng cắt.

2.5. Đường cong đặc trưng đất - nước (SWCC)



Hình 3: Đường cong đặc trưng đất nước (SWCC)

Đường cong SWCC thường được biểu diễn dưới dạng mối quan hệ giữa độ bão hòa, độ ẩm trọng lượng hoặc độ ẩm thể tích với độ hút dính

(Hình 1). Trong công trình nghiên cứu của Leong và Rahardjo (1997) [1] đã đánh giá lại các phương trình thực nghiệm và kết luận rằng phương trình của Fredlund và Xing (1994) [5] là phù hợp với thực tế nhất, tiếp đến là phương trình của Van Genuchten (1980) [4].

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Mái dốc điển hình vùng miền núi phía Bắc.

a. Đặc điểm về địa hình, địa chất

Về địa hình, địa chất tự nhiên, khu vực Tây Bắc vốn nằm trên các đứt gãy lớn như đứt gãy sông Hồng, sông Chảy... Trong đó, đứt gãy sông Hồng là một trong những hệ thống lớn nhất, rộng 5 - 10 km và kéo dài hàng nghìn km, cắt qua Lào Cai, Yên Bái. Khu vực này có địa hình núi cao, bị chia cắt mạnh, với dãy Hoàng Liên Sơn đồ sộ; trong khi Đông Bắc có địa hình thấp hơn, đa dạng với các dãy núi thấp hình cánh cung và cao nguyên đá vôi.

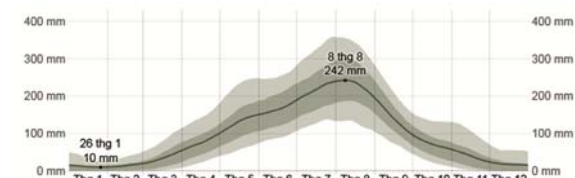
Về địa chất, hoạt động của các đứt gãy khiến nền đất bị nứt nẻ, vò nhàu, tạo điều kiện cho nước thấm sâu, đất đá bị phong hóa mạnh trở nên mềm, bờ rất nhanh.



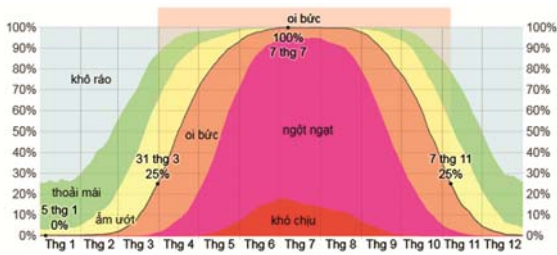
Hình 4: Đèo ô Quy Hồ một trong tứ đại đỉnh đèo của Việt Nam

b. Đặc điểm khí hậu

Vùng núi phía Bắc có hậu nhiệt đới gió mùa, mùa đông lạnh khô ít mưa và mùa hè nóng nhiều mưa



Hình 5: Lượng mưa trung bình hàng tháng tại Lào Cai [6]



Hình 6: Độ ẩm trung bình hàng tháng tại Lào Cai [6]

3.2. Phương pháp

Sử dụng Plaxis 2D để mô phỏng ổn định mái dốc

3.3. Kích bản phân tích

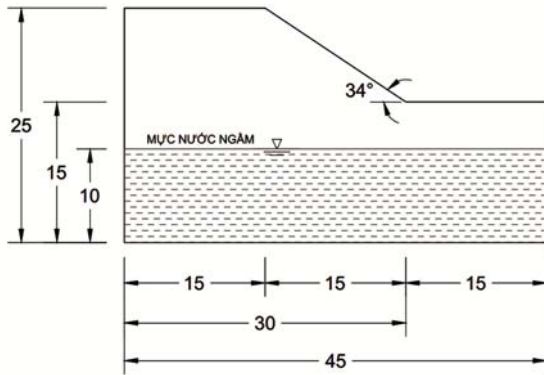
Xem xét tác động của nước không bão hòa trong điều kiện mưa tập trung ở miền núi phía Bắc theo 3 kịch bản:

- Kịch bản 1: Mái dốc trong điều kiện khô hạn (sức hút ẩm cao).
- Kịch bản 2: Sau mưa ngắn hạn (độ bão hòa tăng vừa phải).
- Kịch bản 3: Sau mưa kéo dài (gần bão hòa hoàn toàn).

3.4. Mô hình tính toán

a. Mô hình địa hình

Mái dốc thí nghiệm dạng 2D cao $h = 10$ m, góc mặt dốc $\beta = 34^\circ$.



Hình 7: Mô hình mái dốc điển hình vùng núi phía Bắc

b. Vật liệu đất

Trọng lượng riêng bão hòa $\gamma_{sat} = 19.6$ kN/m³;

Trọng lượng khô $\gamma_{dry} = 18.1$ kN/m³;

Lực dính hiệu quả $c' = 1.0$ kPa;

Góc ma sát hiệu quả $\phi' = 30^\circ$;

Modul đàn hồi: $E_{50}^{ref} = 15.000$ kN/m²;

$E_{oed}^{ref} = 15.000$ kN/m²; $E_{ur}^{ref} = 45.000$ kN/m²;

Hệ số poisson $\nu = 0.2$;

Nước ngầm: theo lý thuyết Van Genuchten;

c. Điều kiện biên ban đầu

- Mức nước ngầm ban đầu: nằm ở độ sâu 15 m dưới đỉnh mái (tức mái ở trạng thái không bão hòa lớn ở tầng mặt).

- Biên trái/phải: lề cố định ngang (fix horizontal displacement), đáy: cố định cả theo ngang lẫn dọc.

- Mặt tự do phía trên: điều kiện thoáng, nhận lượng mưa thấm tự do.

d. Kích bản mưa

- Kịch bản 1 (khô hạn): Không mưa, giữ trạng thái ban đầu.

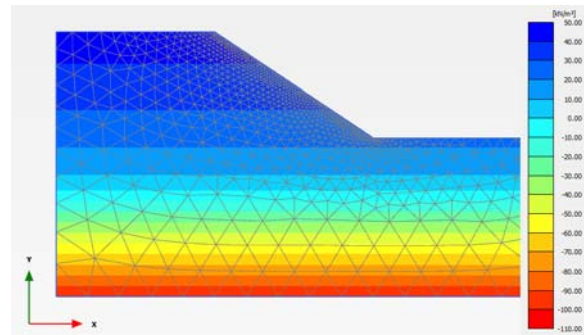
- Kịch bản 2 (mưa ngắn hạn): mưa tổng cộng 140 mm trong 2 ngày → tương đương lưu lượng 70 mm/ngày.

- Kịch bản 3 (mưa kéo dài): mưa 430 mm trong 6 ngày (mưa liên tục) → tương đương lưu lượng 70 mm/ngày.

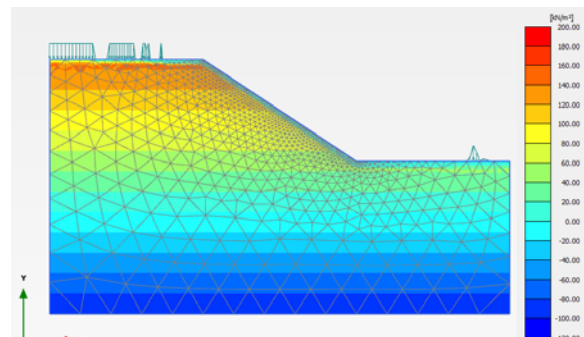
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. So sánh kết quả của 3 kịch bản:

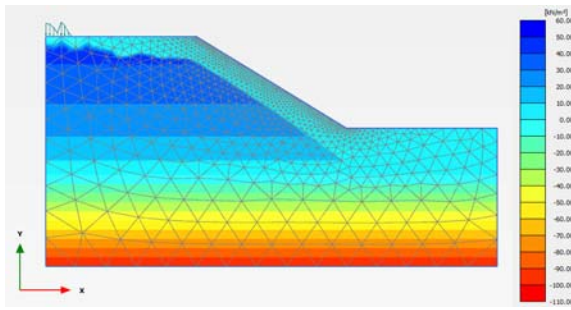
a. Bản đồ phân bố áp lực lỗ rỗng (pore pressure u_v)



Hình 8: Kịch bản 1 - Điều kiện khô hạn



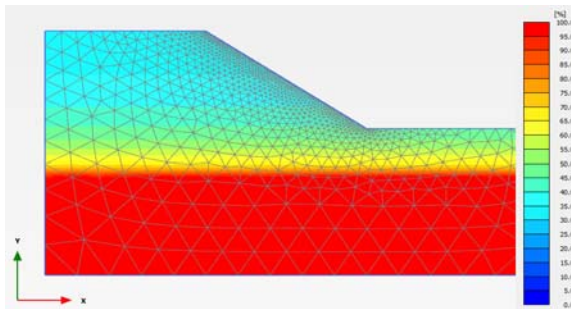
Hình 9: Kịch bản 2 - Sau mưa ngắn hạn



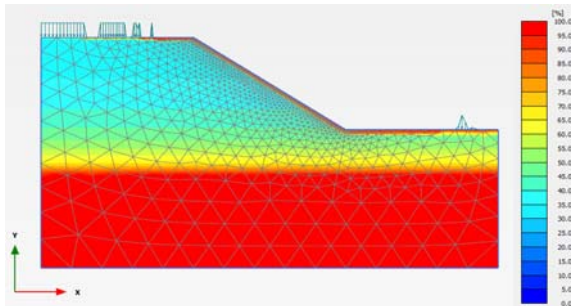
Hình 10: Kịch bản 3 - Sau mưa kéo dài

Nhận xét: Khi xuất hiện mưa, bề mặt mái dốc có áp lực lỗ rỗng (pore pressure u_w) gần như bằng 0, vùng ảnh hưởng càng ngày càng sâu khi mưa càng kéo dài.

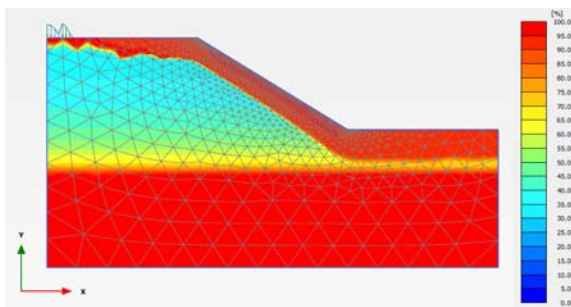
b. Bản đồ độ bão hòa ($Saturation_{eff}$)



Hình 11: Kịch bản 1 - Điều kiện khô hạn



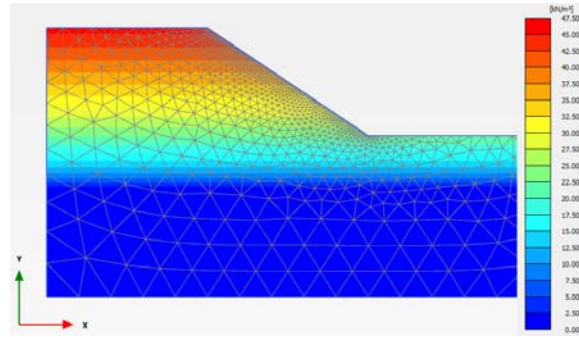
Hình 12: Kịch bản 2 - Sau mưa ngắn hạn



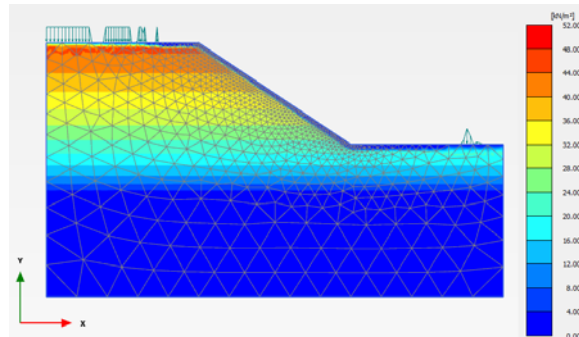
Hình 13: Kịch bản 3 - Sau mưa kéo dài

Nhận xét: Khi xuất hiện mưa, đất tại bề mặt mái dốc sẽ bị bão hòa nước ($Saturation_{eff} = 100\%$), vùng ảnh hưởng càng ngày càng sâu khi mưa càng kéo dài.

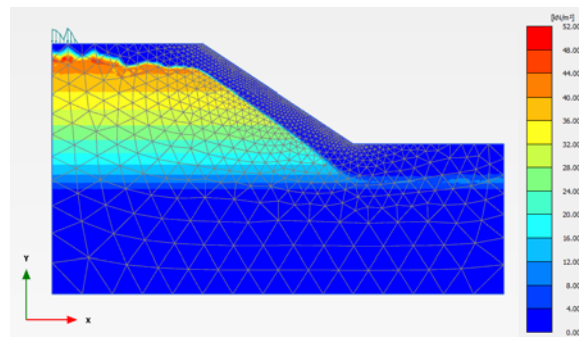
c. Lực hút mao dẫn



Hình 14: Kịch bản 1 - Điều kiện khô hạn



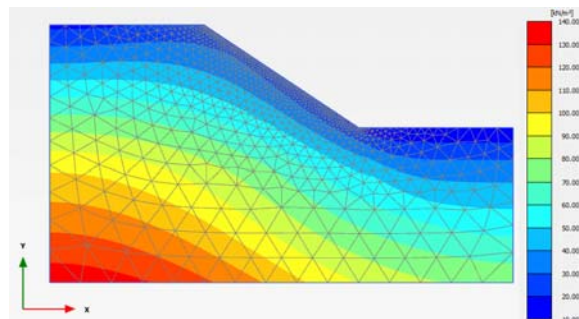
Hình 15: Kịch bản 2 - Sau mưa ngắn hạn



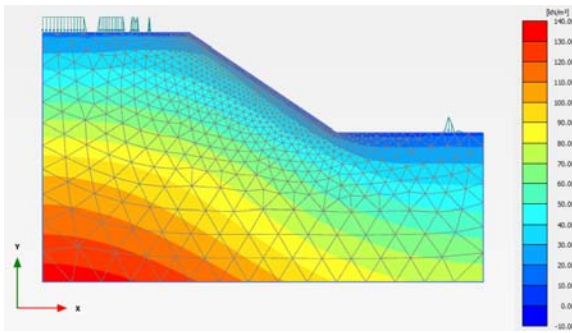
Hình 16: Kịch bản 3 - Sau mưa kéo dài

Nhận xét: Khi xuất hiện mưa, bề mặt mái dốc có lực hút mao dẫn gần như bằng 0, vùng ảnh hưởng càng ngày càng sâu khi mưa càng kéo dài.

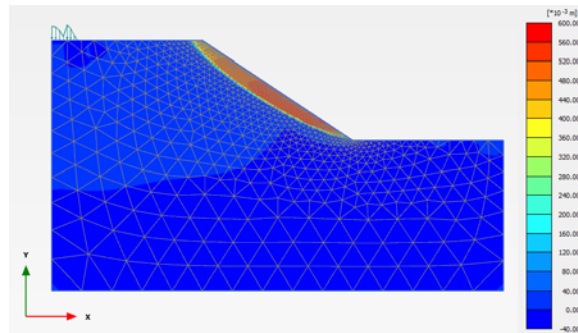
d. Cường độ kháng cắt



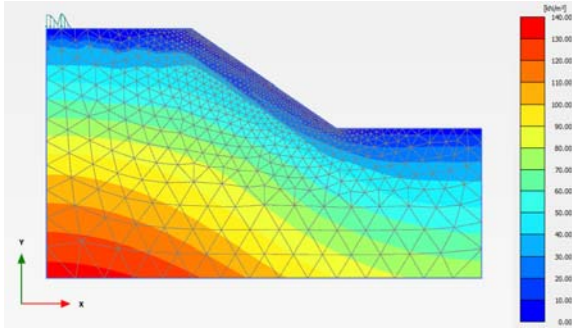
Hình 17: Kịch bản 1 - Điều kiện khô hạn



Hình 18: Kịch bản 2 - Sau mưa ngắn hạn



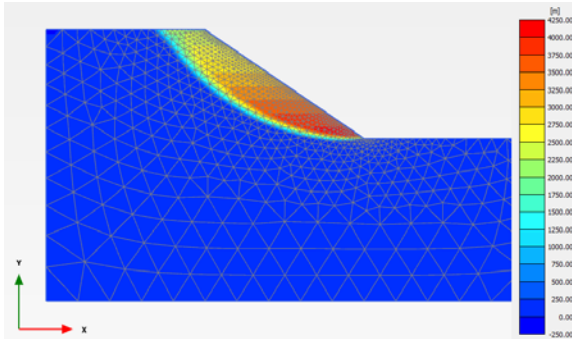
Hình 22: Kịch bản 3 - Sau mưa kéo dài



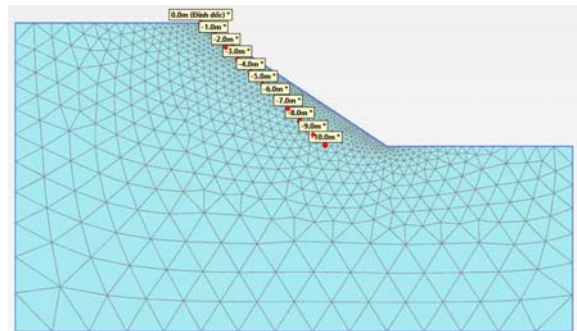
Hình 19: Kịch bản 3 - Sau mưa kéo dài

Nhận xét: Tương tự với lực hút mao dẫn, khi xuất hiện mưa, bề mặt mái dốc có cường độ kháng cắt gần như bằng 0, vùng ảnh hưởng càng ngày càng sâu khi mưa càng kéo dài.

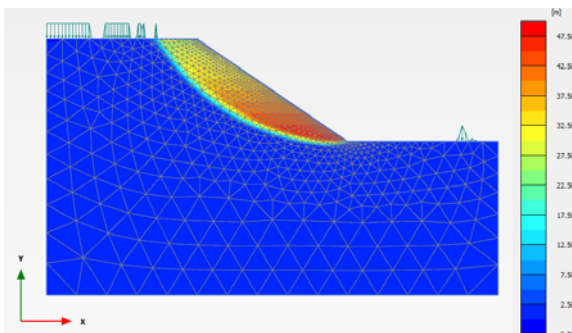
e. Mặt trượt tiềm năng



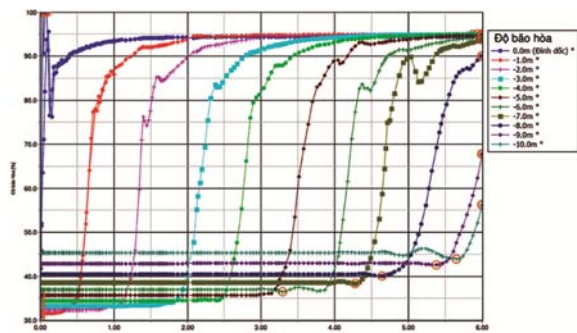
Hình 20: Kịch bản 1 - Điều kiện khô hạn



Hình 23: Vị trí các điểm được xem xét



Hình 21: Kịch bản 2 - Sau mưa ngắn hạn



Hình 24: Biểu đồ độ bão hòa theo thời gian

Nhận xét: khi mưa càng kéo dài, chiều dài và độ sâu của cung trượt càng giảm dần, mái dốc có xu hướng trượt sát dần với bề mặt.

f. So sánh hệ số F_s

Kịch bản 1 - Điều kiện khô hạn: $F_s = 1.94$

Kịch bản 2 - Sau mưa ngắn hạn: $F_s = 1.88$

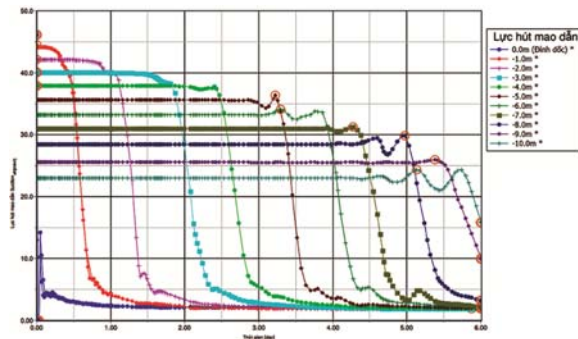
Kịch bản 3 - Sau mưa kéo dài: $F_s = 0.98$

→ Trượt diễn ra.

Nhận xét: khi mưa càng kéo dài, hệ số F_s càng giảm, cho thấy sự ảnh hưởng của mưa tới độ an toàn của mái dốc. Tại kịch bản 3, sau khi mưa kéo dài, trượt đã diễn ra.

4.2. Ảnh hưởng của mưa theo thời gian

Để phân tích ảnh hưởng của mưa theo thời gian, chọn 11 điểm có tọa độ từ đỉnh dốc xuống dần đến chân dốc trong kịch bản 3 với 6 ngày mưa liên tục.



Hình 25: Biểu đồ lực hút mao dẫn theo thời gian

Nhận xét: Các điểm càng gần bề mặt mái dốc càng có tốc độ bão hòa nhanh trong ngày đầu mưa. Theo độ sâu, tốc độ bão hòa chậm hơn, tuy nhiên với đủ thời gian mưa, đất ở các vị trí này sẽ dần bị bão hòa.

Khi đất bão hòa nước, lực hút mao dẫn giảm dần về 0, dẫn tới giảm độ bền cắt. Điều này làm cho mái dốc bị mất ổn định và dẫn tới trượt.

4.3. Tác động địa phương ở miền núi phía Bắc

- Mưa lớn: Mưa lớn và kéo dài vào các tháng 6 đến tháng 8 (lượng mưa trung bình hơn 200 mm) là yếu tố kích hoạt chính, làm nước thấm sâu vào lòng đất, tăng áp lực nước ngầm, làm giảm lực hút mao dẫn.

- Địa hình dốc, địa chất bị phong hóa mạnh: Miền núi phía Bắc có địa hình hiểm trở, độ dốc lớn. Địa chất phong hóa mạnh, khả năng thấm nước sâu.

- Hoạt động của con người: Thảm thực vật và rễ cây chống sạt lở nhờ vào hệ thống rễ chắc chắn giữ đất, che chắn và giảm tác động của mưa và dòng chảy. Tuy nhiên, hoạt động chặt phá rừng, đốt nương đã làm giảm lớp bảo vệ tự nhiên này của mái dốc.

4.4. Đề xuất giải pháp kỹ thuật

- Mô phỏng ổn định mái dốc theo điều kiện không bão hòa, sử dụng SWCC và mô hình thấm - biến đổi theo thời gian. Cần mô phỏng mưa thiết kế ngắn hạn với lượng mưa lớn hơn là chỉ mô phỏng theo lượng mưa trung bình hàng năm

- Ứng dụng hệ thống thoát nước mặt và ngầm để giảm sự tích tụ áp lực nước.

- Tăng cường phủ xanh và bảo vệ thảm thực vật, rễ cây có khả năng giữ đất, giảm nguy cơ sạt lở.

- Thiết lập hệ thống quan trắc thực địa (tensiometer, piezometer) để theo dõi biến động lực hút mao dẫn và áp lực nước.

- Ổn định bằng phương pháp cơ học: mái taluy bậc, mái gia cố, tường chắn, cọc khoan cừ, đinh đất (Soil Nails)

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nước dưới đất không bão hòa có ảnh hưởng quyết định đến sự ổn định mái dốc tại khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam. Lực hút mao dẫn giúp tăng cường ổn định trong mùa khô, nhưng sự suy giảm nhanh chóng của lực hút mao dẫn khi mưa lớn lại là nguyên nhân trực tiếp gây mất ổn định. Do đó:

- Việc tính toán ổn định mái đất cần xét đến đặc trưng đất - nước (SWCC) và điều kiện thấm không ổn định.

- Các giải pháp công trình và phi công trình phải hướng đến kiểm soát sự thay đổi của áp lực nước lỗ rỗng.

- Cần đẩy mạnh quan trắc trường và mô hình dự báo theo thời gian để phục vụ cảnh báo sớm và quản lý rủi ro thiên tai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Fredlund, D. G., & Morgenstern, N. R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT5), 447-466.
- [2] Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. Teknisk Ukeblad, 106(39), 859-863.
- [3] Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. Wiley-Interscience.
- [4] Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892-898.
- [5] Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31(4), 521-532.
- [6] Website: vi.weatherspark.com