

Nghiên cứu so sánh các phương pháp đánh giá ổn định mái dốc dưới các góc nghiêng khác nhau

A comparative study of slope stability assessment methods under varying slope angles

ThS. Đặng Thị Thu Hà^{1*}, ThS. Lê Minh Tân¹

¹Khoa Kỹ Thuật Hạ Tầng – Đô Thị, Trường Đại học Xây Dựng Miền Tây;

*Tác giả liên hệ: dangthithuha@mtu.edu.vn

■ Nhận bài: 28/11/2024 ■ Sửa bài: 16/12/2024 ■ Duyệt đăng: 12/02/2025

TÓM TẮT

Bài báo trình bày các phương pháp tính toán ổn định mái dốc bao gồm phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và các phương pháp cân bằng giới hạn (LEM). Các góc nghiêng của mái dốc β từ 15° đến 75° được xem xét để phân tích sự ảnh hưởng của hình học mái dốc đối với hệ số an toàn (F_s). Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng hệ số an toàn (F_s) giảm khi góc nghiêng của mái dốc tăng, điều này phản ánh sự suy giảm trong khả năng ổn định do tác động của lực gây trượt. Ở các góc dốc (15° và 30°), sự khác biệt giữa phương pháp FEM và LEM không đáng kể, tuy nhiên, khi góc dốc tăng (45° , 60° và 75°), sự chênh lệch giữa các phương pháp này trở nên rõ rệt hơn, với FEM thường cho giá trị F_s thấp hơn. Điều này nhấn mạnh rằng FEM có xu hướng đưa ra các đánh giá thận trọng hơn, đặc biệt phù hợp cho các thiết kế yêu cầu mức độ an toàn cao hơn.

Từ khóa: Ổn định mái dốc, hệ số an toàn, phương pháp phần tử hữu hạn, phương pháp cân bằng giới hạn

ABSTRACT

The paper presents various methods for slope stability analysis, including the Finite Element Method (FEM) and Limit Equilibrium Methods (LEM). Slope angles (β) ranging from 15° to 75° are considered to analyze the influence of slope geometry on the factor of safety (F_s). The research findings indicate that the factor of safety (F_s) decreases as the slope angle increases, reflecting a reduction in stability due to the greater impact of sliding forces. At lower slope angles (15° and 30°), the difference between FEM and LEM is insignificant. However, as the slope angle increases (45° , 60° , and 75°), the disparity between these methods becomes more pronounced, with FEM generally yielding lower F_s values. This highlights that FEM tends to provide more conservative assessments, making it particularly suitable for designs requiring higher safety margins.

Keywords: Slope stability, safety factor, FEM, LEM

1. GIỚI THIỆU

Phân tích sự ổn định của mái dốc là một phần quan trọng trong công tác thiết kế địa kỹ thuật, có ảnh hưởng trực tiếp đến sự an toàn và lâu dài của các công trình. Với sự phát triển của công nghệ, các phương pháp mô phỏng máy tính ngày càng được áp dụng phổ biến trong lĩnh vực này nhờ khả năng xác định

chính xác các bề mặt phá hoại có thể xảy ra. Các công cụ này không chỉ cung cấp các đánh giá đáng tin cậy về mức độ ổn định của mái dốc, mà còn giúp đưa ra những giải pháp thiết kế hiệu quả, góp phần giảm thiểu rủi ro và nâng cao hiệu quả tổng thể của dự án.

Trong số các phương pháp phân tích, cân bằng giới hạn (LEM) từ lâu được xem như

phương pháp truyền thống nhờ tính đơn giản và dễ áp dụng. Tuy nhiên, với sự phát triển của các công nghệ tính toán, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) đang dần trở thành lựa chọn ưu tiên nhờ khả năng mô phỏng chi tiết hơn các điều kiện thực tế. Hai công cụ đại diện cho hai phương pháp này, SLOPE/W (LEM) và PLAXIS (FEM), hiện đang được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực kỹ thuật địa kỹ thuật. Trong các nghiên cứu gần đây, phương pháp FEM và phương pháp LEM đã được áp dụng để đánh giá sự ổn định của mái dốc tự nhiên. Kết quả chỉ ra rằng sự thay đổi trong các hình học mái dốc có ảnh hưởng đáng kể đến Fs. Mặc dù cả hai phương pháp cho kết quả gần tương đương, FEM thường đưa ra giá trị Fs cao hơn so với LEM. Tuy nhiên, cả hai phương pháp đều cho phép xác định chính xác cơ chế phá hoại của mái dốc [1, 2].

Năm 2021, nhóm nghiên cứu của Senapati [3] đã so sánh phương pháp cân bằng giới hạn (LEM) và phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để phân tích độ ổn định độ dốc, nhấn mạnh rằng các yếu tố như hình học, địa chất và góc nghiêng ảnh hưởng đáng kể đến độ ổn định độ dốc, nhấn mạnh tầm quan trọng của các tham số này trong cả hai phương pháp. Tiếp theo đó, nhóm nghiên cứu của Sravya [4] đã thực hiện một phân tích quan trọng về ổn định mái dốc tại đèo Agumbe ở Karnataka và Dhobighat ở Hyderabad, sử dụng hai phương pháp phổ biến là phương pháp FEM và LEM, cho thấy rằng cả hai sườn dốc đều được đánh giá là không ổn định, với hệ số an toàn (Fs) của phương pháp FEM thường có xu hướng thấp hơn so với LEM, bởi vì FEM có khả năng mô phỏng sát với điều kiện thực tế hơn, đặc biệt là khi tái hiện các yếu tố phức tạp ảnh hưởng đến sự ổn định của mái dốc. Một nghiên cứu khác về mối quan hệ giữa góc nghiêng của mái dốc, chiều cao, các chế độ phá hoại và hệ số an toàn [5] đã cho thấy cả hai phương pháp FEM và LEM đều cho kết quả Fs nhất quán khi áp dụng cho các tổ hợp khác nhau về hình học và đặc tính vật liệu. Tuy nhiên, nhờ khả năng mô phỏng ứng xử ứng suất và biến dạng của đất, FEM tỏ ra ưu việt, đặc biệt khi phân

tích các mái dốc phức tạp hoặc trong điều kiện không thoát nước. Ngược lại, các phân tích nhanh chóng và đơn giản thường phù hợp hơn với LEM, nhờ vào khả năng tính toán trực tiếp dựa trên nguyên lý cân bằng tĩnh lực. Điều này cho thấy cả hai phương pháp đều có vai trò bổ trợ lẫn nhau trong việc phân tích và thiết kế để đảm bảo sự ổn định của mái dốc. Ngoài ra chiều cao, loại đất, và góc nghiêng β là những yếu tố chính ảnh hưởng đến độ ổn định của mái dốc. Theo nghiên cứu [6] đã chỉ ra rằng khi chiều cao và độ dốc của mái giảm, hệ số an toàn (Fs) có xu hướng gia tăng. Điều này cho thấy rằng một trong những giải pháp hữu hiệu để cải thiện sự ổn định của mái dốc chính là giảm độ dốc. Thực tế từ các dự án, chẳng hạn như việc nâng cấp tuyến đường Arba Minch-Chencha, đã minh chứng rằng sự ổn định của mái dốc được cải thiện rõ rệt khi giảm hàm lượng hạt mịn trong đất. Nguyên nhân là do đất chứa ít nước hơn và ít chịu tác động từ áp lực nước lỗ rỗng. Ngược lại, khi độ ẩm trong đất tăng cao, hệ số an toàn giảm đáng kể, làm gia tăng nguy cơ mất ổn định và khả năng xảy ra phá hoại [7].

Các nghiên cứu đã thực hiện cho thấy rằng hình học, địa chất của mái dốc cùng với góc nghiêng có ảnh hưởng quan trọng đến sự ổn định của chúng. Việc sử dụng đồng thời cả FEM và LEM không chỉ cung cấp góc nhìn toàn diện hơn về mức độ ổn định mà còn hỗ trợ tìm ra các giải pháp thiết kế hiệu quả, phù hợp với các điều kiện cụ thể trong thực tế. Mặc dù FEM và LEM đã được áp dụng rộng rãi trong nhiều nghiên cứu nhằm đánh giá sự ổn định của mái dốc đất, nhưng vẫn còn thiếu những nghiên cứu chi tiết đánh giá sự biến động của hệ số an toàn (Fs) theo sự thay đổi của góc nghiêng mái dốc. Do đó, nghiên cứu này tập trung so sánh giá trị Fs thu được từ FEM và các phương pháp LEM, bao gồm Bishop (BM), Janbu (JM), và Fellenius (FM), ứng với các góc nghiêng khác nhau của mái dốc. Mục tiêu của bài báo này là phân tích và so sánh giữa FEM và LEM trong việc ước tính hệ số an toàn của mái dốc dưới các điều kiện góc nghiêng thay đổi.

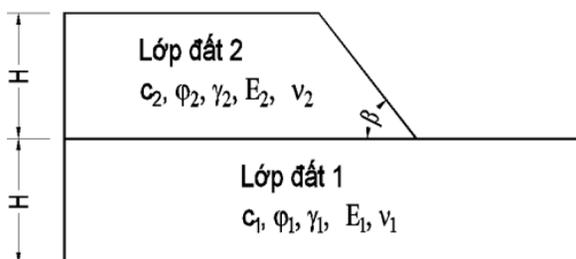
2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình phân tích ổn định mái dốc

Nghiên cứu này thực hiện việc đánh giá hệ số ổn định của mái dốc trên nền đất gồm hai lớp đất với $H = 5\text{m}$ như minh họa ở Hình 1, với mục tiêu phân tích tác động của các góc nghiêng mái dốc khác nhau đến sự ổn định của hệ thống. Các góc nghiêng mái dốc được lựa chọn để khảo sát, bao gồm $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ và 75° , nhằm đánh giá sự thay đổi của hệ số ổn định theo từng điều kiện góc dốc. Để thực hiện các tính toán ổn định mái dốc, nghiên cứu áp dụng hai phương pháp phân tích chủ yếu là phương pháp FEM và phương pháp LEM. Xem xét phân tích độ ổn định của mái dốc trên nền đất đắp, với giả thuyết rằng đất nền hoàn toàn thoát nước (trạng thái “Drained”). Trong bài toán này, mực nước ngầm và tải trọng phía trên lớp đất đắp không được xét đến, nhằm tập trung phân tích ảnh hưởng của yếu tố hình học lên mái dốc. Trong mô hình nghiên cứu, lớp đất nền được giả định là đất cát, điều này phản ánh các điều kiện thực tế của địa chất trong việc phân tích sự ổn định của mái dốc, giúp các kết quả tính toán có tính ứng dụng cao và chính xác hơn trong các dự án thực tế. Các thông số địa chất sử dụng trong nghiên cứu được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Thông số địa chất được sử dụng trong nghiên cứu

Lớp đất	Dung trọng tự nhiên, γ kN/m^3	Lực dính, C kN/m^2	Góc ma sát trong, φ (độ)	Mô đun đàn hồi, E kN/m^2	Hệ số Poisson, ν
1	18	1	30	13000	0.3
2	19,6	29.2	12.39	8400	0,3



Hình 1. Mô hình phân tích ổn định mái dốc

2.2. Phương pháp cân bằng giới hạn

Phương pháp LEM xác định sức kháng cắt dọc theo bề mặt trượt bằng cách sử dụng tiêu chuẩn phá hoại Mohr-Coulomb. Hệ số an toàn (F_s) được xác định bằng cách tính tỷ lệ giữa sức kháng cắt khả dụng, phản ánh khả năng chống lại sự trượt của đất dọc theo bề mặt phá hoại, và ứng suất cắt đã huy động, đại diện cho lực trượt đã được kích hoạt dưới tác động của các yếu tố bên ngoài.

Trong phân tích bằng phương pháp LEM, khối trượt được chia thành các lát cắt, và các phương trình cân bằng lực hoặc mô men được sử dụng để tính toán. Các phương pháp LEM, bao gồm các phương pháp cơ bản như Fellenius [8], Bishop [9], Janbu [10], cùng với các cải tiến sau này của các nhà nghiên cứu như Morgenstern-Price, Spencer, và Sarma, cung cấp các cách tiếp cận khác nhau để xác định lực tương tác giữa các lát cắt, với mỗi phương pháp áp dụng các giả định riêng biệt về cơ chế phá hoại và phân bố lực [11].

2.3. Phương pháp phần tử hữu hạn

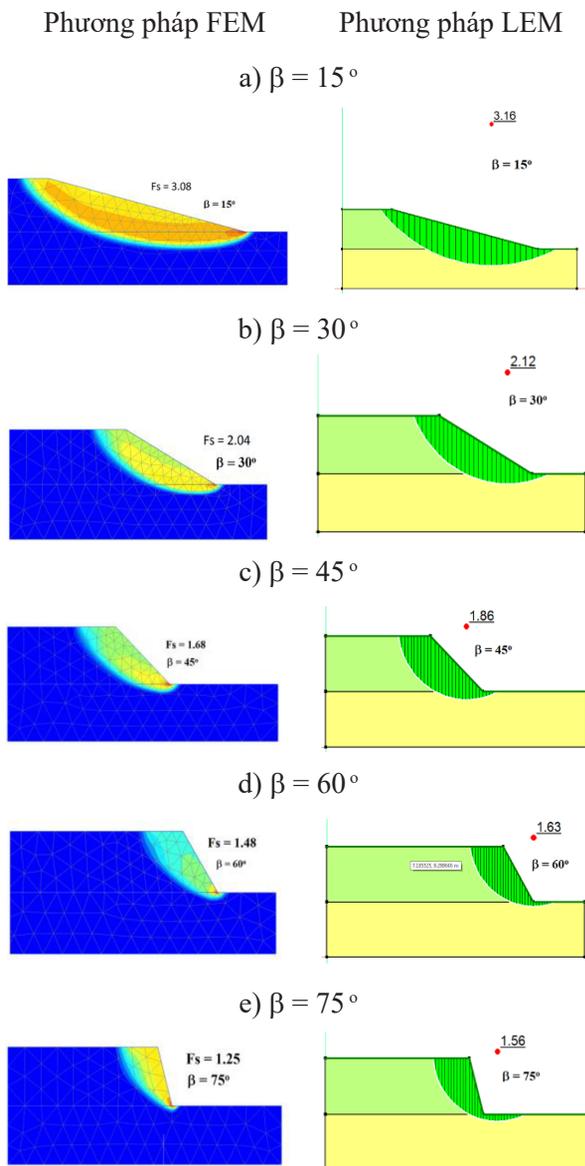
Mô hình hóa số được coi là công cụ mạnh mẽ trong giải quyết các vấn đề kỹ thuật, đặc biệt trong phân tích địa kỹ thuật. Hai phương pháp số phổ biến nhất là phương pháp FEM và phương pháp sai phân hữu hạn (FDM). Trong đó phương pháp FEM được trình bày trong bài viết này áp dụng quan hệ ứng suất, biến dạng của đất để mô phỏng ổn định mái dốc.

Khác với phương pháp LEM, phương pháp FEM không giả định trước hình dạng và vị trí của bề mặt phá hoại, cho phép đánh giá toàn diện hơn. Ngoài ra FEM không yêu cầu chia lát cắt hay giả định lực tương tác giữa các lát, duy trì cân bằng toàn cục đến khi xảy ra phá hoại và có thể theo dõi quá trình phá hoại dẫn đến khi toàn bộ mái dốc bị trượt [12].

Phương pháp FEM chia mô hình thành các phần tử lưới, tính toán ứng suất và biến dạng dựa trên các định luật vật liệu. Phá hoại xảy ra khi sức kháng cắt của đất không còn chịu được ứng suất cắt. F_s được tính thông qua kỹ thuật giảm sức kháng cắt (c - φ reduction) bằng cách giảm dần các thông số sức kháng của đất đến khi xảy ra phá hoại.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả tính toán hệ số an toàn (F_s) được thu thập từ các phương pháp phân tích FEM và LEM được trình bày chi tiết trong Hình 2, Hình 3 và Bảng 2. Dựa trên các dữ liệu này, ta có thể nhận thấy rằng các giá trị F_s từ hai phương pháp này khá tương đồng, mặc dù vẫn tồn tại một số khác biệt nhỏ. Cụ thể, từ Bảng 2, phương pháp LEM cho thấy giá trị F_s cao hơn so với FEM, điều này hoàn toàn phù hợp với các nghiên cứu trước đây của Habtemari [7], trong đó ông đã chỉ ra rằng phương pháp LEM thường đánh giá mức độ ổn định của mái dốc cao hơn so với phương pháp phần tử hữu hạn.

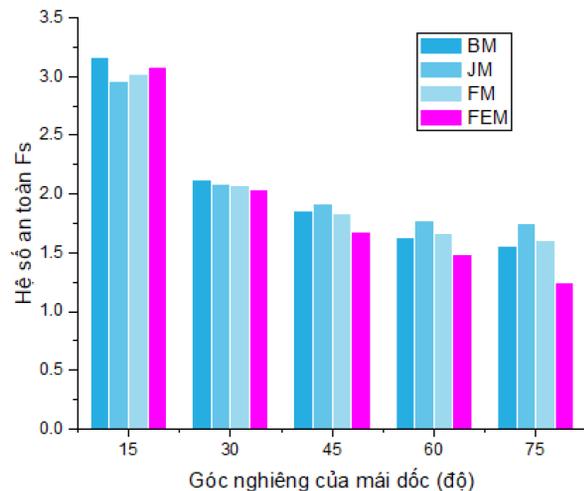


Hình 2. Hệ số ổn định F_s với $\beta = (15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ)$

Bảng 2. Kết quả F_s giữa FEM và LEM ở các độ dốc khác nhau

Góc β (độ)	Hệ số an toàn F_s			
	LEM			FEM
	BM	JM	FM	
15	3,16	2,96	3,02	3,08
30	2,12	2,09	2,07	2,04
45	1,86	1,92	1,83	1,68
60	1,63	1,77	1,66	1,48
75	1,56	1,75	1,61	1,25

Kết quả tính toán hệ số F_s được trình bày trong Bảng 2 và Hình 3 cho thấy một xu hướng giảm dần của giá trị F_s khi góc nghiêng của mái dốc từ 15° đến 75° tăng lên. Sự thay đổi này phản ánh rằng, khi góc dốc càng lớn, sự ổn định của mái dốc càng giảm do tác động mạnh mẽ hơn của các lực gây trượt, dẫn đến khả năng xảy ra sự cố cao hơn. Cụ thể, khi độ dốc gia tăng, hệ số F_s giảm, làm gia tăng nguy cơ trượt lở và phá hoại mái dốc, điều này nhấn mạnh mối liên hệ trực tiếp giữa góc dốc và khả năng ổn định của mái dốc [13].



BM - Công thức Bishop; JM – Công thức Janbu;
 FM – Công thức Fellenius

Hình 3. So sánh F_s giữa FEM và LEM ở các độ dốc khác nhau

Bên cạnh đó, kết quả hệ số an toàn (F_s) trong Bảng 2 cho thấy sự khác biệt về biên độ giữa các phương pháp phân tích FEM và LEM. Ở các góc dốc thấp (15° và 30°), biên

độ chênh lệch F_s giữa các phương pháp là khá nhỏ, dao động trong khoảng 0.1 – 0.2, cho thấy sự tương đồng trong kết quả giữa FEM và LEM. Tuy nhiên, khi góc dốc tăng (45° , 60° , 75°), sự khác biệt giữa các phương pháp phân tích trở nên rõ rệt hơn. Biên độ chênh lệch F_s tăng lên đặc biệt là tại góc dốc 60° và 75° , với biên độ chênh lệch đạt tới 0,29 và 0,50.

Bảng 2 cũng chỉ ra sự khác biệt rõ rệt giữa các phương pháp phân tích FEM và LEM về biên độ hệ số F_s . Trong trường hợp góc dốc thấp (15° và 30°), biên độ chênh lệch giữa hai phương pháp này tương đối nhỏ, dao động trong khoảng 0,1 – 0,2, điều này cho thấy sự tương đồng đáng kể trong kết quả tính toán của hai phương pháp. Tuy nhiên, sự khác biệt này trở nên rõ rệt hơn khi góc dốc tăng lên (45° , 60° và 75°). Ở các góc dốc lớn hơn, biên độ chênh lệch F_s giữa FEM và LEM tăng lên đáng kể, đạt 0,29 và 0,50 tại góc dốc 60° và 75° , tương ứng. Kết quả này chỉ ra rằng phương pháp FEM thường cho ra hệ số an toàn thấp hơn so với phương pháp LEM, điều này phản ánh sự đánh giá bảo thủ hơn của FEM trong việc phân tích sự ổn định của mái dốc, đặc biệt là ở các góc nghiêng lớn. Sự khác biệt này có thể được giải thích bởi khả năng tính toán ứng suất và biến dạng vật liệu của phương pháp FEM, giúp phản ánh chính xác hơn sự thay đổi ổn định của mái dốc dưới tác động của các lực. Do đó, FEM có xu hướng phản ứng linh hoạt và chi tiết hơn với sự thay đổi ổn định khi góc dốc gia tăng [14].

Trong khi đó, các phương pháp cân bằng giới hạn (LEM) như Bishop, Janbu và Fellenius thường đưa ra kết quả F_s cao hơn, đặc biệt là đối với các góc dốc lớn, điều này phản ánh sự đánh giá ổn định cao hơn trong các phân tích của LEM. Các phương pháp LEM có xu hướng cung cấp cái nhìn tổng thể về sự ổn định của mái dốc mà không xét đến sự biến dạng của vật liệu, do đó, chúng thích hợp hơn khi áp dụng cho các tình huống mà các yếu tố biến dạng vật liệu không quá quan trọng. Tuy nhiên, trong các khu vực mái dốc có đặc điểm cục bộ hoặc nơi có nguy cơ trượt lở cao, các phương pháp LEM có thể không

phản ánh đầy đủ các yếu tố tác động đến sự ổn định của mái dốc [15].

Sự thay đổi biên độ giữa các giá trị F_s được tính toán từ FEM và LEM không chỉ phản ánh sự khác biệt trong các phương pháp phân tích, mà còn làm rõ sự phù hợp của từng phương pháp với các điều kiện đặc thù của mái dốc. Cụ thể, trong các trường hợp có góc dốc nhỏ và nguy cơ trượt lở thấp, LEM có thể cung cấp một cái nhìn đáng tin cậy và an toàn hơn, giúp đưa ra các giải pháp thiết kế hiệu quả. Tuy nhiên, đối với các mái dốc có góc dốc lớn và nguy cơ trượt lở cao, việc sử dụng kết hợp cả hai phương pháp sẽ cho phép có được một cái nhìn toàn diện và chính xác hơn về khả năng ổn định của mái dốc. Việc áp dụng kết hợp này giúp đạt được những đánh giá chính xác hơn về sự ổn định của mái dốc, đặc biệt là trong các tình huống yêu cầu phân tích chi tiết hơn để đảm bảo an toàn tối đa [15].

4. KẾT LUẬN

Kết luận từ nghiên cứu này chỉ ra rằng việc sử dụng phương pháp FEM và LEM để đánh giá sự ổn định của mái dốc mang lại những kết quả tương đối đồng nhất, mặc dù có sự khác biệt nhất định giữa hai phương pháp, đặc biệt là khi góc dốc của mái dốc tăng. Phương pháp FEM cho thấy xu hướng đánh giá thận trọng hơn so với phương pháp LEM, với các giá trị hệ số an toàn (F_s) thường thấp hơn, điều này phản ánh khả năng tính toán chính xác hơn các ứng suất và biến dạng vật liệu trong điều kiện thay đổi góc dốc. Ngược lại, các phương pháp LEM, mặc dù không xét đến biến dạng vật liệu, lại cung cấp cái nhìn tổng quan ổn định hơn và thường đưa ra giá trị F_s cao hơn, đặc biệt trong các trường hợp có góc dốc thấp.

Các kết quả cũng cho thấy rằng sự khác biệt giữa FEM và LEM trở nên rõ rệt hơn khi góc dốc của mái dốc tăng lên, đặc biệt là ở các góc dốc lớn (60° và 75°), nơi có sự gia tăng biên độ chênh lệch giữa hai phương pháp. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc lựa chọn phương pháp phù hợp với từng tình huống cụ thể, đặc biệt khi đối diện với các mái dốc có góc nghiêng cao hoặc nguy cơ trượt lở lớn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. G. Salih, “Stability Analysis of Residual Soil Slope Model by Numerical Modeling Using FEM Against LEM,” *Second Int. Conf. Geotech. Eng.*, vol. 856, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/856/1/012046.
- [2] N. M. Saim and A. Kasa, “Comparative Analysis of Slope Stability using Finite Element Method (FEM) and Limit Equilibrium Method (LEM),” *Eng. Environ. Sci. Geol.*, 2023, doi: DOI: 10.1109/ICSGRC57744.2023.10215453.
- [3] S. Senapati and S. Senapati, “Comparison of LEM and FEM Based Solution for Slope Stability Analysis Using Soilworks,” *Lect. Notes Civ. Eng.*, vol. 124 LNCE, pp. 341–350, 2021, doi: 10.1007/978-981-33-4590-4_12.
- [4] S. Sravya, A. Das, K. Jadda, and D. Gundavaram, “2D Analysis of Slope Stability Using Limit Equilibrium Analysis and Finite Element Analysis,” *Lect. Notes Civ. Eng.*, vol. 449, pp. 201–213, 2024, doi: 10.1007/978-981-99-8505-0_20.
- [5] Y. M. Missouri, “A Comparison Between Limit Equilibrium and Finite Element Methods for Slope Stability Analysis,” 2018. doi: 10.13140/RG.2.2.16932.53124.
- [6] S. Kumar, S. S. Choudhary, and A. Burman, “The effect of slope height and angle on the safety factor and modes of failure of 3D slopes analysis using limit equilibrium method,” *Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci.*, 2023, doi: 10.1186/s43088-023-00423-3.
- [7] B. G. Habtemariam, K. B. Shirago, and D. D. Dirate, “Effects of Soil Properties and Slope Angle on Deformation and Stability of Cut Slopes,” *Adv. Civ. Eng.*, 2022, doi: 10.1155/2022/4882095.
- [8] W. Fellenius, “Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen,” *Ernst & Sohn, Berlin*, 1927.
- [9] A. . Bishop, “The Use of Slip Surface in The Stability of Analysis Slopes,” *Geotech. 5*, pp. 7–17, 1955.
- [10] J. N, “N. Janbu, Application of composite slip surfaces for stability.pdf,” *Eur. Conferr. Stab. Earth Slopes*, vol. Stockholm, pp. 43–49, 1955.
- [11] J. M. Duncan, “State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes,” *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 122, no. 7. pp. 577–596, 1996. doi: 10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:7(577).
- [12] Vinod.B.R, P. Shivananda, S. R, and B. M. B, “Some of Limit Equilibrium Method and Finite Element Method based Software are used in Slope Stability Analysis,” *Int. J. Appl. or Innov. Eng. Manag.*, vol. 6, no. 9, 2017.
- [13] T. K. Nian, G. Q. Chen, S. S. Wan, and M. T. Luan, “Non-convergence criterion on slope stability FE analysis by strength reduction method,” *J. Converg. Inf. Technol.*, vol. 6, no. 5, 2011.
- [14] M. N. Bagaskoro, R. I. Shopian, and A. Ramadian, “Stable Slope Design Based On Limit Equilibrium Method (Lem) And Finite Element Method (Fem) At Pit X, Lahat, South Sumatra.” 2024. doi: 10.24198/gsg.v7i3.53006.
- [15] Z. M. Ghazaly, M. A. Rahim, K. A. C. Jee, N. F. Isa, and L. A. Sofri, “Landslide Simulation Using Limit Equilibrium And Finite Element Method,” *Mater. Sci. Forum*, 857, 555–559, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.857.555