

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP GIẢM CƯỜNG ĐỘ CẮT TRONG NGHIÊN CỨU VÀ XÁC ĐỊNH VÙNG BIẾN DẠNG CỦA MÁI DỐC

Bùi Văn Phòng^{1,*}, Nguyễn Văn Hoàng², Đặng Thị Huyền¹, Nguyễn Thanh Bình¹, Ngô Xuân Đắc¹

¹Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản, 67 Chiến Thắng, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại học Tổng hợp Warsaw, Krakowskie Przedmieście 26/28, Warsaw, Ba Lan

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 05/9/2025

Ngày nhận bài sửa: 10/10/2025

Ngày chấp nhận đăng: 15/10/2025

^{1,*}Tác giả liên hệ:

Email: buivanphong.tdc@gmail.com

TÓM TẮT

Quá trình thay đổi giá trị thông số cường độ chống cắt của đất tạo nên vùng biến dạng dẻo của mái dốc. Tại trạng thái sau biến dạng, vật liệu sẽ thay đổi và không còn ở trạng thái nguyên dạng như trước, các liên kết trong vật liệu bị phá vỡ và kết cấu bị phá hủy. Trong bài báo này, phương pháp giảm cường độ cắt được sử dụng để xác định cơ chế hình thành, quá trình phát triển, khả năng dịch chuyển cũng như vị trí chính xác của vùng biến dạng dẻo trên bề mặt trượt của mái dốc. Mô hình mái dốc 3D được xây dựng, phân tích, tính toán hệ số an toàn cũng như xác định vùng biến dạng dẻo gây nguy cơ trượt lở mái dốc bằng phần mềm Midas GTS NX tích hợp phương pháp giảm sức chống cắt.

Từ khóa: Biến dạng dẻo, phương pháp giảm cường độ cắt, mô hình hóa, hệ số an toàn.

@ Hội Khoa học và Công nghệ Mỏ Việt Nam

1. MỞ ĐẦU

Đánh giá độ ổn định của mái dốc là một nghiên cứu quan trọng được tiến hành để đánh giá độ an toàn của cả mái dốc tự nhiên và nhân tạo. Bản chất của quá trình trượt lở là khi sức chống cắt của đất đá trên sườn dốc nhỏ hơn lực gây trượt, mái dốc sẽ mất ổn định, khối đất đá sẽ dịch chuyển xuống dưới theo hướng của trọng lực. Đây là một tai biến rất phức tạp do sự tương tác của các yếu tố như đặc tính cơ lý của đất đá [1], điều kiện mưa [2, 3] và yếu tố con người.

Một số phương pháp mô phỏng và mô hình hóa mái dốc được đề xuất trong việc đánh giá biến dạng của mái dốc. Chẳng hạn như phương pháp cân bằng giới hạn (Limit Equilibrium Method - LEM) [4, 5, 6], phương pháp giảm cường độ cắt (Strength Reduction Method - SRM) [7], phương pháp điểm vật liệu (Material Point Method - MPM) [8].

Trong những nghiên cứu trước đây, một số công trình nghiên cứu cơ bản được thực hiện bằng phương pháp cân bằng giới hạn (LEM). Phương

pháp LEM được đề xuất bởi Fellenius [9], sau đó được nhiều tác giả khác phát triển như Bishop [10], Morgenstern và Price [11], Spencer [12], Janbu [13]. Phương pháp LEM dựa trên nhu cầu giả định mặt trượt trước. Trong giả định này, quá trình phân tích ổn định mái dốc được tiến hành bằng cách chia khối đất thành các mảnh nhỏ (slices), có tính tới sự ảnh hưởng của lực trượt giữa 2 mảnh cạnh nhau. Cuối cùng, hình dạng hoặc vị trí của cơ chế phá hoại quan trọng phải được xác định, điều này làm việc tính toán trở lên phức tạp hơn.

Bên cạnh đó, với sự phát triển nhanh chóng trong kỹ thuật tính toán cùng với các công cụ tính toán, một số phương pháp mới được phát triển và sử dụng phổ biến hơn trong việc tính toán ổn định mái dốc nói riêng và phân tích các vấn đề địa kỹ thuật nói chung. Phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM) hiện đang được coi là một trong những phương pháp tối ưu được ứng dụng nhiều nhất. Khác với LEM, mô hình tính toán của FEM được chia lưới thành các phần tử tam giác với các kích thước khác nhau thỏa mãn điều

kiện biến dạng phẳng. Từ đó, có tính đến quan hệ ứng suất biến dạng của đất và đồng thời được sử dụng để tính toán ứng suất, biến dạng, áp lực lỗ rỗng và các đặc tính khác của vật liệu trong quá trình thi công, quan trắc.

Phương pháp giảm cường độ (SRM), còn được gọi là phương pháp giảm cường độ cắt (SSRM) và là một phần của phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Phương pháp này được Dawson và cộng sự sử dụng [14]. Phương pháp này đánh giá độ ổn định của mái dốc bằng cách giảm cường độ cắt của đất trong phân tích phần tử hữu hạn đàn hồi-dẻo cho đến khi mái dốc trở nên không ổn định, biểu thị không đáp ứng được mức độ an toàn. Khi so sánh SRM với LEM, Sun G và cộng sự [15] đã chỉ ra một số ưu điểm như: đầu tiên, không có yêu cầu về kích thước mặt trượt, giả định hình dạng và phân bố lực cắt giữa các lát cắt. Thứ hai, có thể tính toán được độ dốc hình học phức tạp (2D và 3D) và nhiều lớp vật liệu phức tạp. Cuối cùng, SRM sẽ tính đến sự xuất hiện của một số yếu tố ảnh hưởng đến độ ổn định của độ dốc, tương tự như nước ngầm, rò rỉ, các yếu tố động. Kết hợp với sức mạnh tính toán của hệ thống máy tính cũng như các phần mềm địa kỹ thuật ngày nay, kết quả tính toán có mức độ tin cậy và áp dụng được cho mọi đối tượng địa chất phức tạp hơn các phương pháp truyền thống.

Trong nghiên cứu này, tiêu chuẩn Mohr-Coulomb được áp dụng cùng với phương pháp giảm cường độ, trong đó các thông số vật liệu như lực dính (c), góc ma sát trong (φ) giảm dần cho đến khi cân bằng cơ học bị phá vỡ. Tại thời điểm này, cường độ cắt của đất giảm do các thông số vật liệu giảm. Từ đó, mái dốc trở nên mất ổn định do sự kết hợp của các thông số vật liệu, các yếu tố động lực học và các điều kiện biên,...

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

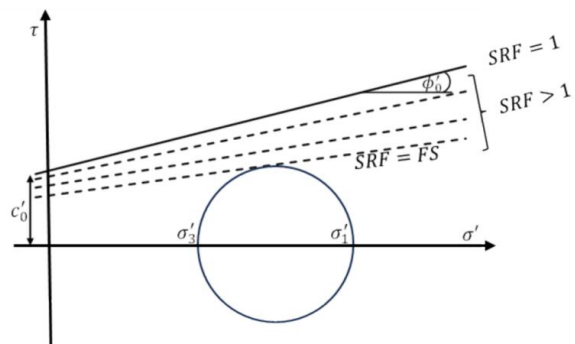
Các thông số cường độ chống cắt của vật liệu như lực kết dính (c), góc ma sát trong (φ) đóng vai trò quan trọng trong việc tính toán ổn định mái dốc. Theo đó, giá trị của các thông số này thay đổi tùy theo trạng thái của vật liệu trong các điều kiện khác nhau. Ở trạng thái ổn định, cường độ chống cắt ở mức cực đại, cao hơn đáng kể so với trạng thái sau biến dạng như là các hiện tượng sạt lở, xói lở hoặc mất ổn định mái dốc do mưa. Tại trạng thái sau biến dạng, vật liệu sẽ thay đổi và không còn ở trạng thái nguyên dạng như trước, các liên kết trong vật liệu bị phá vỡ và kết cấu của mái dốc bị phá hủy. Tại thời điểm này, lực kết dính (c') và góc ma sát trong (φ') nhỏ hơn đáng kể so với trạng thái cực

đại và có xu hướng giảm dần theo thời gian, dẫn đến cường độ chống cắt thấp hơn. Từ những nghiên cứu trên, Zienkiewicz và cộng sự (1975) đã đề xuất khái niệm về hệ số giảm cường độ cắt (SRF) trong phân tích phần tử hữu hạn đàn hồi dẻo. Trong đề xuất này, thông số cường độ giảm dần cho tới khi mái dốc bị phá hoại. Khi đó, SRF được xác định bằng tỷ số giữa cường độ cắt cực đại của đất mái dốc với ứng suất cắt thực tế do tải trọng bên ngoài tác dụng lên mái dốc. Trong phương pháp này, thông số cường độ cắt thực tế của vật liệu được giảm đi bởi SRF.

$$c' = \frac{c}{SRF} \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan \left(\frac{\varphi}{SRF} \right) \quad (2)$$

Trong đó SRF là hệ số giảm cường độ khi độ dốc ở trạng thái cân bằng; c và c' lần lượt là giá trị lực kết dính trước và sau khi giảm cường độ; và φ và φ' lần lượt là góc ma sát trước và sau khi giảm cường độ.



Hình 1. Mô hình giảm cường độ cắt Mohr-Coulomb [16]

Theo lý thuyết và mô hình giảm cường độ cắt Mohr-Coulomb, ban đầu hệ số giảm cường độ (SRF) được giả định bằng 1,000. Các tham số cường độ chống cắt được giảm dần theo SRF, làm cho trạng thái ứng suất của khối đất dần tiến gần đến vòng tròn phá hoại Mohr-Coulomb (Hình 1). Khi SRF được tăng dần, sẽ xuất hiện một giá trị mà tại đó $SRF = FS$, cho thấy mái dốc đang tiến đến trạng thái phá hoại. Tại thời điểm này, điều kiện cân bằng không còn được thỏa mãn, và mô hình phần tử hữu hạn không hội tụ, biểu hiện cho sự khởi phát của trượt lở giả định.

Trong phương pháp giảm cường độ, giả thiết vật liệu tuân theo tiêu chuẩn chảy dẻo của Mohr-Coulomb được áp dụng theo công thức (3). Hệ số an toàn được tính toán theo phương pháp giảm thông số chống cắt (c , φ reduction). Từ đó, thông qua công cụ tính toán, thiết kế tự động xác định cơ



chế phá hoại nguy hiểm nhất. Vùng biến dạng, dịch chuyển của khối đất được hình thành và xác định thông qua tính toán trên mô hình.

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi) + c \quad (3)$$

Trong đó: τ là ứng suất cắt trên vùng phá hoại; σ_n là ứng suất pháp tuyến hiệu dụng trên mặt phá hoại; c là giá trị lực kết dính của vật liệu; φ là góc ma sát trong của vật liệu

Quá trình phá hủy mái dốc được gây lên bởi nguyên nhân chính là do sự xuất hiện và phát triển của vùng biến dạng. Do đó, cần phải xác định quá trình phát triển dần dần dọc theo toàn bộ mặt trượt cũng như mức độ biến dạng của quá trình chảy dẻo theo từng bước. Từ đó, hiểu được cơ chế hình thành vùng biến dạng, quá trình dẫn tới phá hủy mái dốc và các cơ chế bằng phương pháp động lực học dựa trên phương pháp SRM. Trong nghiên cứu này, vùng biến dạng được tiến hành xác định cùng với kết quả tính toán ổn định mái dốc cho mái dốc 3D. Mô hình tính toán được xây dựng bởi phần mềm Midas GTS NX.

Do đó, phương pháp giảm cường độ cắt được thực hiện theo các bước sau để tối ưu hóa tính toán kết quả:

1. Thiết lập mô hình mái dốc từ dữ liệu thu được thực địa như DEM, địa hình.... Và khởi tạo các thông số cường độ cắt của vật liệu;

2. Hệ số an toàn được tính toán thông qua trường ứng suất ban đầu. Kết quả thu được có thể bao gồm ứng suất, biến dạng và chuyển vị;

3. Sử dụng hệ số an toàn và các chỉ số chảy dẻo để xác định liệu vùng biến dạng ban đầu có đang tiếp tục hình thành và phát triển trong mái dốc

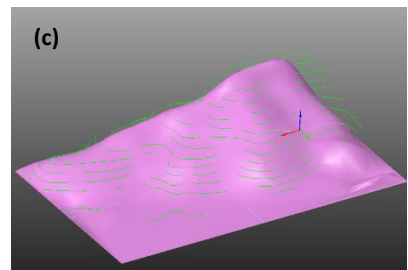
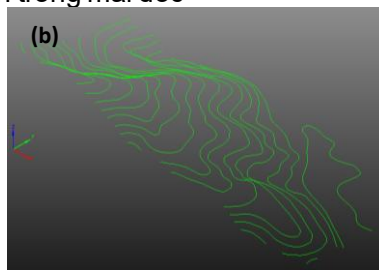
hay không. Nếu không, chuyển về bước 2 và tăng giá trị các thông số cường độ chống cắt cho đến khi vùng biến dạng ban đầu được hình thành. Trong trường hợp vùng biến dạng tiếp tục được hình thành, tiến hành các bước tiếp theo;

4. Trực tiếp giảm giá trị các thông số cường độ cắt (c và $\tan \varphi$) theo công thức (1) và (2) của vùng biến dạng ban đầu. Từ đó thu được thông số mới c' và φ' , vùng biến dạng mới được gọi là vùng biến dạng thứ cấp. Do đó, các điều kiện ứng suất, dịch chuyển của mái dốc được tính toán lại;

5. Tiến hành lặp lại các bước trên cho tới khi vùng biến dạng phát triển, dẫn tới mái dốc mất ổn định. Từ đó, thông số cường độ cắt cuối cùng được xác định và tính toán lại hệ số an toàn cuối cùng của mái dốc.

2.2. Mô hình tính toán

Khu vực nghiên cứu nằm tại Km10+950 trên tuyến Quốc lộ 34, thuộc địa phận xã Yên Định, huyện Bắc Mê, tỉnh Hà Giang. Đây là đoạn tuyến đường đèo, có địa hình dốc và uốn lượn theo sườn núi, nằm cách trung tâm thị trấn Bắc Mê khoảng 50 km về phía Đông Bắc và cách thành phố Hà Giang khoảng 10 km về phía Tây Nam. Khu vực nằm trên sườn dốc hướng Tây Bắc, với độ dốc địa hình trung bình 30–40°, có nơi trên 45°. Khu vực nghiên cứu nằm trong vùng cấu trúc địa chất phức tạp của miền Đông Bắc Việt Nam, với sự phân bố đá gốc có thành phần đá phiến sét sericit, phiến sét đen, đá vôi thuộc hệ tầng Pia Phương.



Hình 2. Kết quả bay đo địa hình

(a). Dữ liệu ảnh bay đo UAV; (b). Dữ liệu địa hình; (c). Xây dựng bề mặt địa hình

Địa hình khu vực được thu thập bởi kết quả bay đo UAV-LiDAR (Hình 2a), các thông số địa hình thu được sau khi giải đoán ảnh bay đo cùng công tác thực địa. Từ những kết quả trên, địa hình sườn dốc được xây dựng cho bề mặt mô hình (Hình 2b, 2c).

Trong mô hình phân tích SRM bằng Midas GTS NX, các thông tin địa chất giúp xây dựng mặt cắt địa chất chính xác, lựa chọn mô hình vật liệu phù hợp gắn các thông số cơ lý của đất đá cho bài toán

mô hình. Kết quả khảo sát hiện trường cho thấy, mặt cắt địa chất tại khu vực nghiên cứu đặc trưng bởi 2 lớp: Lớp sét phong hóa theo đới phong hóa (hình 3a, 3b) và lớp đá gốc phiến sét sericit (hình 3c). Lớp sét phong hóa được phân bố tuyến tính theo độ dốc. Căn cứ thông số địa chất của đá gốc, tham khảo tài liệu địa chất, nhóm nghiên cứu nhận thấy nền đá gốc rất chắc chắn, có đặc tính cơ lý ổn định nên khi tiến hành xây dựng mô hình, thông số



cơ lý của đá gốc được sử dụng trong thư viện vật liệu có sẵn của Midas GTS NX đối với các loại đá gốc. Từ đó, có thể coi mái dốc tại khu vực nghiên

cứu là mái dốc đồng nhất về vật liệu. Các thông số địa chất của mái dốc được liệt kê trong Bảng 1.



Hình 3. Đặc điểm địa chất khu vực nghiên cứu

(a). Đối quang hóa hoàn toàn; (b). Đối quang hóa mạnh; (c). Đá gốc đá phiến sét sericit

Đất sét được mô hình hóa như một vật liệu đàn hồi-dẻo tuyến tính tuân theo điều kiện giới hạn Mohr-Coulomb. Trong Midas GTS NX, tiêu chuẩn phá hủy Mohr-Coulomb được sử dụng với phương pháp giảm cường độ và sử dụng chế độ biến dạng.

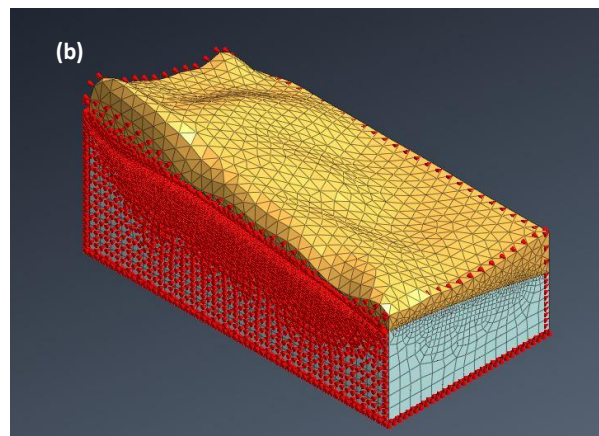
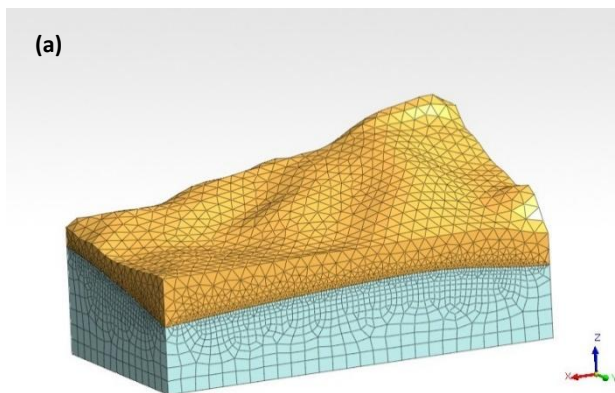
Mái dốc được lý tưởng hóa như một mô hình cấu thành đàn hồi-dẻo hoàn hảo với tiêu chuẩn giới hạn chảy Mohr-Coulomb. Các biến kiểm soát để có được các phương pháp là: bề mặt địa hình, độ dốc, hệ số an toàn, mật độ lưới và thời gian tính toán.

Bảng 1. Tính chất vật liệu của lớp đất sét

Thuộc tính	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
Khối lượng thể tích	γ	kN/m^3	16,677
Mô đun đàn hồi	E	kN/m^2	6504,03
Hệ số Poisson	ν	—	0,3
Góc ma sát trong	ϕ	độ	17
Lực dính	c	kPa	20,6991

Với mô hình tính toán 3D trong MIDAS GTS NX, mô hình đối xứng trong mặt phẳng XZ, các điều kiện biên được áp dụng cho mô hình và cho phép các chuyển dịch theo phương thẳng đứng. Sau khi tiến hành xây dựng mô hình, tiến hành xây dựng lưới tính toán cho phương pháp SRM (mesh). Đối tượng nghiên cứu có kích thước và

diện tích khu vực nghiên cứu lớn, lưới tính toán được chọn với kích thước lớn nhằm đáp ứng với khả năng tính toán của máy tính (coarse mesh size). Mô hình lưới được thể hiện trong hình 4 với các thông số là 223.496 phần tử và 349.982 nút với lưới thô.



Hình 4. Mô hình khu vực nghiên cứu.

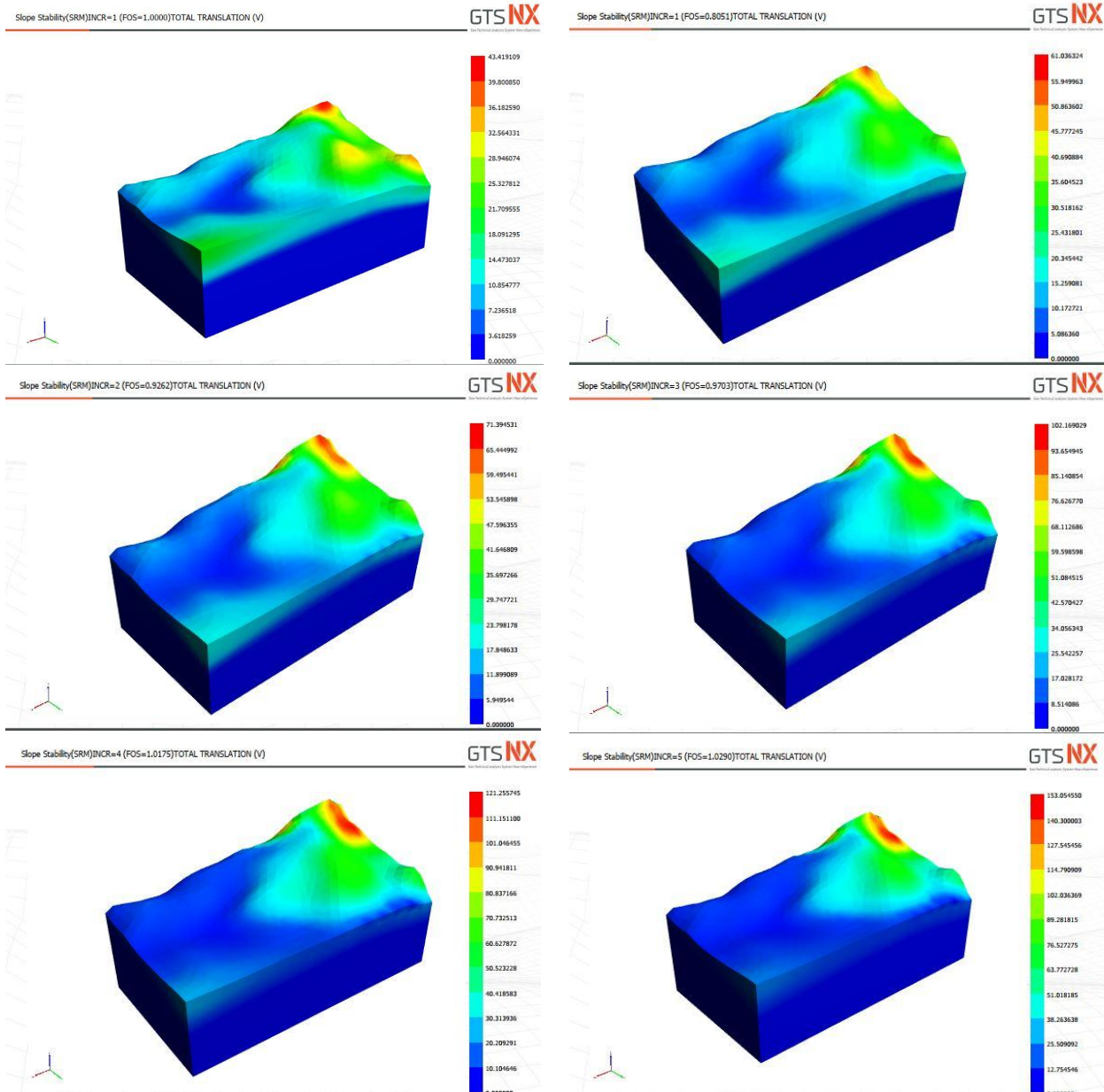
(a). Mô hình lưới; (b) Mô hình điều kiện biên

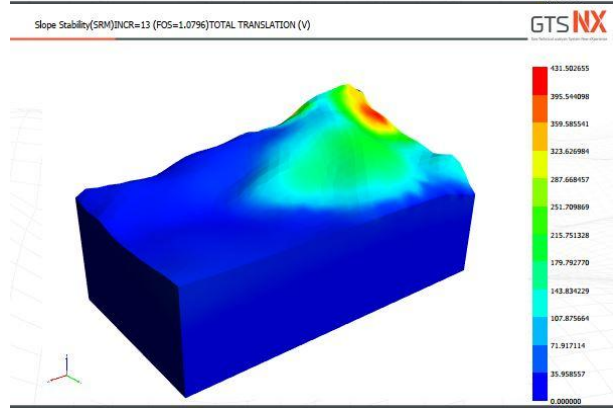
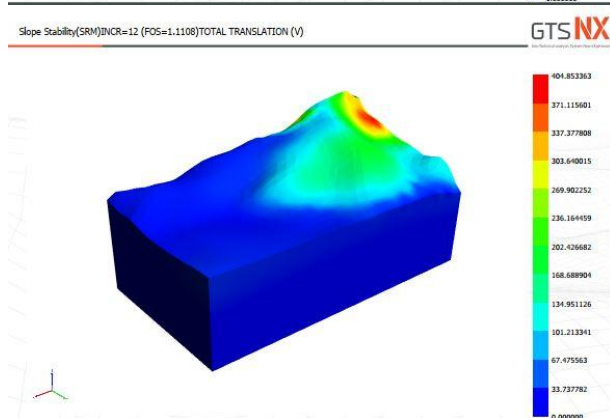
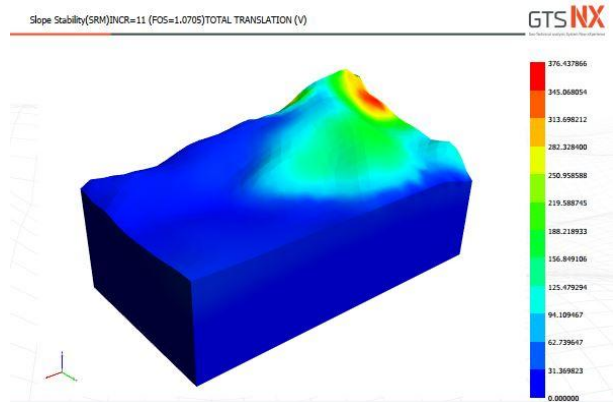
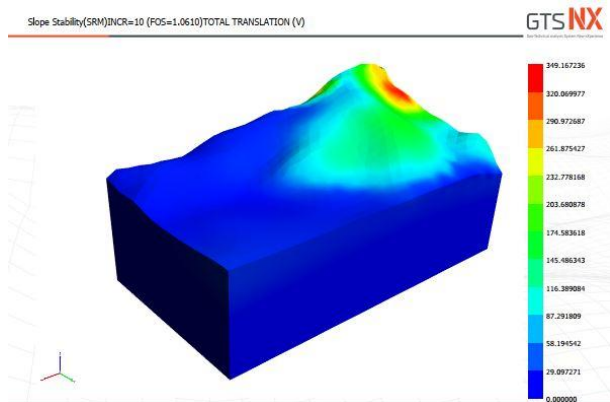
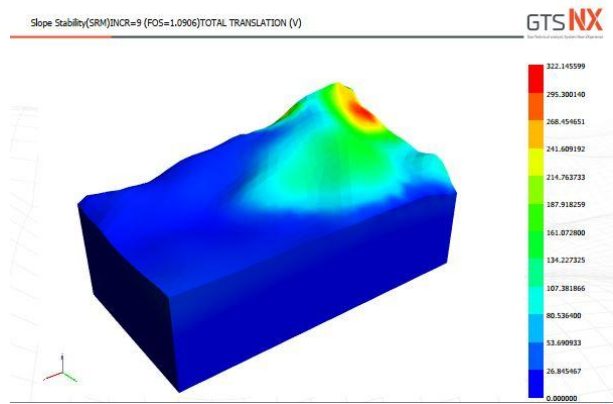
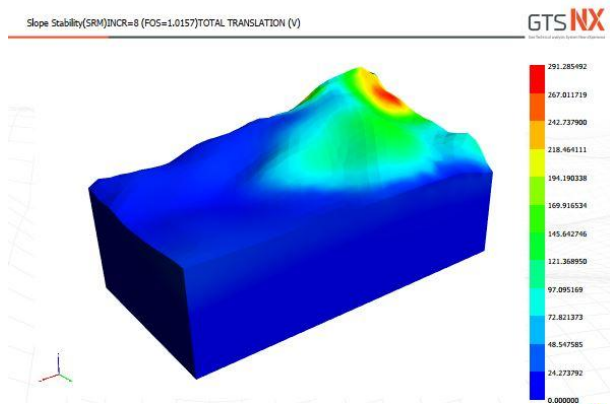
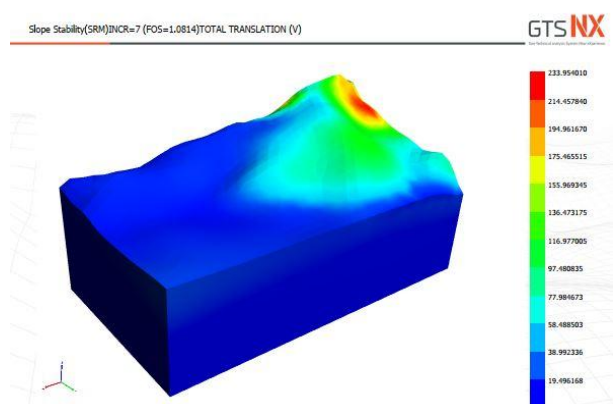
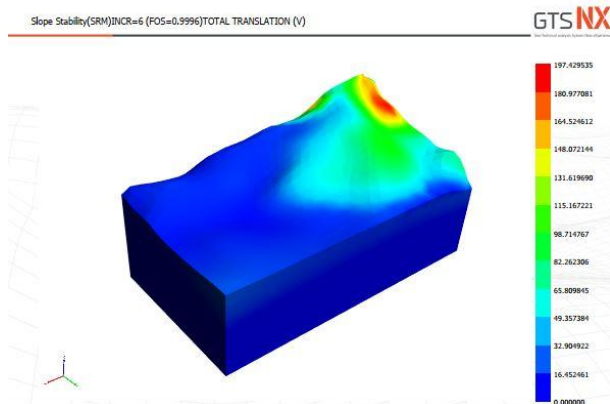


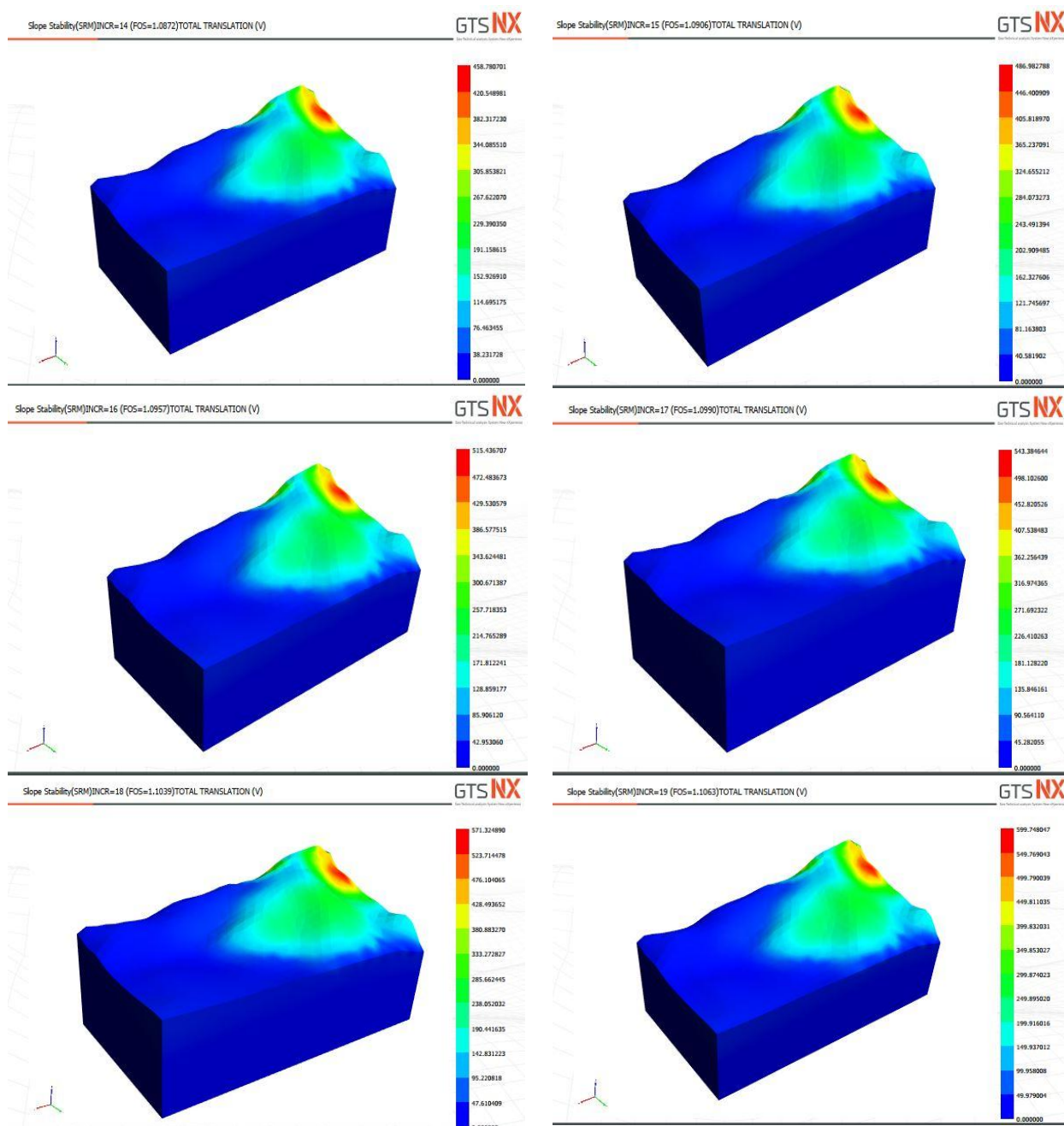
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong quá trình tính toán ổn định mái dốc, phương pháp SRM được áp dụng và tính toán hệ số an toàn ban đầu. Sau đó, Midas GTS NX thực hiện quá trình giảm cường độ cắt được thực hiện trong 19 bước cùng với kết quả hệ số an toàn cuối cùng. Bên cạnh đó, vùng biến dạng xuất hiện, hình thành và phát triển tại các bước giảm cường độ cắt sau cùng. Từ đó, vùng biến dạng được xác định về quy mô cũng như mức độ dịch chuyển của khu vực phá hủy. Trong quá trình tính toán giảm cường độ cắt, dựa trên lý thuyết làm mềm biến dạng, hai

thông số cường độ của vùng giới hạn dẻo là lực dính (c) và tanφ đã được giảm theo các phương trình (1) và (2), sau đó SRM được sử dụng để đánh giá vùng phá hoại. Đối với vùng giới hạn dẻo, tiêu chuẩn giới hạn dẻo Mohr-Coulomb được áp dụng theo công thức (3). Cuối cùng, bằng việc tính toán, phân bố vùng biến dạng dẻo thu được trong quá trình mái dốc bị phá hủy. Việc hình thành và phát triển vùng biến dạng dẻo được phát triển từng bước chậm rãi tại một số bước đầu tiên sau khi tính toán ban đầu và khi các thông số cường độ tiếp tục giảm, vùng biến dạng dẻo mở rộng dọc theo dải đất yếu nhất.







Hình 5. Quá trình xuất hiện và phát triển của vùng biến dạng dẻo với các bước giảm cường độ hệ số an toàn ban đầu (FS=1,000)

Theo lý thuyết của SRM, tại một vài bước giảm thông số cuối cùng khi c và $\tan\phi$ giảm đến một mức độ nhất định, vùng biến dạng dẻo tăng nhanh. Cuối cùng, khi sự phát triển của vùng biến dạng dẻo trong mặt phẳng bề mặt đi qua, mái dốc bị phá hủy. Trong khi đó, hình dạng bề mặt tiềm năng và vị trí của khu vực mái dốc được mô tả để đánh giá độ ổn định của mái dốc dựa trên các hành vi phá hủy tiến triển được thể hiện trong Hình 5.

Quá trình phát triển vùng biến dạng dẻo đi kèm với mức độ dịch chuyển của vật liệu cũng như vùng biến dạng theo phương thẳng đứng. Theo đó, tại mỗi bước nhỏ trong hình 5, có thể nhận thấy phân vùng cụ thể cho từng mức độ dịch chuyển của biến dạng. Khu vực có độ dịch chuyển mạnh nhất được thể hiện bởi màu đỏ, và khu vực có tính ổn định, không dịch chuyển được thể hiện bởi vùng có màu xanh lam. Các giá trị hệ số an toàn cũng như giá trị dịch chuyển lớn nhất được thể hiện trong Bảng 2.



Bảng 2. Giá trị hệ số an toàn và giá trị dịch chuyển tại các bước tính toán

Bước giảm	FS	Vùng dịch chuyển lớn nhất (mm)
1	1,0000	43,42
1	0,8051	61,03
2	0,9262	71,39
3	0,9703	102,17
4	1,0175	121,25
5	1,0290	153,05
6	0,9996	197,43
7	1,0814	233,95
8	1,0157	291,28
9	1,0906	322,15
10	1,0610	349,17
11	1,0705	376,43
12	1,1108	404,85
13	1,0796	431,5
14	1,0796	458,78
15	1,0906	486,98
16	1,0957	515,43
17	1,0990	543,38
18	1,1039	571,32
19	1,1063	599,74
FS	1,10626	

Dựa trên lý thuyết về SRM, FS ban đầu của toàn bộ mái dốc là ổn định và có giá trị $FS = 1,000$, mỗi bước của quá trình giảm cường độ của các thông số thành phần dựa trên phương trình (1) và (2) có thể là một cái nhìn tổng quan về các cơ chế

phá hủy tương ứng với quá trình phá hủy tiến triển. Vùng biến dạng dẻo được hình thành trong giai đoạn đầu tiên với $FS = 1,000$ tại đỉnh mái dốc. Thông qua các bước giảm cường độ, vùng biến dạng dẻo có xu hướng phát triển lớn hơn, có dấu hiệu dịch chuyển xuống dưới theo chiều thẳng đứng. Điều này chứng tỏ rằng, mái dốc có xu hướng không ổn định, vùng biến dạng có nguy cơ phát triển thành khối trượt lở trong thời gian tới.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, phương pháp giảm cường độ cho phép phân tích ổn định mái dốc mà không cần giả định hình dạng của bề mặt bị phá hoại. Từ đó, xác định được cơ chế hình thành và phát triển của vùng biến dạng dẻo, cơ chế phá hoại được xác định thông qua việc khối đất không thể chịu được ứng suất tác dụng. Đồng thời dự đoán được vị trí, quy mô cũng như mức độ dịch chuyển của vùng biến dạng, tạo tiền đề cho việc phân tích ổn định mái dốc tự nhiên trong một khu vực nghiên cứu lớn, điều mà phân tích bằng phương pháp cân bằng tới hạn cùng với phương pháp tính toán ổn định mái dốc 2D khó thực hiện được. Bên cạnh đó, bằng việc phân tích mái dốc 3D dựa trên phương pháp SRM, Midas GTS NX đã chứng minh ưu thế trong việc xác định nguy cơ gây trượt chính xác tại các vị trí bề mặt trượt cụ thể trong một khu vực lớn. Hệ số an toàn được tính toán cẩn thận thông qua các quá trình giảm thông số cường độ. Do đó, kết quả phân tích có độ tin cậy cao hơn □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Zhang, J., Tang, W.H., Zhang, L.M., Huang, H.W. (2012). Characterising geotechnical model uncertainty by hybrid Markov Chain Monte Carlo simulation. *Computers and Geotechnics*, 43, 26–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.02.002>
- [2]. Rahardjo, H.; Leong, E.C.; Rezaur, R.B. (2002). Studies of rainfall-induced slope failures. *Invited Lecture. National Seminar Slope 2000, 27 April 2002, Bandung, Indonesia. In Paulus P Rahardjo (ed.) Slope 2002. Proceedings of the National Seminar, Slope 2002.* 15–29;
- [3]. Bui, D.T., Ho, T.C., Biswajeet, P., Pham, B.T., Nhu, V.H., Inge, R. (2016). GIS-based modeling of rainfall-induced landslides using data mining-based functional trees classifier with AdaBoost, Bagging, and MultiBoost ensemble frameworks. *Environ Earth Sci* 75, 1101. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5919-4>
- [4]. Cheng, Y.M., Lansivaara, T., Wei, W.B. (2007). Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Computers and Geotechnics*, 34(3), 137–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.011>
- [5]. Wei, W.B., Cheng, Y.M., Li, L. (2009). Three-dimensional slope failure analysis by the strength reduction and limit equilibrium methods. *Computers and Geotechnics*, 36(1–2), 70–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.03.003>
- [6]. Sarma, S. (1973). Stability analysis of embankments and slopes. *Geotechnique*, 23 (3), 423–433. DOI: <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000903>
- [7]. Zienkiewicz, O.C., Humpheson, C., Lewis, R.W. (1975). Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics. *Geotechnique*, 25(4), 671–689. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.4.671>



- [8]. Liu, K., Wang, Y., Huang, M., Yuan, W. (2021). Postfailure analysis of slopes by random generalized interpolation material point method. *International Journal of Geomechanics*, 21(3), 04021015. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001953](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001953)
- [9]. Fellenius, W. (1927). Erdstatistische Berechnungen mit Reibung und Kohasion. Ernst, Berlin (in German).
- [10]. Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7–17.
- [11]. Morgenstern, N.R., Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79–93.
- [12]. Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Geotechnique*, 17, 11–26.
- [13]. Janbu, N. (1973). Slope stability computations. *Embankment- Dam Engineering: Casagrande Volume*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1973, pp. 47-86.
- [14]. Dawson, E., Roth, W., Drescher, A. (1999). Slope stability analysis by strength reduction. *Geotechnique*, 49(6), 835–840. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.6.835>
- [15]. Sun, G., Cheng, S., Jiang, W., et al. (2016). A global procedure for stability analysis of slopes based on the Morgenstern-Price assumption and its applications. *Computers and Geotechnics*, 80, 97–106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.06.014>
- [16]. Dyson, A.P., Griffiths, D.V. (2024). An efficient strength reduction method for finite element slope stability analysis. *Computers and Geotechnics*, 174 (5):106593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106593>
- [17]. Châu Trường Linh & Nguyễn Thanh Quang (2021). Phân tích ổn định mái dốc nền đường bằng phương pháp cân bằng giới hạn và phần tử hữu hạn theo tiêu chuẩn Aashto – Lrfd. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, vol. 19, no. 4.2.
- [18]. Nguyễn Quang Hùng & Trần Văn Quân (2020). Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong dự đoán sức chống cắt của đất sau biến dạng. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy Lợi số 60*.

LỜI CẢM ƠN

Nội dung bài báo được hỗ trợ kinh phí từ đề tài khoa học cấp cơ sở của Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản Việt Nam, mã số CS.2025.28

APPLICATION OF THE SHEAR STRENGTH REDUCTION METHOD IN THE STUDY AND IDENTIFICATION OF SLOPE PLASTIC YIELD ZONE

Phong Van Bui*, Hoang Van Nguyen², Huyen Thi Dang¹, Binh Thanh Nguyen¹, Dac Ngo Xuan¹

¹Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources, 67 Chien Thang street, Ha Noi, Vietnam

²University of Warsaw, Krakowskie Przedmieście 26/28, Warsaw, Poland

ARTICLE INFOR

TYPE: Research Article

Received: 05/9/2025

Revised: 10/10/2025

Accepted: 15/10/2025

^{1,*} Corresponding author:

Email: buivanphong.tdc@gmail.com

ABSTRACT

The variation in soil shear strength parameters leads to the formation of a plastic yield zone within a slope. In the post-deformation state, the material properties are altered and no longer remain intact as before; inter-particle bonds are broken, and the structure is destroyed. In this paper, the strength reduction method (SRM) is applied to identify the mechanism of formation, the development process, the potential displacement, as well as the precise location of the plastic yield zone along the slip surface of the slope. A 3D slope model is developed, analyzed, and used to calculate the factor of safety and delineate the plastic yield zone that indicates slope failure. The simulations were performed in Midas GTS NX, which integrates the shear strength reduction technique into its finite element method.

Key word: Plastic yield zone, strength reduction method, modelling, factor of safety

@ Vietnam Mining Science and Technology Association