



PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH MÁI DỐC PHẪNG THEO MÔ HÌNH 3D BẰNG PHƯƠNG PHÁP CÂN BẰNG GIỚI HẠN

Nguyễn Hoàng Giang¹

Tóm tắt: Phân tích ổn định mái dốc thông thường được xét theo bài toán phẳng hai chiều (2D). Tuy nhiên trong một số trường hợp, mô hình 2D không phản ánh hết được sự làm việc của nền và các yếu tố ảnh hưởng khác theo mô hình 3 chiều (3D). Bài báo này trình bày phương pháp phân tích ổn định mái dốc theo mô hình 3D bằng phương pháp cân bằng giới hạn. Dựa trên phương trình cân bằng tĩnh học mô men, một chương trình phần mềm đã được lập ra để phân tích xác định hệ số ổn định của mái dốc 3D theo các dạng mặt trượt khác nhau. Kết quả phân tích từ các mối quan hệ giữa hệ số ổn định với bề rộng cho thấy, hệ số ổn định của mái dốc theo mô hình 3D lớn hơn 20% so với bài toán 2D.

Từ khóa: Hệ số an toàn; mặt trượt nguy hiểm; mái dốc 3D.

Summary: The slope stability is often analyzed by two-dimensional (2D) method. There are cases, however, where a 2D analysis leads to insufficient performance of soil, affected factors to three-dimensional (3D) cases. This research presents a 3D analysis for straight slope by means of limit equilibrium analysis. Based on moment equilibrium mechanism, a computer code was written to determine 3D slope stability. The result of analysis shows that the stability number of 3D is 20% higher than that of 2D.

Keywords: Factor of safety; critical sliding surface; 3D slope.

Nhận ngày 8/6/2015, chỉnh sửa ngày 19/6/2015, chấp nhận đăng 30/9/2015



1. Giới thiệu

Hiện nay, phần lớn các tính toán ổn định mái dốc được tính toán với bài toán 2D và việc tính toán, dự báo độ ổn định của mái dốc có nhiều phương pháp khác nhau. Việc phân tích và lựa chọn phương pháp tính, dạng mặt trượt và hệ số ổn định tương ứng vẫn dựa chủ yếu vào kinh nghiệm chuyên môn của mỗi kỹ sư thực hành thiết kế. Với bài toán phẳng, nhiều phương pháp phân tích hệ số ổn định đã được phát triển và áp dụng khá phổ biến như: Bishop (1), Morgenstern-price (5), Fellenius [4], Leshchinsky [5]. Taylor [10] đưa ra biểu đồ hệ số an toàn $N_s(F_s)$ và vị trí tâm cung trượt nguy hiểm nhất cho mái dốc 2D. Trong các nghiên cứu này, chiều rộng mái dốc đều được giả định là vô hạn và đưa về bài toán 2D. Ngoài ra, phần lớn các nghiên cứu tính toán ổn định mái dốc hiện tại cũng dựa vào tính toán giả định các chỉ số mái dốc mà không dựa vào tính toán với trường hợp thực sự tại thực địa [2, 12]. Nhưng thực tế, các cung trượt dĩ nhiên có bề rộng giới hạn và yếu tố này ảnh hưởng đến độ ổn định của mái dốc [3]. Skempton [9] đã đề xuất hiệu chỉnh hệ số an toàn cho mái dốc 3D dựa vào áp lực đất, chiều sâu cung trượt và bề rộng mái đất.

Trong nghiên cứu này sẽ đưa ra một phương pháp tính toán mới cho mái dốc 3D có kể đến bề rộng mái dốc và ảnh hưởng của nó lên hệ số an toàn. Các hệ số (tỷ số chiều rộng và chiều cao) mới, các biểu đồ mới của tâm trượt, hệ số ổn định 3D theo sự thay đổi bề rộng được xây dựng nhằm đánh giá hệ số an toàn và hình dạng cung trượt tương ứng của mái dốc.

Trong thực tế, khi mái dốc 3D xảy ra sạt trượt thì bề rộng của nó là xác định. Từ bề rộng này, kỹ sư có thể dựa vào các bảng đã xây dựng nhằm kiểm tra lại độ ổn định, cung trượt, tâm trượt và lực kháng cắt của mái dốc đã bị sạt lở. Kết quả của nghiên cứu sẽ giúp kỹ sư đánh giá mái đất 3D bị sạt lở một cách nhanh chóng dựa vào các biểu đồ độ ổn định, tâm trượt và cung trượt 3D được xây dựng thành các bảng sẵn.

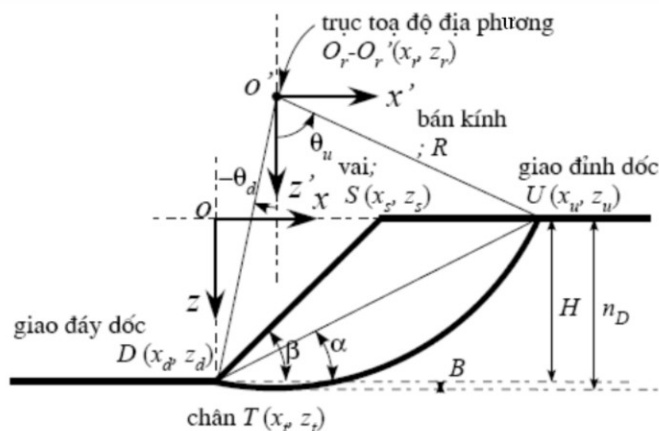
¹TS, Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng. E-mail: giangnh@nuce.edu.vn.



2. Phương pháp tính

2.1 Nguyên lý xác định hệ số ổn định mái dốc

Với một mái dốc, để đánh giá xem nó có ổn định không thì tâm và bán kính của cung trượt sẽ được xác định như Hình 1. Cung trượt nguy hiểm nhất là cung trượt có tỷ số giữa lực kháng cắt dọc theo cung trượt của mái dốc và lực cắt của mái dốc ấy là nhỏ nhất.



Hình 1. Sơ đồ và vị trí của mặt trượt 2D

Vị trí mái dốc được xác định bởi 2 giá trị góc: α và góc tâm trượt $\theta = \theta_u + \theta_d$ như Hình 1.

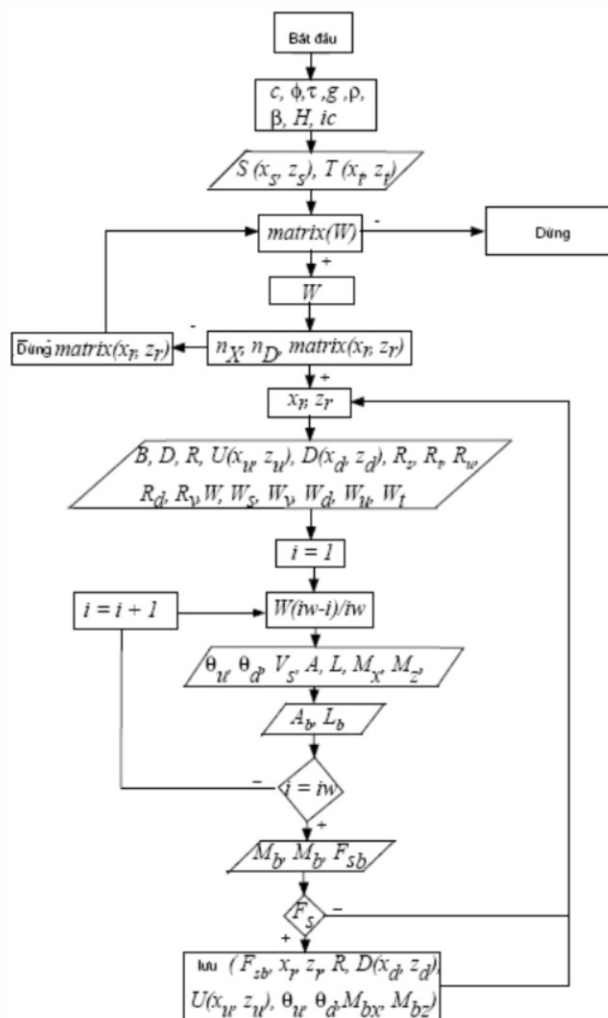
Theo Coulomb: $s = c + \sigma \tan \phi$ (1)

trong đó: s là lực kháng cắt; σ ứng suất tổng; c là lực dính của đất; ϕ là góc ma sát trong của đất; g là gia tốc trọng trường; ρ là khối lượng riêng của khối đất.

Sau khi tâm trượt nguy hiểm nhất được xác định, hệ số an toàn của mái dốc được tính toán. Hệ số an toàn được xác định bằng phương pháp thử. Các cung trượt khác nhau được tính toán với các hệ số an toàn khác nhau. Cung trượt có hệ số an toàn nhỏ nhất chính là cung trượt nguy hiểm nhất.

Chương trình tính toán dựa trên ngôn ngữ Fortran được viết để tính toán và xác định hệ số an toàn, tâm và cung trượt nguy hiểm nhất của mái dốc dựa trên lý thuyết tính toán cân bằng giới hạn và phương pháp lát cắt cho mái đất 2D và 3D.

Hình 2 thể hiện sơ đồ và quy trình tính của chương trình Fortran cho mái dốc.



Hình 2. Sơ đồ và quy trình tính

2.2 Nguyên lý xác định hệ số ổn định mái dốc cho mô hình 3D

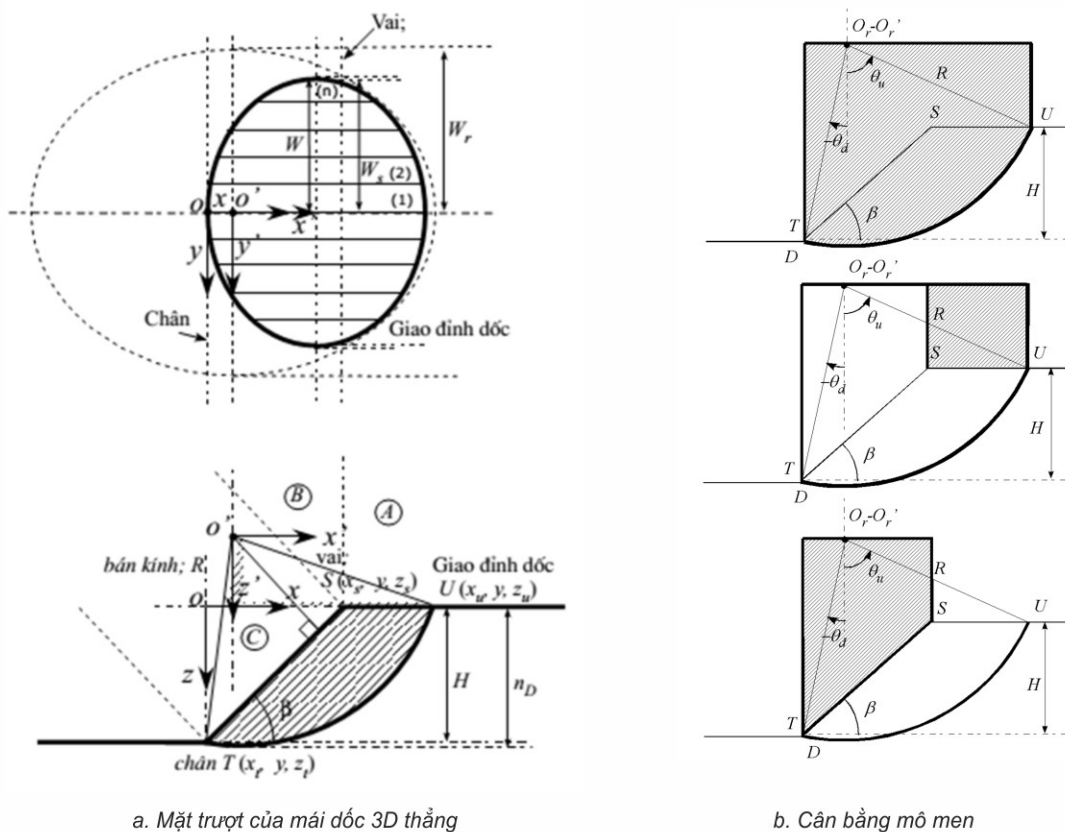
Hệ số an toàn của mái dốc 3D thường cao hơn so với tính toán dạng 2D [3]. Do đó mái dốc 2D thường được sử dụng cho thiết kế là phù hợp. Trường hợp mái dốc 3D thường được sử dụng để kiểm tra lại cho các mái dốc thực tế bị sạt trượt [3]. Trong nghiên cứu này, dựa vào kết quả phân tích 2D theo phương pháp cân bằng giới hạn, phương pháp tính 3D được phát triển cho dạng mái dốc thẳng. Phương pháp cân bằng tĩnh, ở đó khối trượt được chia thành các mảnh. Trên mỗi mảnh, việc tính toán cân bằng ổn định tĩnh sẽ được tiến hành như với 2D. Yếu tố bề rộng (W) được đưa vào tính toán. Trong tính toán 3D, hình dạng mặt trượt nguy hiểm được xác định theo dạng hình elip:

$$\frac{(x-x_r)^2}{R^2} + \frac{y^2}{W^2} + \frac{(z-z_r)^2}{R^2} = 1 \quad (2)$$

trong đó: x_r, z_r là tâm tọa độ địa phương; R là bán kính đường tròn theo mặt phẳng x, z

$$R = \sqrt{(x_d - x_r)^2 + (z_d - z_r)^2} \quad (3)$$

Hình 3 mô tả phương pháp tính theo lát cắt cân bằng mô men tĩnh.



a. Mặt trượt của mái dốc 3D thẳng

b. Cân bằng mô men

Hình 3. Phương pháp phân mảnh

2.2.1 Bài toán tổng quát cho mô hình 2D

Theo Hình 1, các thông số của mặt trượt được xác định như sau:

- Diện tích mặt trượt

$$A = \int_{x'_d}^{x'_u} \int_{z'_{DT}}^{z'_{DU}} dz' dx' + \int_{x'_l}^{x'_s} \int_{z'_{TS}}^{z'_{TU}} dz' dx' + \int_{x'_s}^{x'_u} \int_{z'_{SU}}^{z'_{SU}} dz' dx' \quad (4)$$

- Chiều dài cung trượt

$$L = \int_{\theta_d}^{\theta_u} R d\theta = R(\theta_u - \theta_d) \quad (5)$$

- Phương trình cân bằng mô men theo phương x

$$M_{ax} = \int_{x'_d}^{x'_t} \int_{z'_d}^{z'_{DU}} x' dz' dx' + \int_{x'_t}^{x'_s} \int_{z'_{TS}}^{z'_{DU}} x' dz' dx' + \int_{x'_s}^{x'_u} \int_{z'_{SU}}^{z'_{DU}} x' dz' dx' \quad (6)$$

$$x_g = \frac{M_{ax}}{A} \quad (7)$$

- Phương trình cân bằng mô men theo phương z

$$M_{az} = \int_{x'_d}^{x'_t} \int_{z'_d}^{z'_{DU}} z' dz' dx' + \int_{x'_t}^{x'_s} \int_{z'_{TS}}^{z'_{DU}} z' dz' dx' + \int_{x'_s}^{x'_u} \int_{z'_{SU}}^{z'_{DU}} z' dz' dx' \quad (8)$$

$$z_g = \frac{M_{az}}{A} \quad (9)$$

- Lực gây trượt tương ứng với mặt trượt

$$M_d = \rho g M_{ax} \quad (10)$$

- Lực kháng trượt của mặt trượt

$$M_r = cRL \quad (11)$$

- Hệ số an toàn theo điều kiện cân bằng mô men cho mặt trượt [7]

$$F_s = \frac{M_r}{M_d} = \frac{cRL}{\rho g M_{ax}} = \frac{c}{\rho g H} \frac{HRL}{M_{ax}} \quad (12)$$

- Hệ số ổn định của mặt trượt theo điều kiện cân bằng lực [7]

$$N_s = F_s \frac{\rho g H}{c} = \frac{HRL}{M_{ax}} \quad (13)$$

2.2.2 Bài toán tổng quát cho mô hình 3D

Theo hình 1 và hình 3.

- Thể tích hình học khối trượt

$$A_b = \int_0^w A dy \quad (14)$$

- Diện tích của mặt khối trượt

$$L_b = \int_0^w R(\theta_u - \theta_d) dW \quad (15)$$

- Phương trình cân bằng mô men theo phương x

$$M_{bx} = \int_0^w \left(\frac{1}{3} z'^3_d - \frac{1}{3} z'^3_u - \frac{1}{2} z'_d (x'^2_t - x'^2_d) - \frac{1}{3} (z'_s - z'_t) (x'^2_s + x'_s x'_t + x'^2_t) - \frac{1}{2} (z'_t x'_s - z'_s x'_t) (x'_s + x'_t) - \frac{1}{2} z'_u (x'^2_u - x'^2_s) \right) dW \quad (16)$$

$$x_{gb} = \frac{M_{bx}}{A_b} \quad (17)$$

- Phương trình cân bằng mô men theo phương z

$$M_{bz} = \int_0^w \left(\frac{1}{2} R^2 (x'^2_u - x'^2_d) + \frac{1}{6} (x'^3_s - x'^3_u) - \frac{1}{2} z'^2_d (x'_t - x'_d) - \frac{1}{6} (x'_s - x'_t) (z'^2_s + z'_s z'_t + z'^2_t) - \frac{1}{2} z'^2_u (x'_u - x'_s) \right) dW \quad (18)$$

$$z_{gb} = \frac{M_{bz}}{A_b} \quad (19)$$

- Lực gây trượt tương ứng với khối trượt

$$M_{db} = \rho g M_{bx} \quad (20)$$

- Lực kháng trượt của khối trượt

$$M_{rb} = cRL_b \quad (21)$$

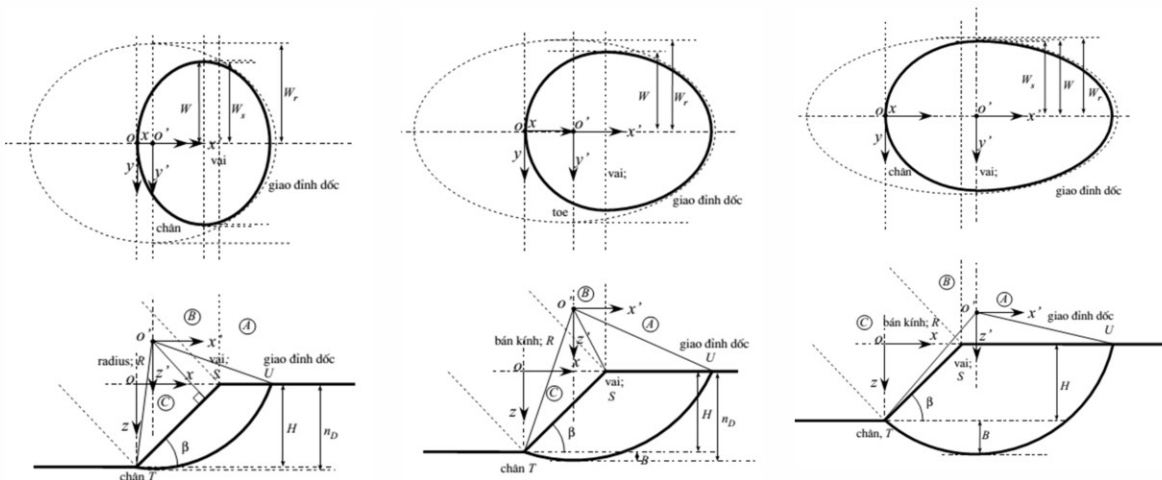
- Hệ số an toàn theo điều kiện cân bằng mô men cho khối trượt

$$F_{sb} = \frac{M_{rb}}{M_{db}} = \frac{cRL}{\rho g M_{bx}} = \frac{c}{\rho g H} \frac{HRL_b}{M_{bx}} \quad (22)$$

- Hệ số ổn định theo điều kiện cân bằng lực của khối trượt

$$N_{bs} = F_{bs} \frac{\rho g H}{c} = \frac{HRL_b}{M_{bx}} \quad (23)$$

Mặt trượt giao với các bề mặt của mái dốc với các bề rộng khác nhau. Tùy vào vị trí tâm của mặt trượt nguy hiểm nhất mà bề rộng lớn nhất của mái trượt sẽ nằm ở mặt dốc, vai dốc hoặc đỉnh dốc như thể hiện trong Hình 4. Theo đó với vị trí tâm trượt khác nhau, chiều rộng lớn nhất (W) của cung trượt sẽ nằm tại mặt dốc hay đỉnh dốc.



Hình 4. Quan hệ W và tâm của mặt trượt

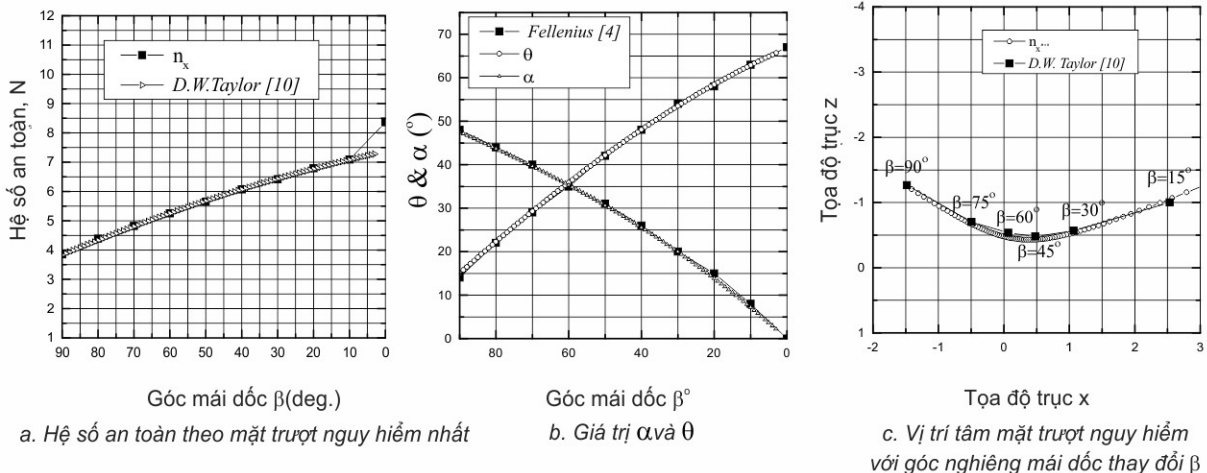


3. Kết quả và phân tích

3.1 Mặt trượt 2D

Nếu bỏ qua ảnh hưởng của theo phương bề rộng bài toán 3D phẳng được đưa về bài toán 2 chiều. Phương trình cân bằng mô men được thể hiện trong Hình 1.

Kết quả tính toán của phương pháp 2D được so sánh với kết quả của Terzaghi [7, 5], Fellenius [4] và Taylor [11] như trong Hình 5.



Hình 5. Mặt trượt nguy hiểm với $\phi=0$

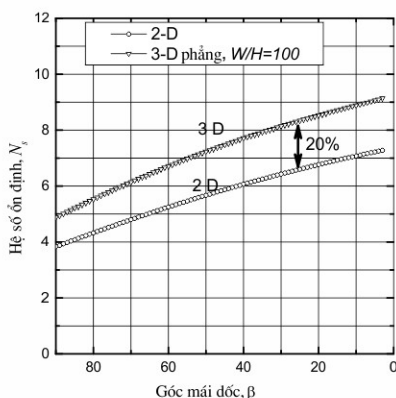
Theo Hình 5, vị trí kích thước hình học của mái dốc được đưa vào hệ tọa độ xoz. Tâm hệ tọa độ $O(0,0)$. Hệ tọa độ nhằm xác định tâm của mặt trượt nguy hiểm nhất $O_r(x_r, z_r)$ và vị trí các giao điểm của mặt

trượt và mái dốc. Hình 5 a, b, c thể hiện giá trị hệ số ổn định, giá trị α và θ và vị trí tâm trượt của mái dốc nguy hiểm nhất với mái dốc có góc mái dốc β thay đổi từ 0 đến 90°. Taylor [8] đã đưa ra kết quả hệ số ổn định (5a) và tâm vị trí mặt trượt nguy hiểm nhất cho mái dốc với β : 15°; 30°; 45°; 60°; 75°; 90°. Fellenius [4] đưa ra giá trị của α và θ với giá trị β tương ứng. Nghiên cứu này đã tính toán cho tất các trường hợp góc mái dốc β như trong hình 5 a, b, c. Có thể nhận thấy kết quả của nghiên cứu này cho các góc mái dốc β : 15°; 30°; 45°; 60°; 75°; 90° trùng với kết quả trước đó đã được giới thiệu.

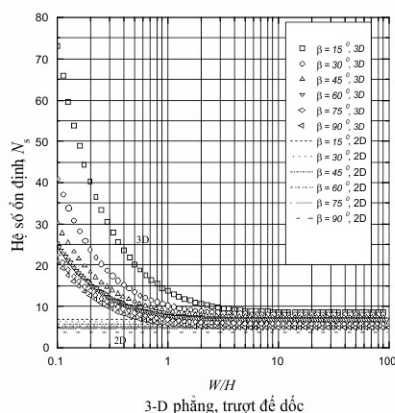
3.2 Mặt trượt 3D phẳng

Với bài toán 3D phẳng, giá trị chiều rộng w của mặt trượt 3D được giới thiệu nhằm xác định độ ảnh hưởng của nó lên hệ số ổn định của mái dốc. Thông số W/H được giới thiệu trong biểu đồ như trong Hình 4. Thuật toán cho tính toán mái dốc 3D với giá trị W/H thay đổi được thể hiện trong Hình 2.

Hình 6 thể hiện kết quả của tính toán cho hệ số an toàn và vị trí tâm trượt nguy hiểm của mái dốc 3D phẳng với $\phi = 0$ và giá trị β từ 0 đến 90° như với trường hợp 2D.



a. Hệ số ổn định 3D phẳng, $W/H = 100$

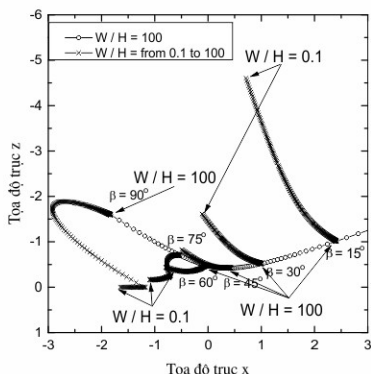


b. Hệ số ổn định 3D phẳng với, $(W/H): 0.1 \div 100$

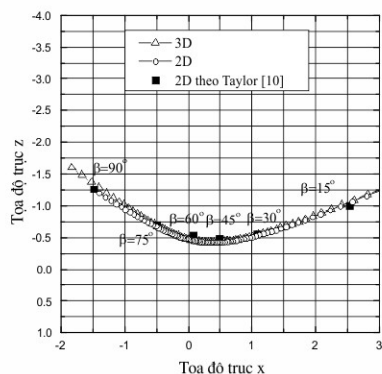
Hình 6. Hệ số ổn định và ảnh hưởng của giá trị W/H lên hệ số N_s

Giá trị bề rộng ảnh hưởng tới hệ số ổn định của mái dốc. Khi W càng tăng, hệ số ổn định càng giảm đến giá trị giới hạn. Giá trị $W/H = 100$ được coi như giá trị giới hạn của bề rộng mái dốc và hệ số ổn định của nó được coi như hệ số ổn định của mái dốc 3D phẳng. Qua biểu đồ 6a, có thể thấy hệ số ổn định của 3D phẳng lớn hơn 20% so với hệ số ổn định của 2D cùng độ dốc. Qua hình 6b có thể nhận thấy ảnh hưởng của bề rộng mái trượt tới hệ số ổn định mái dốc. Hệ số W càng nhỏ thì hệ số ổn định mái dốc N_s càng lớn.

Vị trí tâm của mặt trượt sẽ được xác định với giá trị W thay đổi từ $W/H = 0.1 \div 100$ như trong hình 7a. Khi W/H tiến tới vô hạn ($W/H = 100$), tâm vị trí mặt trượt nguy hiểm nhất của khối trượt 3D tiệm cận với tâm của mặt trượt nguy hiểm nhất của 2D trong hệ tọa độ xoz như trong Hình 7b.



a. Vị trí tâm mặt trượt nguy hiểm nhất khi W/H thay đổi



b. Vị trí tâm mặt trượt nguy hiểm nhất cho 2D & 3D

Hình 7. Vị trí tâm mặt trượt nguy hiểm nhất của khối đất 3D



4. Kết luận

Bài báo trình bày phương pháp phân tích cân bằng tĩnh để dự đoán tính toán ổn định mái dốc 3D. Các kết quả nghiên cứu cho mô hình 3D cho các kết luận sau:

- Kết quả cho thấy hệ số ổn định của 3D lớn hơn hệ số đó của 2D với cùng góc nghiêng, kích thước mái dốc do ảnh hưởng của bề rộng W . Theo đó hệ số ổn định của 3D lớn hơn khoảng 20% so với hệ số đó của mái dốc 2D.

- Hệ số bề rộng càng nhỏ thì hệ số ổn định mái dốc càng lớn. Khi bề rộng mái dốc phẳng 3D tăng tới vô hạn, tâm của mặt trượt nguy hiểm sẽ trùng với tâm của mặt trượt 2D.

- Kết quả phân tích cho các biểu đồ về vị trí tâm trượt, hình dạng cung trượt và hệ số an toàn tương ứng của mái dốc 3D với bề rộng khác nhau. Đây là cơ sở giúp phân tích thực hành thiết kế cho kỹ sư. Các biểu đồ để tính, xác định vị trí, độ ổn định mái dốc 3D nhằm giúp các kỹ sư có thể kiểm tra lại an toàn, cung trượt của mái dốc 3D trong trường hợp bị sạt lở xảy ra.

Tài liệu tham khảo

1. Bishop, A. W. (1955), "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", *Geotechnique*, London, Vol. 5, No. 1, pp. 7-17.
2. Chen, R.H. and Chameau, J.-L. (1983), "Three-Dimensional Limit Equilibrium Analysis of Slopes", *Geotechnique*, Vol. 32, No. 1, pp. 31-40.
3. Duncan, J.M. (1992), "State-of-the-Art: Static Stability and Deformation Analysis", *Proceedings of Stability and Performance of Slopes and Embankments-II*, ASCE, Vol. 1, pp. 222-266.
4. Fellenius, W. (1927), *Erdstatische Berechnungen (Calculation of stability of slopes)*, Berlin, (Revised ed. 1939, 48 pp.).
5. Morgenstern, N.R. and Price, V.E. (1967), "A Numerical Method for Solving the Equations of Stability of General Slip Surfaces", *The Computer Journal*, Great Britain, Vol. 9, No. 4, February, pp. 388-393.
6. Leshchinsky, D., and Huang, C.-C. (1992), "General three-dimensional slope-stability analysis", *J. Geotech, ASCE*, 118(11), 1748-1764.
7. Karl Terzaghi (1942), *Theoretical soil mechanics*, Chapman & Hall, limited. John Wiley & Sons, INC.
8. Karl Terzaghi., Ralph B. Peck., and Gholamreza Mesri. (1996), *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley & Sons, INC.
9. Skempton, A. W. (1985), "Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and the Laboratory", *Geotechnique*, Vol. 35, No. 1, pp. 3-18.
10. Taylor, D.W. (1937), Stability of earth slopes, *J. Boston Soc. Civil Engrs.*, 24, pp. 197-246.
11. Taylor, D.W. (1948), "Fundamentals of Soil Mechanics, New York, John Wiley and Sons", 700 pp.
12. Thomaz, J. E., and Lovell, C.W. (1988), "Three Dimensional Slope Stability Analysis with Random Generation of Surfaces", *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, Vol. 1, pp. 777-781.