

## ĐỀ XUẤT PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN ỔN ĐỊNH MÁI DỐC TRONG MÔ ĐUN SLOPE/W

Phạm Ngọc Thịnh

Phân hiệu Trường Đại học Thủy lợi

**Tóm tắt:** Nghiên cứu này thực hiện phân tích sâu rộng về các phương pháp tính toán ổn định mái dốc sử dụng trong mô-đun Slope/w của phần mềm Geostudio, một công cụ phổ biến trong tính toán thiết kế công trình. Các phương pháp khác nhau như phương pháp Ordinary, Bishop, Spencer, và Morgenstern-Price đã được đánh giá để xác định phương pháp tối ưu cho ứng dụng thực tế, nhằm cải thiện độ ổn định của các công trình xây dựng nói chung và thủy lợi nói riêng. Nghiên cứu tập trung vào việc so sánh hiệu quả tính toán, các giả định đơn giản hóa, và tác động của chúng đối với kết quả cuối cùng. Kết quả cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa các phương pháp về hệ số an toàn và khả năng ứng dụng trong điều kiện thực tế khác nhau. Bài báo đề xuất lựa chọn phương pháp phù hợp trong tính toán góp phần nâng cao hiệu quả thiết kế và đảm bảo an toàn cho các công trình.

**Từ khóa:** Slope/w; ổn định mái dốc; cân bằng giới hạn; hệ số an toàn.

**Summary:** This study conducts a comprehensive analysis of various slope stability calculation methods used in the Slope/w module of the Geostudio software, a widely utilized tool in construction design. The methods evaluated include Ordinary, Bishop, Spencer, and Morgenstern-Price, aiming to identify the optimal approach for practical application to enhance the stability of construction projects, particularly in hydraulic engineering. The focus is on comparing the effectiveness of these calculation methods, the simplifying assumptions made, and their impact on the final results. The findings indicate significant differences among the methods in terms of safety factors and their applicability under various real-world conditions. The paper recommends selecting appropriate calculation methods to improve design efficiency and ensure the safety of construction projects.

**Keywords:** Slope/w; slope stability; limit equilibrium, factor of safety.

### 1. GIỚI THIỆU

Phân tích ổn định của các cấu trúc đất là một trong những nghiên cứu địa kỹ thuật lâu đời nhất, với các ứng dụng rộng rãi từ xây dựng đập đến thi công đường cao tốc. Các phương pháp phân tích sự ổn định mái dốc đã được phát triển từ đầu thế kỷ 20, bắt đầu với việc rời rạc hóa khối lượng trượt tiềm năng thành các lát cắt. Petterson đầu tiên giới thiệu việc phân tích ổn định của cầu cảng Stigberg Quay ở Gothenberg, Thụy Điển vào năm 1955, trong đó xem xét mặt trượt dưới dạng hình tròn và khối lượng trượt được chia thành các lát cắt

[1]. Phương pháp cắt lát thông thường, hay còn gọi là phương pháp lát cắt Thụy Điển, sau đó được Fellenius phổ biến vào năm 1936 [2].

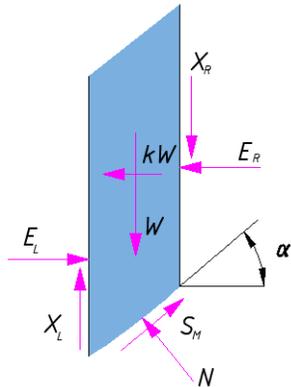
Với sự ra đời của máy tính điện tử vào những năm 1960, việc xử lý các quy trình lặp đi lặp lại trở nên đơn giản hơn, cho phép phát triển các công thức toán học chặt chẽ hơn cho các phương pháp tính toán. Các tiến bộ đáng kể trong phương pháp này được thực hiện bởi Janbu và Bishop vào giữa những năm 1950 [3], [4], dẫn đến sự phát triển của phương pháp Morgenstern và Price vào năm 1965 và Spencer vào năm 1967 [5], [6]. Các phương pháp này đã đưa ra một khung cách tiếp cận mới trong việc phân tích ổn định mái dốc, làm cơ sở cho nhiều phương pháp phân tích hiện

Ngày nhận bài: 09/5/2024

Ngày thông qua phản biện: 04/6/2024

Ngày duyệt đăng: 10/6/2024

đại hơn như phương pháp General Limit Equilibrium (GLE) phát triển bởi Fredlund và cộng sự vào những năm 1970 [7].



Hình 1: Sơ đồ lực tác dụng lên một dải đất

Các bước cơ bản khi sử dụng phương pháp GLE để phân tích ổn định mái dốc bao gồm ba bước chính. Bước đầu tiên, cần thiết lập một cơ chế trượt với các mặt trượt cụ thể. Tiếp theo, giải các phương trình cân bằng tĩnh về lực và mô men của cơ chế đó nhằm xác định cường độ huy động của đất hoặc các ngoại lực tác động. Cuối cùng, kiểm tra cân bằng tĩnh của các cơ chế khác nhau và xác định cơ chế giới hạn tương ứng với lực cân bằng giới hạn.

Phương pháp GLE dựa trên hai hệ số của phương trình an toàn, cho phép áp dụng một loạt các giả định về tiếp tuyến pháp tuyến giữa các lát cắt, làm nền tảng cho sự phát triển của các công cụ tính toán phức tạp hơn như SLOPE/W. Đây là công cụ hữu ích trong việc phân tích và thiết kế các hệ thống ổn định mái dốc trong các dự án địa kỹ thuật ngày nay.

Phương trình đề xuất có dạng:

$$X = E \cdot \lambda \cdot f(x) \tag{1}$$

trong đó,  $f(x)$  là một hàm,  $\lambda$  là phần trăm của hàm được sử dụng,  $E$  là lực pháp tuyến và  $X$  là lực tiếp tuyến.

Hệ số an toàn ứng với trạng thái cân bằng mô men:

$$K_m = \frac{\Sigma(c' \beta R + (N - u) R \tan \varphi')}{\Sigma W_x - \Sigma N_f \pm \Sigma Dd} \tag{2}$$

Hệ số an toàn ứng với trạng thái cân bằng lực là:

$$K_f = \frac{\Sigma(c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \varphi' \cos \alpha)}{\Sigma N \sin \alpha - \Sigma D \cos \omega} \tag{3}$$

Trong đó:

$c'$  – lực dính;

$\varphi'$  – góc ma sát trong;

$u$  – áp lực lỗ rỗng;

$N$  – lực pháp tuyến;

$W$  – trọng lượng của dải;

$D$  – tải trọng điểm tập trung;

$\beta, R, x, f, d, \omega$  - thông số hình học;

$\alpha$  - độ nghiêng của lát cắt.

Trong phân tích ổn định mái dốc, lực pháp tuyến  $N$  tại đáy mỗi lát cắt đóng một vai trò quan trọng. Đây là lực chính phản ánh áp lực tổng hợp từ trọng lượng và các lực khác tác động theo phương thẳng đứng lên lát cắt. Lực này được tính toán bằng cách tổng hợp tất cả các lực dọc, bao gồm trọng lượng của lát cắt và các lực bên khác như áp lực nước trong lỗ rỗng, nếu có.

Sự thỏa mãn của trạng thái cân bằng lực dọc là điều kiện cần để đảm bảo tính ổn định của cấu trúc và là một phần không thể thiếu trong phân tích. Trạng thái này đảm bảo rằng, trong mọi điểm của mái dốc, tổng lực dọc không làm vượt quá sức chịu tải của đất, qua đó ngăn ngừa trượt và sạt lở. Việc xác định chính xác lực pháp tuyến  $N$  và việc thỏa mãn trạng thái cân bằng lực dọc do đó là yếu tố cốt lõi trong việc đánh giá và thiết kế an toàn cho các công trình dân dụng và thủy lợi.

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c' \beta \sin \alpha + u \beta \sin \alpha \tan \varphi'}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \varphi'}{F}}}{F} \tag{4}$$

Trong phân tích độ ổn định của mái dốc, chúng ta xét hai biến thể chính của hệ số an toàn:  $F_m$  và  $F_f$ , phụ thuộc vào việc tham số  $N$  — lực pháp tuyến tại đáy mỗi lát cắt. Khi  $N$  được áp dụng vào phương trình hệ số mô men an toàn, giá trị tương ứng của hệ số an toàn là  $F_m$ . Ngược lại, khi  $N$  được đưa vào phương trình hệ số lực an toàn, ta thu được  $F_f$ . Điều này phản ánh sự khác biệt trong cách xử lý các

tải trọng đứng và nghiêng trong mô hình phân tích ổn định.

Một yếu tố quan trọng cần được chú ý trong các phương pháp phân tích là sự phụ thuộc của lực pháp tuyến đáy lát cắt vào các tiếp tuyến xen kẽ  $X_R$  và  $X_L$  ở hai bên lát cắt. Điều này làm cho chuẩn cơ sở của lát cắt thay đổi tùy thuộc vào cách thức mỗi phương pháp xử lý tiếp tuyến xen kẽ giữa các lát cắt. Sự khác biệt trong cách tiếp cận này dẫn đến sự thay đổi trong giá trị hệ số an toàn và phản ánh mức độ an toàn thực tế của các cấu trúc địa kỹ thuật.

Mô đun Slope/w cung cấp một loạt các phương pháp tính toán ổn định mái dốc, bao gồm Ordinary, Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer, và Morgenstern-Price... Trong lĩnh vực giao thông, phương pháp Bishop đã được khuyến nghị sử dụng theo tiêu chuẩn 22TCN 262-2000 [8]. Tuy nhiên, trong lĩnh vực thủy lợi, hiện chưa có hướng dẫn hoặc đề xuất cụ thể về việc lựa chọn phương pháp tính toán phù hợp.

Nghiên cứu này sẽ tập trung phân tích và đánh giá các phương pháp tính toán ổn định mái dốc để từ đó đề xuất phương pháp tính phù hợp nhất cho các công trình thủy lợi.

## 2. PHƯƠNG PHÁP THỰC HIỆN

### 2.1. Phương pháp Ordinary và Fellenius

Phương pháp Ordinary và Fellenius là những kỹ thuật đầu tiên được sử dụng trong phân tích ổn định mái dốc, được trình bày chi tiết trong các tài liệu địa kỹ thuật. Điểm nổi bật của phương pháp này là sự đơn giản trong cách tiếp cận, cho phép tính toán hệ số an toàn một cách thủ công mà không yêu cầu hỗ trợ của công nghệ máy tính hiện đại. Trong phương pháp này, các lực xen kẽ giữa các lát cắt được hoàn toàn bỏ qua ( $X=E=0$ ), giả định rằng các lát cắt là độc lập với nhau về mặt lực.

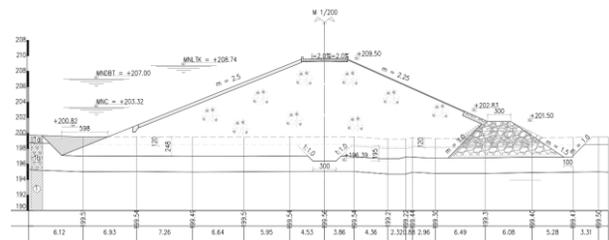
Trọng lượng của mỗi lát cắt được phân tích thành hai thành phần chính: lực pháp tuyến cơ sở, tức lực vuông góc với đế lát cắt, và lực truyền động hấp dẫn, tức thành phần trọng lượng song song với đế lát cắt. Lực pháp tuyến cơ sở được sử dụng để xác định cường độ cắt có sẵn, trong khi đó thành phần truyền động hấp dẫn đóng góp vào tổng mô men tại điểm mô tả mặt trượt thử nghiệm.

Tính toán cho đập đất của hồ chứa nước thôn 6 – Khắc Khoan – Bình Phước, là đập đất không đồng chất, cao 11,25m, chiều dài đỉnh đập 199,7m, chiều rộng mặt đập 6m. Nền đập chủ yếu là đất sét, sét dẻo. Chỉ tiêu cơ lý sử dụng trong tính toán được liệt kê ở bảng 1.

**Bảng 1: Chỉ tiêu cơ lý sử dụng trong tính toán ổn định**

T	T	Lớp đất	Vị trí	Các chỉ tiêu đưa vào tính toán			
				K	$\gamma_m$	$\Phi_{tm}$	$C_{tm}$
				m/s	KN/m <sup>3</sup>	độ	KPa
1		Thân đập	Đất đắp	3,30 E-07	18,30	14,07	27,10
2			Đóng đá tiêu nước	5,00 E-03	25,00	30,00	0,00
3		Nền đập	Sét dẻo cao	2,40 E-07	18,80	16,17	29,80
4			Sét bụi	2,50 E-07	19,40	18,32	31,00

Cấu tạo của đập được thể hiện ở hình 2.

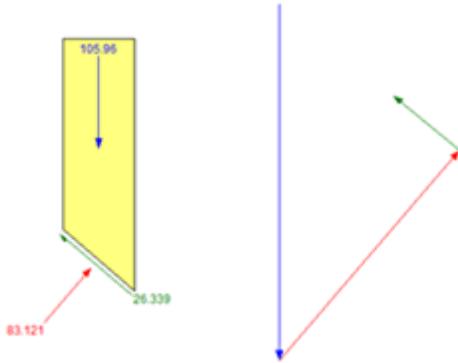


*Hình 2: Mặt cắt ngang đập đất*

Hình 3 cung cấp một cái nhìn trực quan về sơ đồ đa giác lực cho lát cắt số 8. Điểm đáng chú ý đầu tiên trong phân tích này là sự vắng mặt của các tiếp tuyến và lực pháp tuyến xen kẽ giữa các dải đất. Sự thiếu vắng này làm nổi bật một hạn chế lớn trong việc áp dụng phương pháp cân bằng lực cho các lát cắt này, đặc biệt là trong các điều kiện mà đế lát cắt gần như nằm ngang.

Thứ hai, sự đóng đa giác lực trong trường hợp này cực kỳ kém, làm lộ ra sự thiếu hụt trong trạng thái cân bằng lực. Trong bối cảnh không có lực pháp tuyến xen kẽ, không có lực đối trọng đáng kể nào để cân bằng các thành phần bên của tiếp tuyến đế và pháp tuyến. Điều này dẫn đến khả năng cao về sự không ổn định và tiềm năng trượt cho các lát cắt này, đặc biệt khi tải trọng ngoại lực hoặc các yếu tố môi trường bên ngoài có thể tác động lên khu vực này.

Qua phân tích sơ đồ đa giác lực, rõ ràng là cần thiết phải xem xét kỹ lưỡng việc bổ sung các lực xen kẽ hoặc áp dụng một phương pháp khác có khả năng cung cấp một trạng thái cân bằng lực tốt hơn. Việc này sẽ giúp nâng cao độ an toàn và tính ổn định của mái dốc trong thực tế.



Hình 3: Sơ đồ đa giác lực cho phương pháp

Do khả năng đóng đa giác lực không hiệu quả, phương pháp Ordinary có thể mang lại các hệ số an toàn không thực tế, khiến nó không được khuyến khích sử dụng trong các ứng dụng thực tế.

Phương pháp này vẫn được giữ trong mô đun SLOPE/W chủ yếu vì lý do lịch sử và cho mục đích giáo dục, phục vụ như một công cụ so sánh hữu ích để giảng dạy về cách thức phân tích ổn định mái dốc so với các phép tính bằng tay. Điều này cũng giúp sinh viên và các nhà nghiên cứu hiểu rõ hơn về sự phát triển của các phương pháp phân tích từ truyền thống đến hiện đại. Từ góc độ này, phương pháp Ordinary không chỉ là một công cụ tính toán mà còn là một phần quan trọng trong lịch sử phát triển, cung cấp một cơ sở để đánh giá và so sánh hiệu quả của các kỹ thuật tiên tiến hơn.

## 2.2. Phương pháp Bishop

Vào những năm 1950, tại Đại học Imperial ở London, Giáo sư Bishop đã đưa ra một đổi mới trong phương pháp phân tích ổn định mái dốc bằng cách phát triển phương pháp tính toán mới. Phương pháp này đặc biệt tính đến lực pháp tuyến giữa các lớp đất, trong khi bỏ qua lực tiếp tuyến giữa chúng ( $X=0$ ). Để tính toán lực pháp tuyến tại đáy của mỗi lát cắt, Bishop đã đề xuất một phương trình mới bằng

cách cộng dồn các tiếp tuyến theo phương thẳng đứng.

Đặc biệt, phương pháp của Bishop làm cho hệ số an toàn trong phương trình trở nên phi tuyến tính, tức là hệ số an toàn  $F_S$  xuất hiện ở cả hai vế của phương trình. Tính chất phi tuyến này yêu cầu một quy trình lặp đi lặp lại để giải phương trình, qua đó tìm ra giá trị hệ số an toàn thực sự phản ánh độ ổn định của mái dốc. Quá trình lặp này tiếp tục cho đến khi giá trị của  $F_S$  hội tụ, tức là sự thay đổi giữa các lần lặp liên tiếp nằm trong khoảng chấp nhận được.

Phương trình hệ số an toàn của phương pháp Bishop đơn giản khi không có áp lực lỗ rỗng:

$$F_S = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \left[ \frac{c\beta + W \tan \varphi - \frac{c\beta}{F_S} \sin \alpha \tan \varphi}{m_\alpha} \right] \quad (5)$$

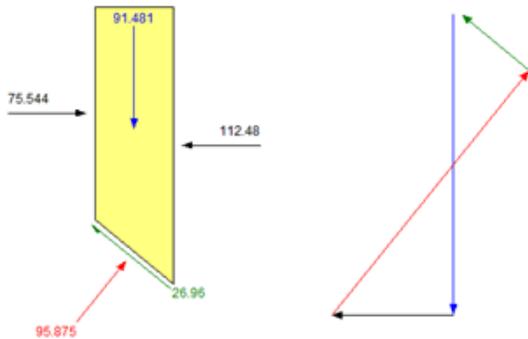
Trong đó  $m_\alpha$  được xác định qua công thức:

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \varphi}{F_S} \quad (6)$$

Để xác định hệ số an toàn trong phân tích ổn định mái dốc theo phương pháp của Bishop trong mô đun Slope/W, phương pháp thử dần được sử dụng. Ban đầu, một giá trị giả định cho hệ số an toàn  $F_S$  được giả thiết để tính toán  $m_\alpha$ , một tham số quan trọng trong phương trình cân bằng. Dựa trên giá trị này, một  $F_S$  mới được tính toán. Sau đó,  $F_S$  mới này lại được sử dụng để tính toán  $m_\alpha$  tiếp theo, và quá trình này tiếp tục lặp lại. Quy trình này được thực hiện liên tục cho đến khi giá trị của  $F_S$  hội tụ, tức là sự khác biệt giữa các lần tính toán liên tiếp nằm trong khoảng dung sai cho phép.

Quá trình này cho phép tinh chỉnh và cải thiện độ chính xác của hệ số an toàn, nhờ vào việc tính toán liên tục và điều chỉnh dựa trên phản hồi của mô hình. Khi so sánh đa giác lực của các lát cắt theo phương pháp Bishop với phương pháp Ordinary, có thể thấy rõ sự cải thiện đáng kể. Việc bổ sung các lực pháp tuyến xen kẽ đã làm cho việc đóng đa giác lực trở nên chính xác hơn, điều này phản ánh trạng thái cân bằng lực tốt hơn và kết quả hệ số an

toàn thực tế hơn. Các sự khác biệt này được minh họa rõ nét trong hình 4, cho thấy ưu điểm của phương pháp Bishop so với phương pháp truyền thống.



Hình 3: Sơ đồ đa giác lực của phương pháp Bishop

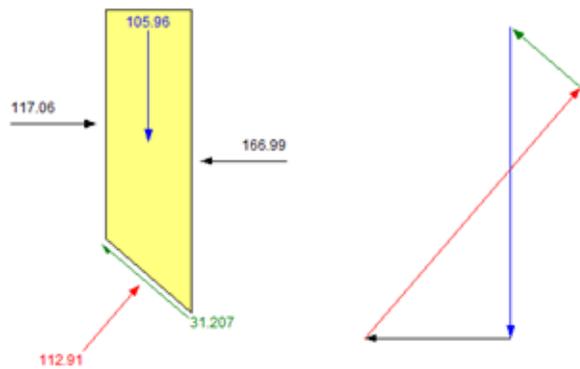
Phương pháp Bishop: (1) xem xét các lực pháp tuyến, nhưng bỏ qua lực tiếp tuyến, (2) thỏa mãn mọi trạng thái cân bằng mô men, nhưng không thỏa mãn trạng thái cân bằng lực ngang tổng thể.

### 2.3. Phương pháp đơn giản hóa của Janbu

Phương pháp Janbu có nhiều điểm tương đồng phương pháp của Bishop, tuy nhiên, có một điểm khác biệt đáng chú ý trong cách mà nó xử lý các trạng thái cân bằng lực trong phân tích độ ổn định mái dốc. Trong khi phương pháp của Bishop tập trung vào việc thỏa mãn trạng thái cân bằng mô men, phương pháp của Janbu lại nhấn mạnh đến việc duy trì trạng thái cân bằng lực ngang tổng thể.

Phương pháp của Janbu không thỏa mãn trạng thái cân bằng mô men tổng thể, điều này có nghĩa là nó ít tập trung vào các tương tác mô men giữa các lát cắt và hơn là xem xét sự phân bố lực ngang xuyên suốt mái dốc. Điều này làm cho phương pháp của Janbu trở nên hữu ích trong các trường hợp mà sự phân bố lực ngang là yếu tố quan trọng nhất cần được xem xét, cung cấp một phương pháp phân tích hiệu quả trong việc đánh giá sự ổn định của các cấu trúc dưới tác động chủ yếu của lực ngang.

Hình 5 cung cấp một cái nhìn trực quan về sơ đồ đa giác lực của phương pháp của Janbu. So sánh với phương pháp của Bishop, sơ đồ đa giác lực của Janbu cho thấy sự cải thiện đáng kể về mức độ đóng đa giác, phản ánh sự cân bằng lực hiệu quả hơn.



Hình 5: Sơ đồ đa giác lực của phương pháp Janbu

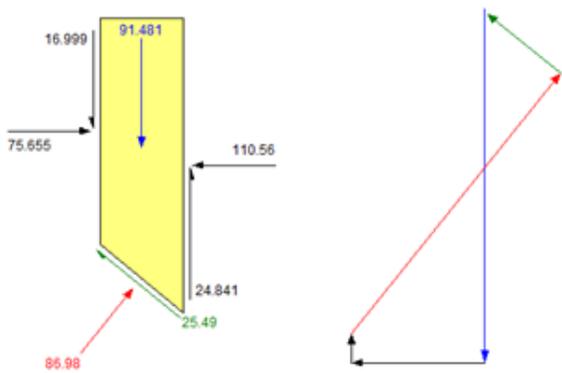
Phương pháp của Janbu: (1) xem xét các lực pháp tuyến, nhưng bỏ qua tiếp tuyến, (2) thỏa mãn mọi trạng thái cân bằng lực ngang, nhưng không thỏa mãn toàn bộ trạng thái cân bằng mômen.

### 2.4. Phương pháp Spencer

Spencer (1967) đã đưa ra một đổi mới trong phương pháp phân tích ổn định mái dốc bằng cách thiết lập một mối quan hệ cố định giữa tiếp tuyến và lực pháp tuyến. Phương pháp này đặc biệt dựa trên một quy trình lặp đi lặp lại, trong đó tiếp tuyến giữa các lát được điều chỉnh thành tỷ lệ chuẩn, cho đến khi đạt được sự cân bằng giữa hai hệ số an toàn — một cho cân bằng mômen và một cho cân bằng lực.

Trong phương pháp Spencer, hàm  $f(x)$  được giữ như một hằng số, điều này đảm bảo rằng tỷ lệ cắt vuông góc giữa các lát cắt được duy trì nhất quán xuyên suốt mái dốc. Điều này không chỉ giúp đơn giản hóa quá trình tính toán mà còn cung cấp một cơ sở vững chắc để đảm bảo rằng cả hai trạng thái cân bằng mômen và lực đều được thỏa mãn, từ đó nâng cao độ chính xác và độ tin cậy của phân tích ổn định mái dốc.

Quy trình lặp đi lặp lại cho đến khi sự khác biệt giữa các giá trị hệ số an toàn trong các lần lặp liên tiếp đạt mức chấp nhận được là một phân quan trọng của phương pháp này, giúp đảm bảo tính toàn vẹn và an toàn cho cấu trúc địa kỹ thuật dưới tác động của các lực tự nhiên và nhân tạo.

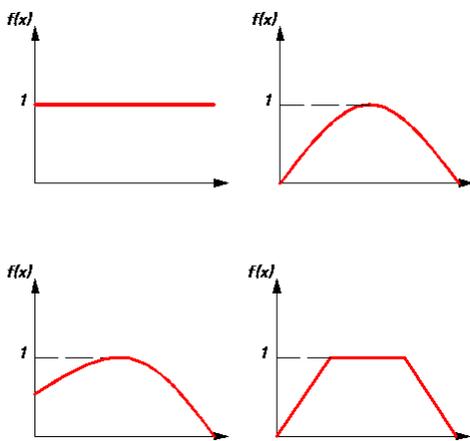


Hình 6: Sơ đồ đa giác lực của phương pháp

Phương pháp Spencer trong phân tích ổn định mái dốc: (1) Xét đến cả tiếp tuyến và lực pháp tuyến, (2) thỏa mãn cả trạng thái cân bằng mômen và lực, (3) hàm  $f(x)$  là một hằng số.

**2.5. Phương pháp Morgenstern và Price**

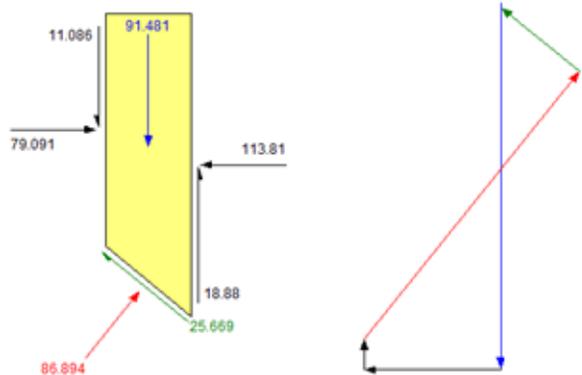
Morgenstern và Price, vào năm 1965, đã đưa ra một sự mở rộng quan trọng cho phương pháp Spencer trong phân tích ổn định mái dốc. Phương pháp Morgenstern-Price (MP) tương tự như phương pháp Spencer ở chỗ nó cũng tính đến cả tiếp tuyến và lực pháp tuyến, nhưng nó đặc biệt nổi bật với khả năng áp dụng nhiều hàm lực khác nhau để mô hình hóa mối quan hệ giữa các lát cắt.



Hình 7: Minh họa hàm  $f(x)$

Sự đa dạng trong các hàm lực này làm tăng khả năng thích ứng của phương pháp Morgenstern-Price với nhiều loại địa hình và điều kiện địa chất khác nhau, cung cấp một công cụ mạnh mẽ và linh hoạt trong phân tích ổn định mái dốc.

Giống như phương pháp Spencer, việc đóng đa giác lực rất tốt với phương pháp MP, vì bao gồm cả tiếp tuyến và lực pháp tuyến.

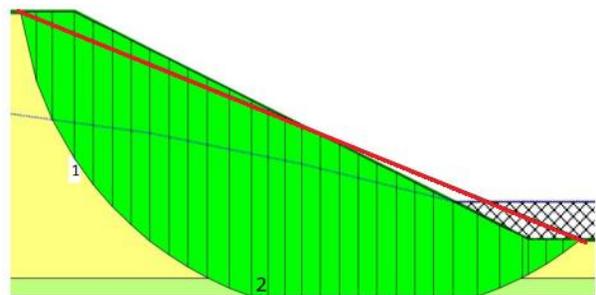


Hình 8: Đa giác lực cho phương pháp

Phương pháp Morgenstern-Price đem lại một cách tiếp cận tỉ mỉ hơn bằng cách: (1) xét đến cả tiếp tuyến và lực pháp tuyến, (2) đảm bảo cân bằng của cả mômen và lực, và (3) cung cấp một loạt các hàm mối quan hệ giữa lực pháp tuyến và lực tiếp tuyến.

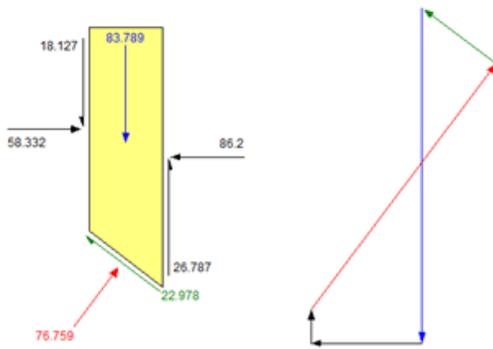
**2.6. Phương pháp Corps of Engineers**

Phương pháp Corps of Engineers đặc trưng bởi việc áp dụng một hàm lực xen kẽ đặc biệt và chỉ đáp ứng yêu cầu cân bằng lực ngang tổng thể. Phương pháp này không thỏa mãn trạng thái cân bằng mô men tổng thể.



Hình 9: Minh họa giả định

Ngoài ra, phương pháp này còn dựa trên hai giả định khác nhau liên quan đến lực tương tác giữa các khối đất. Các giả định này được xác định bằng cách sử dụng độ dốc của đường nổi từ đỉnh đến chân mặt trượt (đường màu đỏ) cùng với độ dốc của mặt đất tại các điểm cắt ngang đỉnh mặt trượt. Điều này nhằm mô hình hóa tương tác và độ dịch chuyển có thể xảy ra giữa các thoi đất trong trường hợp xảy ra sạt lở.

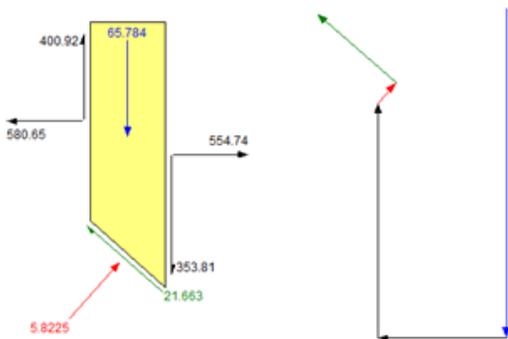


Hình 10: Đa giác lực cho phương pháp

Phương pháp Corps of Engineers có các đặc điểm: (1) xét đến cả tiếp tuyến và lực pháp tuyến, đảm bảo sự phân tích toàn diện của các lực tác động lên mặt trượt, (2) đạt được trạng thái cân bằng lực ngang tổng thể, tuy nhiên, nó lại không đáp ứng yêu cầu cân bằng mô men; (3) Sử dụng các hàm lực xen kẽ, mà đặc điểm của chúng được xác định dựa trên hình học của độ dốc và bề mặt của mặt trượt. Những đặc điểm này làm nổi bật sự phức tạp và những hạn chế của phương pháp trong việc mô hình hóa sự ổn định của các mặt trượt đất.

**2.7. Phương pháp Lowe-Karafiath**

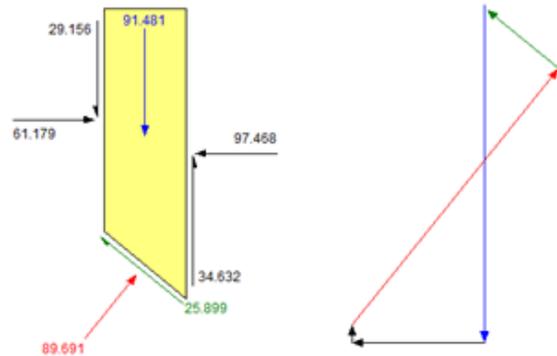
Phương pháp Lowe-Karafiath (LK) có nhiều điểm tương đồng với phương pháp của Quân đoàn Kỹ sư, nhưng nó khác biệt chủ yếu ở việc sử dụng một biến thể của hàm lực xen kẽ. Cụ thể, phương pháp LK tính toán lực dựa trên giá trị trung bình của độ dốc mặt cắt và độ nghiêng của đáy mặt trượt. Điều này cho phép phương pháp LK cung cấp một cách tiếp cận chi tiết hơn trong việc đánh giá sức chịu tải của mặt trượt, đặc biệt là trong các điều kiện địa chất và địa hình phức tạp.



Hình 11: Đa giác lực cho phương pháp

**2.8. Phương pháp Sarma**

Sarma (1973) đã phát triển một phương pháp phân tích độ ổn định mới cho các lát cắt không thẳng đứng hoặc cho các khối chung, mặc dù chỉ các lát cắt dọc mới được triển khai trong mô đun SLOPE/W. Phiên bản đầy đủ của phương pháp Sarma vẫn chưa được áp dụng trong SLOPE/W, chủ yếu do định nghĩa hình học của các khối không tương thích với sơ đồ lát cắt chung được sử dụng cho các phương pháp khác trong mô đun này. Điều này yêu cầu mô đun đặc biệt để xác định và trực quan hóa kết quả. Có kế hoạch bổ sung phương pháp Sarma đầy đủ vào SLOPE/W trong tương lai.



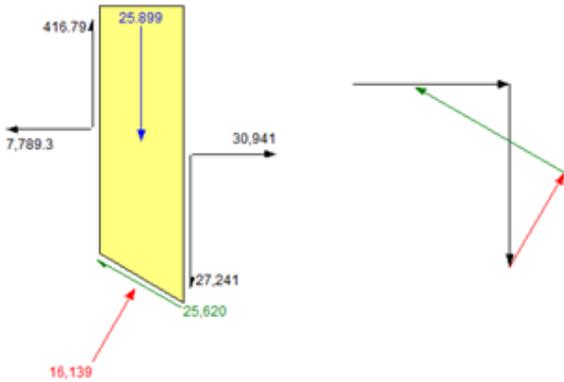
Hình 12: Đa giác lực cho phương pháp

Phương pháp Sarma trong SLOPE/W được thiết kế với các đặc điểm nổi bật sau: (1) Phương pháp này xét đến cả tiếp tuyến và lực pháp tuyến, đảm bảo tính toàn diện trong phân tích lực tác động lên mặt trượt; (2) Nó thỏa mãn cả trạng thái cân bằng mô men và lực, cung cấp một phân tích độ ổn định chính xác và đáng tin cậy; (3) Phương pháp sử dụng một phương trình cường độ cắt gần đúng để mô tả mối liên hệ giữa tiếp tuyến xen kẽ và lực pháp tuyến, cho phép hiểu biết sâu sắc hơn về các tương tác giữa các lực trong các điều kiện địa chất khác nhau.

**2.9. Phương pháp Janbu tổng quát**

Phương pháp tổng quát hóa của Janbu mang tính độc đáo so với các phương pháp cân bằng giới hạn khác đã được đề cập. Phương pháp này điều chỉnh phân bố ứng suất trong khối lượng trượt tiềm năng bằng cách xác định đường mực nước hay đường bão hòa. Trong khi phương pháp này chỉ đáp ứng yêu cầu cân

bằng lực tổng thể, trạng thái cân bằng mô men thì chỉ được thỏa mãn ở từng lát cắt riêng lẻ. Trong mô đun SLOPE/W, phương pháp Tổng quát của Janbu tập trung vào việc tính toán hệ số an toàn dựa trên cân bằng lực ( $F_f$ ). Hệ số an toàn dựa trên cân bằng mô men tổng thể ( $F_m$ ) không được tính toán, điều này phản ánh một hạn chế của phương pháp này trong việc cung cấp một đánh giá toàn diện về sự ổn định của mặt trượt.



Hình 13: Đa giác lực cho phương pháp

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Các điều kiện về lực pháp tuyến, tiếp tuyến và thỏa mãn các phương trình lực và mô men được tổng hợp trong bảng 2. Trong đó hai phương pháp Spencer và Morgenstern và Price thỏa mãn đầy đủ các điều kiện. Phương pháp Janbuchir thỏa mãn duy nhất điều kiện về cân bằng mô men.

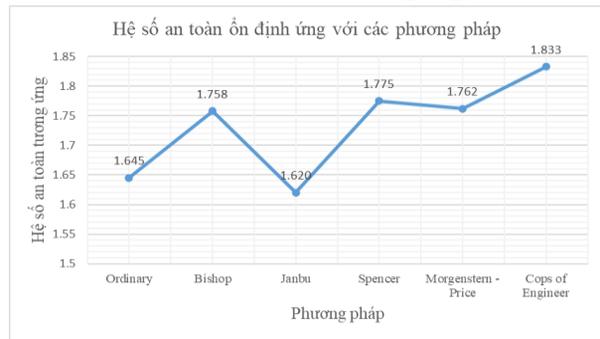
**Bảng 2: Bảng tổng hợp các điều kiện của các phương pháp**

NHÓM PHƯƠNG PHÁP	THỎA MÃN ĐK MÔ MEN	THỎA MÃN ĐK LỰC	LỰC PHÁP TUYẾN	LỰC TIẾP TUYẾN
Fellenius	○			
Bishop	○		○	
Janbu đơn giản		○	○	
Spencer	○	○	○	○
Morgenstern - Price	○	○	○	○
Quản đoàn CB, Lowe		○	○	○

Kết quả tính toán hệ số an toàn ổn định tương ứng với các phương pháp được thể hiện trên đồ thị hình 14. Phương pháp Janbu cho hệ số nhỏ nhất (1,620), phương pháp Cops of

Engineer cho kết quả lớn nhất (1,833). Các Phương pháp Bishop (1,758), Morgenstern-Price(1,762) và Spencer(1,775) cho kết quả sai khác nhau không đáng kể.

Theo QCVN 04-05: 2022 [9] với đập đất hồ Thôn 6, Khắc Khoan là công trình cấp III, hệ số an toàn về ổn định mái đập trường hợp cơ bản  $[K] = 1,25$ . Các phương pháp Bishop, Morgenstern-Price và Spencer cho kết quả hệ số an toàn ổn định sai khác 1%( 140% và 141% so với hệ số an toàn cho phép).



Hình 14: Hệ số an toàn ổn định ứng với các phương pháp

### 4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Từ kết quả nghiên cứu, một số kết luận được rút ra như sau:

- Phương pháp cân bằng giới hạn là một công cụ quan trọng trong việc phân tích độ ổn định mái dốc, dù có những hạn chế nhất định nhưng vẫn đảm bảo tin cậy so với những phương pháp khác [10]. Hiểu rõ phương pháp này, bao gồm khả năng và các giới hạn giúp sử dụng hiệu quả nó trong thực tế và không kỳ vọng vào những kết quả ngoài phạm vi khả năng của phương pháp. Đặc biệt, vì phương pháp này dựa hoàn toàn vào các nguyên tắc tĩnh học và không thể cung cấp sự phân bố ứng suất thực tế, việc hiểu được những giới hạn này sẽ cải thiện độ tin cậy trong việc sử dụng và diễn giải kết quả.

- Các phương pháp áp dụng trong mô-đun Slope/w khác biệt ở cách xem xét các lực tiếp tuyến và pháp tuyến giữa các khối đất, cũng như mức độ tuân thủ các điều kiện cân bằng của phương trình lực và mô men. Sự khác biệt này là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến kết quả phân tích độ ổn định mái dốc.

- Dưới góc độ logic, việc phân tích cân bằng giới hạn nên áp dụng các phương pháp đáp ứng đầy đủ cả cân bằng lực và mô men, chẳng hạn như phương pháp Morgenstern-Price hoặc Spencer. Tuy nhiên, các bước tính toán theo hai phương pháp này thường khá phức tạp. Do đó, việc sử dụng phương pháp Bishop, như khuyến nghị trong tiêu chuẩn 22TCN 262-2000, được coi là phù hợp hơn đối với các công giao thông cũng như các công trình thủy lợi.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. E. Petterson, “The early history of circular sliding surfaces,” *Geotechnique*, vol. 5, no. 4, pp. 275–296, 1955.
- [2] W. Fellenius, “Calculation of the stability of earth dams,” in *Proc. of the second congress on large dams*, 1936, pp. 445–463.
- [3] N. Janbu, “Earth pressures and bearing capacity calculations,” *In Proc., 4th ICSMFE*, vol. 2, pp. 207–212, 1957.
- [4] A. W. Bishop, “The use of the slip circle in the stability analysis of slopes,” *Geotechnique*, vol. 5, no. 1, pp. 7–17, 1955.
- [5] N. R. u Morgenstern and V. E. Price, “The analysis of the stability of general slip surfaces,” *Geotechnique*, vol. 15, no. 1, pp. 79–93, 1965.
- [6] E. Spencer, “A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces,” *Geotechnique*, vol. 17, no. 1, pp. 11–26, 1967.
- [7] J. Krahn, R. F. Johnson, D. G. Fredlund, and A. W. Clifton, “A highway cut failure in Cretaceous sediments at Maymont, Saskatchewan,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 703–715, 1979.
- [8] “Tiêu chuẩn thiết kế - Quy trình khảo sát thiết kế nền đường ô tô đắp trên đất yếu, 22TCN 262, Tiêu chuẩn ngành, Bộ Giao thông vận tải, Việt Nam, 2000;”.
- [9] “Công trình thủy lợi - các quy định chủ yếu về thiết kế, QCVN 04-05:2022, Quy chuẩn Quốc gia, Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, Việt Nam, 2022;”.
- [10] N. T. Quang, N. T. Hùng, and C. T. Linh, “So sánh các phương pháp phân tích ổn định đập đất hiện nay.” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, 2018.