

ĐÁNH GIÁ ỔN ĐỊNH MÁI DỐC THEO MỘT SỐ TIÊU CHUẨN KHÁC NHAU

Châu Ngọc Ẩn

Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 24 tháng 02 năm 2005, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 31 tháng 3 năm 2005)

TÓM TẮT: Bài viết này nhằm phân tích phép tính ổn định mái dốc vào thời điểm cuối tháo nước nhanh với ba tiêu chuẩn: FS của Mohr-Coulomb; biến dạng cắt (lệch) và công bậc hai d^2W với chương trình tính Gefdyn

1. HẠN CHẾ CỦA PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ ỔN ĐỊNH NỀN ĐẤT THEO TIÊU CHUẨN BỀN MOHR-COULOMB [1],[3],[4]

Thông thường đánh giá ổn định mái dốc vẫn sử dụng phương pháp mặt trượt trụ tròn có hoặc không có phân mảnh được giới thiệu trong hầu hết các sách cơ học đất, các phương pháp này chỉ xét cân bằng trên khối trượt mà không lưu ý đến các ứng suất và biến dạng bên trong khối trượt và các vùng lân cận, chủ yếu là do khả năng tính toán trường ứng suất – biến dạng thủ công rất tốn kém thời gian. Mặt khác, khi tính toán được trường ứng suất và biến dạng, để đánh giá ổn định tại một điểm trong nền đất, điều kiện cân bằng giới hạn Mohr-Coulomb thường được sử dụng như một tiêu chuẩn bền của nền đất dưới dạng sức chống cắt:

- Theo ứng suất tổng $s = \tau_{\max} = \sigma \tan \varphi + c$ (1)
- Hoặc theo ứng suất hữu hiệu $s = \tau_{\max} = \sigma' \tan \varphi' + c'$ (2)

Với: s là sức chống cắt của đất

τ_{\max} là ứng suất tiếp cực đại

σ là ứng suất tổng pháp tuyến thường được gọi là ứng suất pháp hay ứng suất tổng.

σ' là ứng suất hữu hiệu pháp tuyến cũng còn được gọi là ứng suất hữu hiệu

φ là góc ma sát biểu kiến

φ' là góc ma sát hữu hiệu hay góc ma sát trong điều kiện thoát nước

c là lực dính biểu kiến

c' là lực dính hữu hiệu hay lực dính trong điều kiện thoát nước

Phương pháp này dựa vào góc lệch θ là góc hợp bởi tổng ứng suất và pháp tuyến mặt tác động, như trong hình 1. Xét mặt I-I đi qua một điểm M trong mẫu đất chịu nén ba trục gồm áp lực đứng σ_1 và áp lực ngang σ_3 . Gọi ứng suất tác động lên M là P, không kể áp lực nước lỗ rỗng u. Chiếu P lên pháp tuyến và tiếp tuyến của điểm M với mặt I-I có được ứng suất hữu hiệu pháp tuyến σ' và ứng suất tiếp τ . Trên vòng Mohr ứng suất của hệ tọa trục (τ, σ) , góc lệch θ chính là góc hợp bởi Om và trục σ , nó thay đổi từ 0 đến đến θ_{\max} . Khi ứng suất chính đại σ_1 tăng dần trong khi ứng suất chính tiểu σ_3 không đổi và ứng suất chính tiểu σ_3 giảm dần trong khi ứng suất chính đại σ_1 không đổi như trong thí nghiệm nén ba trục, vòng Mohr lớn dần, đồng nghĩa với góc lệch cực đại θ_{\max} lớn dần. Khi mẫu đất bị trượt, góc lệch cực đại θ_{\max} sẽ bằng góc ma sát, đây cũng là điều kiện cân bằng giới hạn Mohr-Coulomb

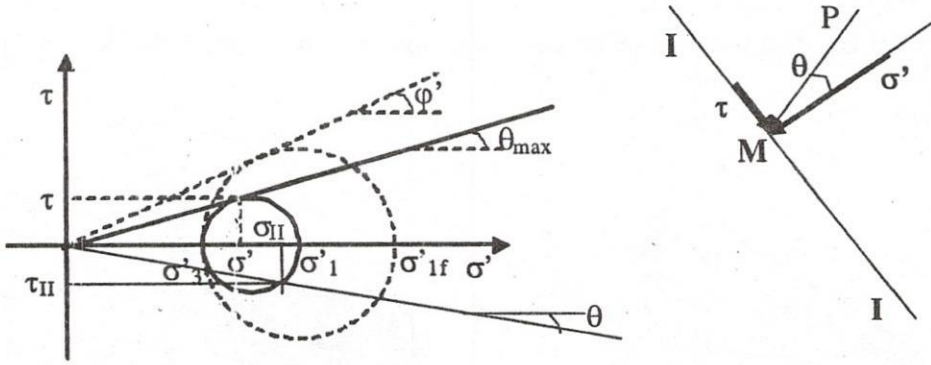
Góc lệch θ với phương pháp tính toán theo ứng suất tổng σ của đất dính có thể viết:

$$\sin \theta_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \times \cot \varphi} \quad (3)$$

Hoặc với phương pháp tính toán theo ứng suất hữu hiệu σ'

$$\sin \theta_{\max} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3 + 2c' \times \cot \varphi'} \quad (4)$$

Để biết ổn định tại bất kỳ điểm trong khối đất nền, từ ứng suất tác động tính góc lệch cực đại θ_{\max} so sánh với góc ma sát, hoặc cũng có thể diễn dịch dưới dạng hệ số an toàn ký hiệu FS.



Hình 1. Góc lệch θ và góc lệch θ_{max}

* Hệ số an toàn FS của điểm đang khảo sát với phương pháp tính toán theo ứng suất tổng σ có dạng:

$$FS = \frac{\sin \varphi}{\sin \theta_{max}} = \frac{\frac{\sigma'_{1f} - 1}{\sigma'_{3f}} \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + \frac{2c}{\sigma'_{3f}} \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) - 1}{\frac{\sigma'_1 - 1}{\sigma'_3}} \quad (5)$$

* Hệ số an toàn FS của điểm đang khảo sát với phương pháp tính toán theo ứng suất hữu hiệu σ' có dạng:

$$FS = \frac{\sin \varphi'}{\sin \theta_{max}} = \frac{\frac{\sigma'_{1f} - 1}{\sigma'_{3f}} \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + \frac{2c}{\sigma'_{3f}} \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) - 1}{\frac{\sigma'_1 - 1}{\sigma'_3}} \quad (6)$$

- Với: σ_1, σ_{1f} ứng suất chính đại và ứng suất chính đại lúc trượt
 σ'_1, σ'_{1f} ứng suất chính đại hữu hiệu và ứng suất chính đại hữu hiệu lúc trượt
 σ_3, σ_{3f} ứng suất chính tiểu và ứng suất chính tiểu lúc trượt
 σ'_3, σ'_{3f} ứng suất chính tiểu hữu hiệu và ứng suất chính tiểu hữu hiệu lúc trượt

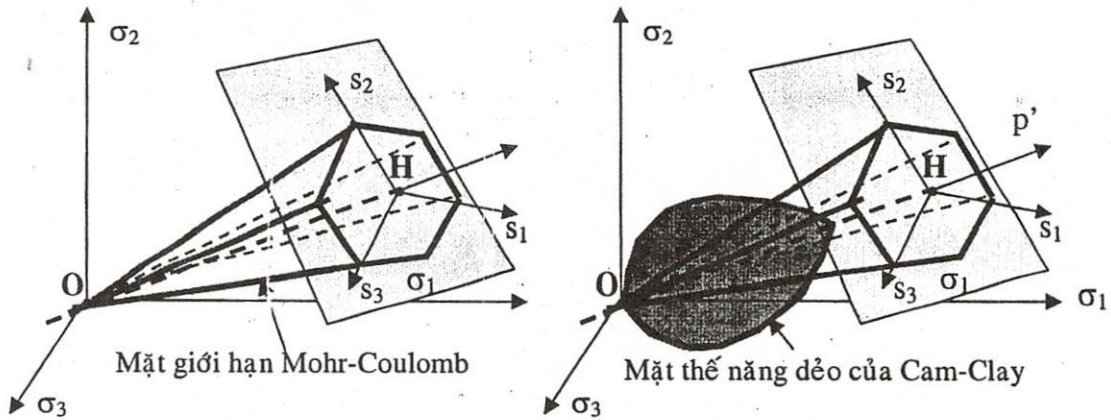
Từ trường ứng suất tổng và ứng suất hữu hiệu trong nền đất dưới mái dốc do trọng lượng bản thân và tác động của dao động mặt nước bên cạnh, có thể tính hệ số an toàn FS tại mọi điểm trong nền mái dốc, từ đó nối lại các mặt có cùng hệ số an toàn và suy ra mặt nguy hiểm nhất.

Trong các thập niên 50, 60 của thế kỷ 20, quy luật ứng xử cơ học của đất hoàn toàn dựa vào lý thuyết đàn hồi và ứng xử thủy học dựa vào lý thuyết Terzaghi trên giả thuyết đất bão hòa hoàn toàn, cả hai đều không thực sự mô tả đúng ứng xử của đất thực. Mặt khác, phương pháp tính cơ bản là bằng tay nên chỉ có thể sử dụng những lời giải giải tích với các điều kiện biên hết sức đơn giản hoặc tham khảo các bảng tính lập sẵn. Hạn chế cơ bản của phương pháp này là chậm và phải tính với hệ số an toàn ít nhất là 3 khi tính với ứng suất tổng và 2,5 khi tính với ứng suất hữu hiệu.

2. CÁC MÔ HÌNH CƠ HỌC ĐẤT TỚI HẠN [1],[3],[4],[5]

Trong chiều hướng sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán trường ứng suất và trường biến dạng trong nền đất, cần phải có quy luật ứng xử cơ học và thủy học gần với đất thực hơn. Mãi đến những năm cuối của thập niên 60 và đầu thập niên 70, cùng với sự gia tăng năng lực của máy tính, cơ học đất tới hạn mới xuất hiện qua mô hình Cam-Clay với sự đóng góp rất lớn của các nhà cơ học đất của Vương quốc Anh: khái niệm cơ học đất tới hạn (critical state soil mechanics, 1968) của Schofield và Wroth; khái niệm mặt giới hạn biến dạng dẻo hay mặt thế năng dẻo (biến dạng không hồi phục) của đất cố kết thường (đất yếu) và đất cố kết trước nhẹ hoặc nặng trong quá trình chịu tác động của ứng suất lệch (chịu nén-cắt hoặc nở-cắt hay cắt thuần túy) và đường tới hạn (critical state line viết tắt là CSL) ứng với trạng thái phá hoại trượt (1968) của Roscoe và Burland; quan hệ ứng suất-biến dạng trong ứng xử chịu tải của đất (1971) của Burland mới mô tả tương đối gần đúng với

ứng xử thật của đất bão hòa nước, dĩ nhiên chưa xét được tính không đồng nhất và tính dị hướng của đất.



Hình 2. Mô hình Mohr-Coulomb và Cam-Clay

Mặt giới hạn của Mohr-Coulomb trong hình 2, có dạng:

$$f([\sigma],[k]) = \sigma_1 - \sigma_3 - 2c \cos \varphi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi = 0 \tag{7}$$

Mặt thế năng dẻo của mô hình Cam Clay trong hình 2, có dạng:

$$q = \frac{Mp'}{(\lambda - \kappa)} [-\lambda \ln p' + \lambda - \kappa + \Gamma - v] \tag{8}$$

với p' là ứng suất hữu hiệu trung bình, được định nghĩa $p' = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$ (9)

q là độ lệch ứng suất hữu hiệu, được định nghĩa $q = \sigma_1 - \sigma_3$ (10)

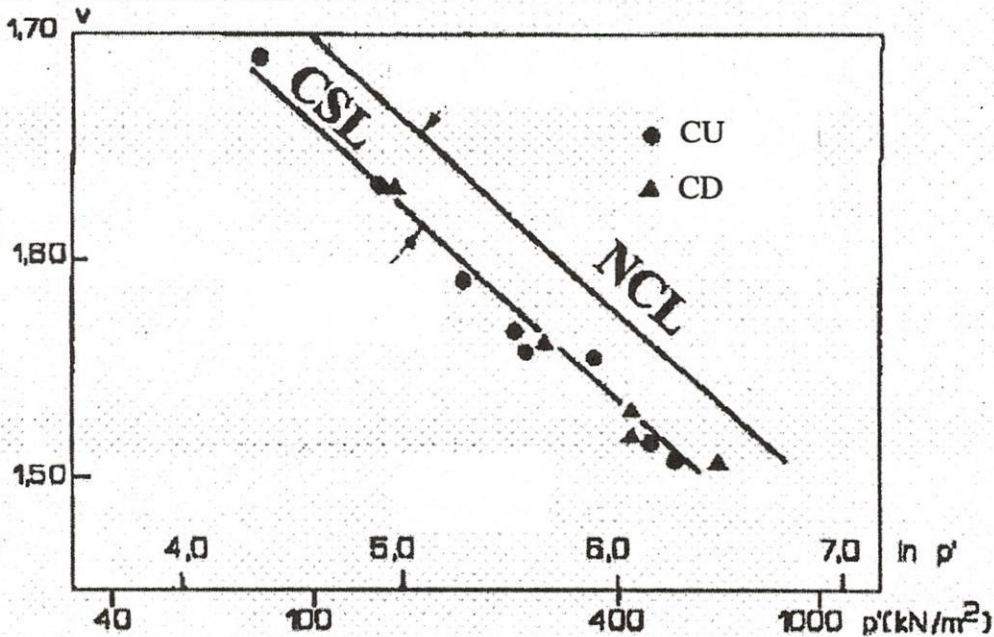
M độ dốc của đường quan hệ p' và q lúc mẫu đất bị trượt, tức là hình chiếu của đường CSL trong tọa trục p' - q , và M được tính theo biểu thức sau:

$$M = \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} \tag{11}$$

v là thể tích riêng, được định nghĩa: $v = 1 + e$ (12)

e là hệ số rỗng

Các hệ số biến dạng λ ; κ ; Γ có được từ kết quả của giai đoạn nén đẳng hướng và giai đoạn áp độ lệch ứng suất trong thí nghiệm nén ba trục.



Hình 3. $v - p'$ trong thí nghiệm nén ba trục

Cuối giai đoạn nén cố kết đẳng hướng trong thí nghiệm nén ba trục cho đường quan hệ thể tích riêng v theo ứng suất hữu hiệu trung bình p' , được định nghĩa là đường cố kết thường (normally consolidation line viết tắt là NCL) có dạng:

$$v = N - \lambda \ln(p') \quad (13)$$

trong đó N là thể tích riêng trên đường NCL ứng với $p' = 1$ kPa

Cuối giai đoạn áp ứng suất lệch lúc mẫu đất bị trượt, quan hệ thể tích riêng v theo ứng suất hữu hiệu trung bình p' diễn tả hình chiếu của đường CSL lên mặt $v-p'$, có dạng:

$$v = \Gamma - \lambda \ln(p') \quad (14)$$

λ là độ dốc của đường NCL và đường CSL vì chúng song song với nhau, theo kết quả của hàng loạt thí nghiệm nén ba trục.

Γ là thể tích riêng trên đường CSL ứng với $p' = 1$ kPa

Mô hình Cam-Clay theo biểu thức (8) có thể tính toán được cả biến dạng đàn hồi và các biến dạng dẻo của nền đất khi tác động ngoại lực, đồng thời cũng phân biệt được ứng xử đất của đất cố kết thường và đất cố kết trước. đương nhiên nó cũng tính toán được trường ứng suất, trường biến dạng, trường áp lực nước lỗ rỗng trong quá trình thoát nước lỗ rỗng thặng dư.

Mô hình Cam-Clay đầu tiên và cải tiến được đưa vào trong các phần mềm tính toán Sage-Cirsp; Plaxis đã bắt đầu được sử dụng ở nước ta.

Các mô hình phát triển sau Cam-Clay như : Mélanie; Nova, Hujoux, ... cũng có khả năng tính toán như Camclay nhưng có xét thêm nhiều đặc điểm gắn với ứng xử thực của đất như tính dị hướng,... đã được cài đặt trong các phần mềm lớn sau: U-dam; Flac; Cesar; Gefdyn; ... đều có thể mô phỏng ứng xử gắn thực nhất của đất nền thông qua trường ứng suất-biến dạng- áp lực nước lỗ rỗng.

3. PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ ỔN ĐỊNH NỀN ĐẤT THEO CÁC MÔ HÌNH CƠ HỌC ĐẤT TỐI HẠN

Nhằm tăng cường khả năng phân tích độ chính xác của ổn định của nền đất nói chung và của mái dốc nói riêng, chúng tôi giới thiệu một số tiêu chuẩn khác tiêu chuẩn Mohr-Coulomb nêu trên như sau:

3.1. Đánh giá ổn định theo biến dạng cắt, [1], [2],[4],[5],[6]

Từ trường ứng suất – biến dạng tính toán từ các mô hình sau Cam-Clay tại mọi điểm của nền đất, chúng ta có thể đánh giá ổn định theo biến dạng lệch (biến dạng cắt tổng quát) biểu thị bằng bất biến thứ hai của tăng xơ biến dạng:

$$I_{2\varepsilon} = \sqrt{e_{ij}e_{ji}} = \sqrt{(e_{xx})^2 + (e_{yy})^2 + (e_{zz})^2 + 2(e_{xy})^2 + 2(e_{yx})^2 + 2(e_{zx})^2} \quad (15)$$

với $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{I_{1\varepsilon}}{3} \delta_{ij}$ (16), các thành phần của tăng xơ biến dạng lệch

ε_{ij} là các thành phần của tăng xơ biến dạng

$I_{1\varepsilon}$ là bất biến thứ nhất của tăng xơ biến dạng

Trong bài toán phẳng 2D, biến dạng lệch có dạng đơn giản hơn và được ký hiệu ε_d được tính theo biểu thức sau:

$$\varepsilon_d = \sqrt{(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_m)^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_m)^2 + \gamma_{yz}^2} \quad (17)$$

với $\varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ biến dạng nén tương đối theo phương y và z

ε_m biến dạng nén trung bình được tính theo biểu thức: $\varepsilon_m = (\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})/2$ (18)

γ_{yz} biến dạng cắt

Tùy theo đặc điểm của công trình một số viện thiết kế đề nghị chọn một giá trị biến dạng cắt giới hạn ε_d làm giới hạn cho phép của bài toán.

3.2. Đánh giá ổn định theo “công bậc hai” d^2W [2],[7]

Theo lập luận bền của R.Hill và của D.C.Drucker, F. Darve đã đề nghị phương pháp phân tích ổn định theo công bậc hai trong bài toán tổng quát như sau:

Định nghĩa tổng quát “công bậc hai”:

$$d^2W = d\sigma \cdot d\varepsilon \tag{19}$$

trong đó: $d\sigma$, $d\varepsilon$ gia số ứng suất và gia số biến dạng

Với biến dạng nhỏ có thể phân tích gia số biến dạng thành:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \tag{20}$$

với $d\varepsilon^e$, $d\varepsilon^p$ là gia số biến dạng đàn hồi và gia số biến dạng dẻo

Từ đó suy ra:

$$d^2W = d\sigma \cdot d\varepsilon^e + d\sigma \cdot d\varepsilon^p \tag{21}$$

$$\text{Số hạng thứ nhất luôn dương} \quad d\sigma \cdot d\varepsilon^e > 0 \tag{22}$$

chỉ trừ trường hợp duy nhất bằng không khi không có gia tải, $d\sigma=0$.

Với vật liệu đàn hồi – dẻo kết hợp, mặt chảy dẻo trùng với mặt giới hạn, có hệ quả cơ bản là vectơ biến dạng dẻo thẳng góc với mặt giới hạn $f(\sigma) = 0$, nên:

$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \tag{23}$$

$$\text{trong đó } d\lambda \text{ là số vô hướng không triệt tiêu nên: } d\sigma \cdot d\varepsilon^p > 0 \tag{24}$$

Cả hai bất đẳng thức (22) và (24) chứng tỏ d^2W luôn luôn dương trong vật liệu đàn hồi-dẻo kết hợp.

Nhưng trong vật liệu không kết hợp, có sự dẫn nở khi chịu cắt như cát chặt hoặc đất sét đầm chặt hoặc cốt kết trước thì $d\varepsilon_q < 0$ trong giai đoạn nở rời ứng với mặt giới hạn Hvorslev, phân tích tương tự như trên, lúc này $d^2W < 0$. Từ điều này cho thấy có thể sử dụng d^2W để đánh giá giai đoạn đất nền đầm chặt bị nở rời ra trong quá trình chịu tải lệch khi tính toán theo nhiều bước gia tải. Hiểu cách khác, quá trình bị nở rời là quá trình bắt đầu bị trượt của nền đất hoặc mái dốc.

Trong bài toán phẳng 2D, ứng suất lệch q được định nghĩa:

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\text{ứng suất trung bình } p \text{ có dạng: } p = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) = \frac{1}{2} ((\sigma_1 - \sigma_3) + 2\sigma_3) = q + \sigma_3$$

$$\text{Công có thể viết: } dW = p d\varepsilon_v + q d\varepsilon_d$$

với $d\varepsilon_v$ gia số biến dạng do tăng xơ cầu ứng suất gây ra (tăng xơ ứng suất cầu có các thành phần là ứng suất trung bình p)

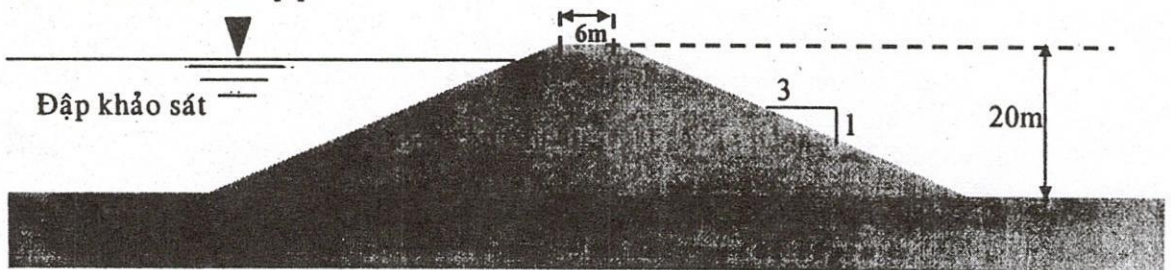
$d\varepsilon_d$ gia số biến dạng do tăng xơ độ lệch ứng suất gây ra.

Các bước tính toán một công trình đất đắp có mái dốc như đê đập, trong bài toán mô phỏng thường được thực hiện theo các bước thời gian để có thể ghi nhận sự phát triển các trường ứng suất; trường biến dạng; trường áp lực nước lỗ rỗng. Trong các trường hợp riêng, khi trường ứng suất tổng không đổi chỉ có ứng suất lệch biến đổi, công bậc hai bằng với sự phân tán năng lượng do biến hình gây ra (trượt).

$$d^2W = dq \times d\varepsilon_d$$

Giá trị gia số d^2W ứng với từng bước tính toán có thể xét khu vực biến dạng dẻo xuất hiện và phát triển trong nền mái dốc, đặc biệt cho nền mái dốc có đầm chặt.

4. BÀI TOÁN KHẢO SÁT [2]

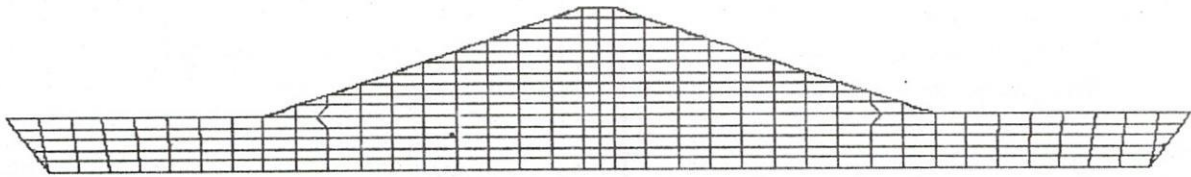


Hình 4. Kích thước bài toán đập đất khảo sát trên Gefdyn

Đối tượng phân tích ổn định cục bộ là một đập có cao 20m, chiều rộng đỉnh là 6m, độ dốc talus 1:3 cả hai phía thượng và hạ lưu. Đập đất đồng nhất, không có lõi chống thấm.

Bài toán phân tích ổn định mái dốc thượng lưu từ trạng thái nước hồ chứa ổn định (18m nước trong hồ) sau nhiều năm cần phải tháo cạn nhanh trong vòng 9 ngày. Tác động duy nhất lên ổn định là sự thay đổi trường áp lực nước lỗ rỗng trong thân đập gây ra sự thay đổi trường ứng suất hữu hiệu sinh ra sự thay đổi trường biến dạng và dẫn đến hệ số an toàn mái dốc giảm. Đập đất đồng nhất Mondely ở Pháp, bị trượt mái dốc thượng lưu khi tháo nước nhanh năm 1981 là một thí dụ điển hình., nhưng để tính toán hệ số an toàn theo các phương pháp mặt trượt trụ tròn không nhận thấy được sự mất ổn định.

Bài toán khảo sát được thực hiện trên chương trình tính GEFDYN (là chương trình tính theo phương pháp phần tử hữu hạn với các quy luật ứng xử vật liệu gồm Mohr-Coulomb; Mohr-Coulomb cải tiến; Hujeux, .. cho đất bão hòa và không bão hòa, cho cả bài toán tĩnh và động), có lưới phần tử như sau:



Hình 5. Lưới phần tử bài toán đập đất khảo sát trên Gefdyn

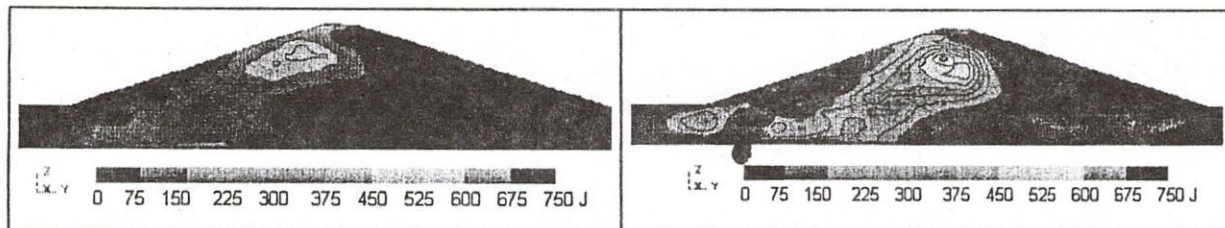
Mô hình đất đàn hồi dẻo được sử dụng là mô hình HUJEUX có các đặc trưng của đất thân đập và nền là cát pha tương ứng như sau: trọng lượng riêng hạt $\gamma_s = 27 \text{ kN/m}^3$; hệ số rỗng $n=0.55$; hệ số Poisson $\nu = 0.25$; góc ma sát thoát nước $\varphi' = 30^\circ$; góc dẫn nở $\psi = 0,9\varphi'$; lực dính $c=1 \text{ kPa}$; hệ số áp lực đất ở trạng thái tĩnh $K=0,5$; $E = 20 \text{ Mpa}$; hệ số thấm phương ngang k_y , hệ số thấm phương đứng k_z ; $k_y = 10k_z = 1E-7 \text{ m/s}$, hệ số thấm của phần tử tiếp xúc mặt đất với nước $k_{suim}=1E-6 \text{ s}^{-1}$. Với hai giả thuyết hệ số nén của nước $C_w = 0$ và $C_w=5E-7 \text{ Pa}^{-1}$

5. KẾT QUẢ VÀ NHẬN XÉT

Các kết quả phân tích dưới đây được tác giả thực hiện năm 1997 tại Trung tâm Quốc gia Thủy công Điện lực Pháp, cho bài toán tháo nước nhanh trong hồ chứa ở thời điểm nước vừa đạt mức thấp nhất, với các tiêu chuẩn bên khác nhau.

Kết quả nền cát pha

Hệ số nén của nước $C_w=0$	Hệ số nén của nước $C_w=5E-7 \text{ Pa}^{-1}$
Hệ số an toàn FS	
Theo tiêu chuẩn biến dạng lệch	
Theo d^2W	



Hình 6. Kết quả đánh giá độ ổn định của mái dốc thượng lưu theo ba tiêu chuẩn [2]

Các kết quả tính toán ổn định mái dốc ở cuối giai đoạn tháo nước trong hồ chứa theo ba tiêu chuẩn: Mohr-Coulomb; Biến dạng lệch và “Công bậc hai” trong hình 6 bên trên, mô phỏng tình trạng ổn định cục bộ trong thân, mái dốc và nền đập đất có xét đến tính nén nhỏ của nước với độ nén $C_w = 5 \times 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$, cho thấy mái dốc thượng lưu đã bị trượt, trong khi đó nếu không xét tính nén của nước thì mái dốc vẫn còn an toàn. Kết quả này lý giải được sự trượt của đập Mondely nêu trên.

Trong bài toán khảo sát trên:

- Vùng trượt theo tiêu chuẩn Mohr-Coulomb ứng với vùng có hệ số an toàn $FS < 1$
- Vùng trượt theo tiêu chuẩn biến dạng lệch ứng với vùng có $\epsilon_d > 2,5\%$
- Vùng trượt theo tiêu chuẩn “Công bậc hai” ứng với vùng có $d^2W < 0$

Tóm lại, cả ba tiêu chuẩn đánh giá ổn định cục bộ của thân đập cho thấy có thể sử dụng các tiêu chuẩn này phân tích đánh giá ổn định mái dốc của công trình đất đắp.

SLOPE STABILITY EVALUATION OF EARTH DAM WITH DIFFERENT CRITERIA

Chau Ngoc An

University of Technology – VNU-HCM

ABSTRACT: *This dissertation is devoted to analyse the slope stability calculations of earth dam at the end of the emptying of the dam reservoir with the three failure criteria: FS of Mohr; the deviator deformation and the Work in second order with Gefyn code of calculation*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Atkinson, *An introduction to the Mechanics of Soils and Foundations*. John Willey, 1993
- [2]. Châu Ngọc Ân, *Analyse de l'influence des caractéristiques mécaniques et hydrauliques sur le comportement des barrages en terre et en enrochement*, Thèse de Docteur, INPG, 1999.
- [3]. Châu Ngọc Ân, *Cơ học đất*, NXB Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh, 2004.
- [4]. Ortigao, *Soil Mechanics in the light of critical state theories, Introduction*, Balkema Rotterdam, Netherlands, 1995.
- [5]. D.M. Wood, *Soil behaviour and critical state soil mechanics*, Cambridge University Press, 1990.
- [6]. O.Coussy, J.M Fleureau, *Mécanique des sols non saturés*, Hermès, Paris, 2002.
- [7]. F. Darve, P.Y. Hicher, J.M. Reynouard, *Mécanique des géomatériaux*, Hermès, Paris, 1995.