

MÔ HÌNH SỐ ỔN ĐỊNH MÁI DỐC BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ RỜI RẠC

NUMERICAL ANALYSIS OF SLOPE STABILITY BY DISCRETE ELEMENT METHOD (DEM)

TS. NGUYỄN THANH HẢI, ThS. NGÔ THANH VŨ

Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng

Email: nthai@dut.udn.vn, ngothanhvu@gmail.com

Tóm tắt: Phân tích sự ổn định mái dốc các công trình xây dựng luôn gặp khó khăn do phụ thuộc vào nhiều yếu tố như hệ số mái, đặc tính của vật liệu, ngoại lực tác động, ... đặc biệt trong trường hợp đập đá đổ phải sử dụng các nghiên cứu theo kinh nghiệm hay theo các công trình tương tự. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng phương pháp phần tử rời rạc để phân tích sự ổn định mái dốc khi xét đến hệ số mái dốc, hệ số ma sát giữa các vật liệu đắp đập đá đổ trong các trường hợp thiết kế. Trong mô hình, các phần tử đá được mô phỏng bởi các phần tử hoàn toàn cứng có hình dạng đa giác ngẫu nhiên, các phần tử này không bị biến dạng. Nghiên cứu này giới thiệu các trường hợp hệ số mái khác nhau để đối sánh với trường hợp theo TCVN đối với đập đá đổ. Mặt khác, chúng tôi giới thiệu các trường hợp mất ổn định do ảnh hưởng của hệ số mái dốc. Mô hình số giới thiệu sự phân bố lực liên kết giữa các phần tử trong thân đập để nhận thấy rõ hơn ứng suất tại các vị trí trong thân đập đá đổ.

Từ khóa: Ổn định mái dốc, đập đá đổ, phương pháp phần tử rời rạc, vật liệu rời rạc

Abstract: The calculation of slope stability is always difficult because it depends on many factor such as slope coefficient, material properties, external forces, ... Rockfill dams are being constructed using experience studies or similar constructions. In this paper, we use a discrete element method to analyze the interactions between the rock elements within the dam body, which affect the slope stabilization of the dam in design cases. Rock elements are simulated by rigid particles that have a random polygonal shape. These rocks are not deformed. This study presents the case of different slopes to compare the TCVN case for rockfill dams. Moreover, we present the instability cases to influence of slope coefficient. The numerical model introduces the distribution of the contact forces between the elements in the dam

body to more clearly identify the stresses at the locations in the dam body.

Key words: Slope stability, rockfill dam, discrete element method, granular material

1. Tổng quan nghiên cứu

Ổn định mái dốc là vấn đề được rất nhiều quan tâm của khoa học trong lĩnh vực xây dựng ở Việt Nam và trên thế giới, ví dụ như: mái taluy công trình giao thông; mái hố móng công trình xây dựng; mái công trình đập, hồ chứa nước sử dụng vật liệu địa phương; vùng đồi núi dễ sạt lở, ... Sự ổn định của mái dốc được đánh giá phụ thuộc vào nhiều yếu tố được xét đến đó là hệ số mái, hệ số ma sát của vật liệu, đặc tính của vật liệu, mực nước ngầm, dòng thấm, cường độ mưa, chấn động, ... [1]–[6].

Hiện nay có nhiều phương pháp nghiên cứu giải quyết bài toán ổn định thường sử dụng hệ số ổn định, tuy vậy vẫn còn đặt ra nhiều vấn đề chưa làm rõ khi vật liệu rời khác với vật liệu có tính kết dính, ảnh hưởng của tác nhân bên ngoài đến tính ổn định, ... Thực vậy, việc xác định hệ số ổn định được sử dụng theo phương pháp cân bằng giới hạn (limit equilibrium method – LEM) được định nghĩa là tỷ số lực chống trượt trên lực gây trượt tại mặt trượt giới hạn [7][8]. Việc xác định hệ số ổn định mái dốc theo phương pháp phần tử hữu hạn (Finite element method – DEM)[3] [4], cung trượt xuất hiện khi có biến dạng lớn xảy ra tại những liên kết, ứng suất cắt nhỏ, cường độ chịu cắt lớn xảy ra lúc này [3]. Tuy nhiên, theo phương pháp DEM, kết quả ổn định mái phụ thuộc rất lớn đến dữ liệu đầu vào khi khai báo trong quá trình tính toán. Phương pháp phần tử rời rạc (Discrete element method – DEM) cũng đã được nghiên cứu để áp dụng tính toán ổn định mái dốc hiện nay, ổn định mái dốc trong phương pháp DEM lúc này xem kết cấu vật liệu là tổ hợp của những phần tử rời rạc liên kết với nhau bởi nội lực, hoặc là tổ hợp của hai thành phần rời rạc và liên tục [1].

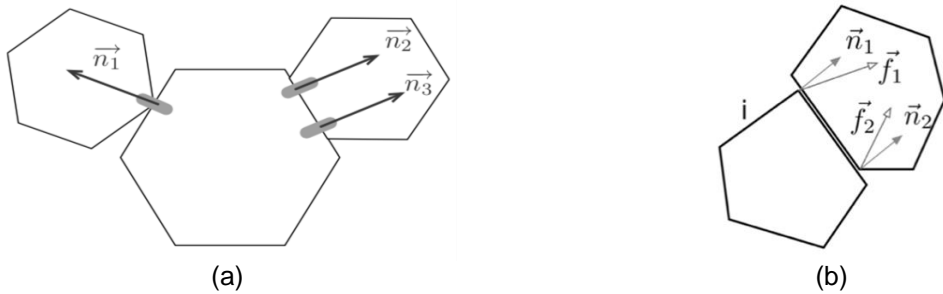
Sự kết hợp phương pháp cân bằng giới hạn và phương pháp phần tử rời rạc (LEM-DEM) để xác định ổn định mái dốc cũng nhận được kết quả khả quan khi thực hiện so sánh kết quả độc lập với LEM hay DEM, hơn nữa có sự phân tích mối tương quan giữa tính liên tục và không liên tục để đánh giá ổn định mái dốc bằng đồ thị [9][10].

Các nghiên cứu đã đề cập đến hệ số ổn định mái dốc, tuy nhiên để thấy rõ hơn trong việc xác định vận tốc chuyển động các phần tử khi kết cấu bị phá hủy, hay sự xuất hiện phá hủy của nội lực,... Do vậy trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất sử dụng phương pháp phần tử rời rạc (DEM) để mô phỏng một bài toán kết cấu đập đá đổ gồm các phần tử đa giác rời rạc cấu thành, tiếp đến mô phỏng quá trình, diễn biến của các mái đập thượng, hạ lưu ứng với các trường hợp thay đổi hệ số mái, thay đổi giá trị hệ số ma sát giữa các phần tử đá để có những phân tích trực quan sự ổn định mái đập. Chúng tôi có những kết luận tại mục 4 với những

kết quả quan trọng ảnh hưởng đến ổn định mái đập và có những định hướng cho nghiên cứu tiếp theo.

2. Phương pháp số

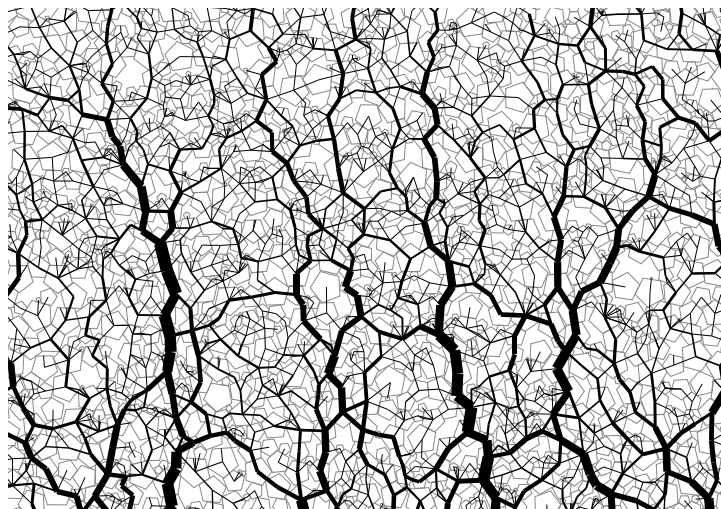
Phương pháp phần tử rời rạc cho phép mô phỏng các bài toán rời rạc hiện nay, những bài toán rời rạc này được xét đến trong môi trường các phần tử rời rạc như đá, cát, bột,...[11][12]. Trong phương pháp này, các phương trình chuyển động của phần tử hoàn toàn cứng được tích hợp bằng cách tính đến các ràng buộc động học do các tương tác tiếp xúc. Những tương tác này được đặc trưng bởi các thông số: hệ số ma sát (khi hệ số ma sát là khác không) và hệ số đàn hồi khi va chạm. Lúc này xem các phần tử hoàn toàn cứng, không có khả năng bị biến dạng. Khi xét đến sự không chồng lấn (overlap) trong quá trình tương tác hay va chạm giữa các phần tử, chúng tôi xem xét giá trị chồng lấn này là bằng không. Tại mỗi tương tác có thể xác định các giá trị lực pháp tuyến cũng như tiếp tuyến khi có xét đến hệ số ma sát [13][14].



Hình 1. Hai loại liên kết giữa các phần tử đa giác: (a) điểm – cạnh (bên trái) được xem như là một điểm liên kết và một véc tơ đơn vị; (b) cạnh-cạnh (bên phải) được xem như là 2 liên kết với hai véc tơ đơn vị song song với nhau.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi quan tâm đến các phần tử có hình dạng là đa giác, do vậy khi xảy ra tương tác giữa các phần tử thì được quan niệm tính như hình 1, trong đó \vec{n} , \vec{f} lần lượt là véc tơ đơn vị và véc tơ lực được xác định tại liên kết. Hệ thống các liên kết tồn tại, hay nói cách khác là các phần tử có xảy ra tương tác, tiếp xúc giữa chúng. Chúng tôi định nghĩa các tương tác tồn tại hay hoạt động khi các điểm tiếp xúc này nhận giá trị lực khác không. Ngược lại, các điểm tiếp xúc không tồn tại giá trị lực là khi giữa hai phần tử không tồn tại tương tác, lúc này không góp phần truyền các ràng buộc trong hệ thống.

Trong hệ thống liên kết, liên kết giữa hai phần tử đa giác được gọi là đơn giản là khi liên kết điểm-cạnh (hình 1a), thì lực pháp tuyến sẽ vuông góc với cạnh. Mặt khác, khi xảy ra liên kết là cạnh-cạnh (hình 1b), lúc này xuất hiện 2 véc tơ đơn vị hay 2 giá trị lực pháp tuyến. Trong trường hợp này, hai giá trị này có thể được quy đổi thành một giá trị đại diện cho mỗi liên kết này [15]. Tuy nhiên, trường hợp liên kết giữa hai phần tử chỉ là điểm-điểm, trường hợp này rất ít khi xảy ra khi hai điểm góc tương tác với nhau. Nhưng khi xảy ra, chúng có thể được coi là một liên kết đơn giản bằng cách tính đến liên kết tiếp theo của 2 phần tử là liên kết điểm-cạnh hoặc cạnh-cạnh như hình 1.



Hình 2. Hệ thống các lực trong tập hợp các phần tử đa giác cứng. Độ đậm của các đường giữa các phần tử là tỷ lệ thuận với độ lớn của lực

Trong mô hình, để thể hiện hệ thống lực tương tác giữa các phần tử đa giác với nhau khi có tiếp xúc, thì chúng tôi thể hiện lực tương tác giữa 2 phần tử là đoạn thẳng nối từ tâm của 2 phần tử đó như hình 2. Độ lớn, độ mảnh của đoạn thẳng này tỷ lệ thuận với giá trị độ lớn của lực tương tác.

Xét trong bài toán ổn định mái dốc đối với vật liệu rời rạc, thì đặc trưng của cường độ cắt (shear strength) vật liệu trong môi trường rời rạc là góc ma sát trong của vật liệu φ và các ten sơ ứng suất σ tại bất kỳ các giai đoạn biến dạng phải được tính toán từ hệ thống liên kết và giá trị lực. Để xác định các ten sơ ứng suất, chúng ta sử dụng mômen lực M của mỗi phần tử thứ i [16]:

$$\vec{M}^i = \sum_i \vec{f}^c r^c \quad (1)$$

trong đó: \vec{f}^c - vec tơ lực tác dụng lên phần tử i tại điểm tiếp xúc c , r^c - khoảng cách từ tâm phần tử i đến điểm đặt của lực. Lưu ý, trường hợp xuất hiện nhiều điểm tiếp xúc tại phần tử i thì tính tổng tất cả các điểm tiếp xúc tại c của các phần tử lân cận với phần tử i . Như vậy có thể chỉ ra rằng mômen lực của tập hợp các phần tử trong hệ thống là tổng số mô men lực của các phần tử thành phần.

Xét trong hệ thống có n phần tử trong miền thể tích V , ten sơ ứng suất được xác định theo công thức [17]:

$$\varphi = \frac{1}{V} \sum \vec{M} = \frac{1}{V} \sum \vec{f}^c l^c \quad (2)$$

trong đó: l^c - khoảng cách nối tâm giữa 2 phần tử tiếp xúc.

Xét trong bài toán ứng suất phẳng 2 chiều, chúng ta có thể xác định được ứng suất trung bình $p = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)$ và ứng suất lệch $q = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$, trong đó σ_1 và σ_2 là các ứng suất chính.

Góc ma sát trong φ của vật liệu rời được xác định từ giá trị trung bình của q/p tại một trạng thái nhất định của vật liệu và nó đại diện cho cường độ cắt nội tại của vật liệu.

$$\sin \varphi = q/p \quad (3)$$

Xét trong quan hệ ứng suất biến dạng của Coulomb trong bài toán ứng suất phẳng ta có thể xác định được quan hệ:

$$\sigma_t = C + \tan \varphi \sigma_n \quad (4)$$

trong đó: σ_t, σ_n lần lượt là thành phần ứng suất tiếp và ứng suất pháp, C là lực kết dính đơn vị giữa các phần tử. Xét cho phương chính hợp với mặt phẳng ngang một góc α thì thành phần ứng suất tiếp và ứng suất pháp được thể hiện như sau:

$$\sigma_{n(\alpha)} = p + q \cos(2\alpha) \quad (5)$$

$$\sigma_{t(\alpha)} = q \sin(2\alpha) \quad (6)$$

Như vậy, áp dụng phương pháp phần tử rời rạc trong môi trường vật liệu rời cho phép chúng ta có thể xác định được các thành phần ứng suất, thành phần lực tại các liên kết tiếp xúc chi tiết bên trong vật liệu. Đây là điều kiện để vận dụng phương pháp phần tử rời rạc để phân tích ổn định mái dốc, taluy, mái đập, ... sử dụng vật liệu rời được xét theo công thức:

$$K = \frac{C + \tan \varphi \sigma_n}{\sigma_t} \quad (7)$$

trong đó: K - hệ số ổn định, nếu $K < 1$ thì mái dốc

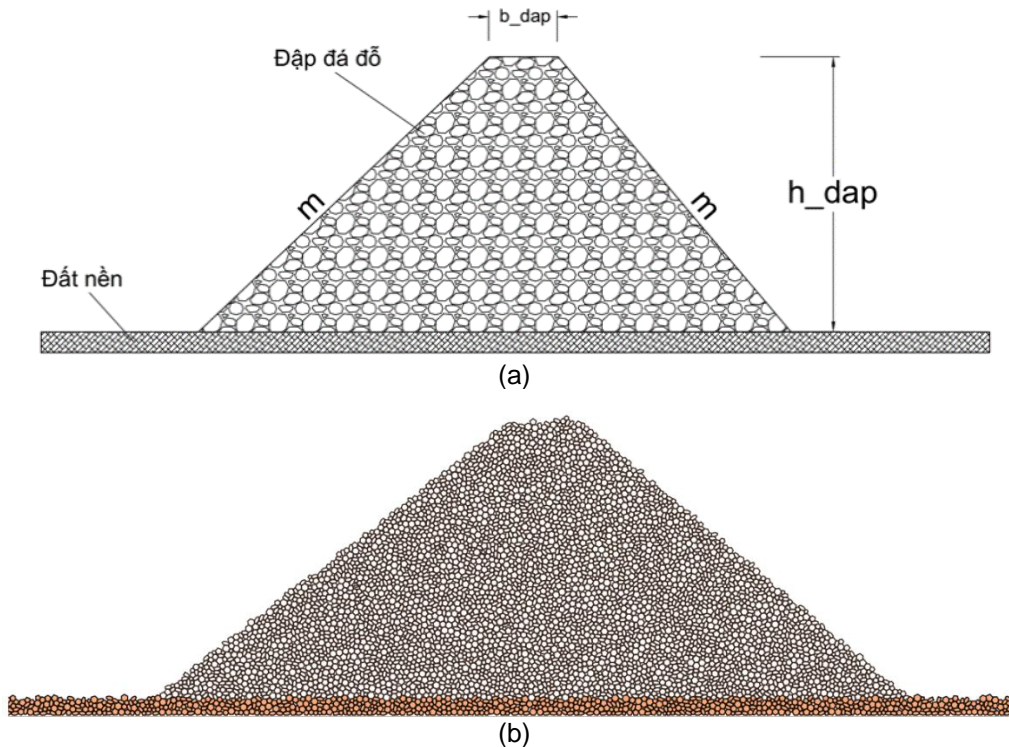
có khả năng xảy ra trượt mái miền thể tích xác định, ngược lại nếu $K \geq 1$ thì mái đập đảm bảo ổn định. Khi giá trị K càng lớn thì khả năng ổn định càng cao.

3. Bài toán áp dụng đập đá đổ

3.1 Mô hình các trường hợp hệ số mái dốc

Trong nghiên cứu này chúng tôi tập trung phân

tích ổn định mái của đập đá đổ theo tiêu chuẩn Việt Nam [18], chúng tôi giới thiệu các trường hợp tính toán khi hệ số mái thay đổi từ $m = 1,2; 1,3; 1,4$ cho thượng và hạ lưu. Bên cạnh đó xét hai trường hợp trên khi có hệ số ma sát $\mu = 0,5$ và trường hợp không có xét đến ma sát ($\mu = 0,0$) giữa các phần tử đá. Hệ số ma sát $\mu = 0,5$ khi tương tác với nền cho hai trường hợp trên.



Hình 3. Mô phỏng hình dạng đập đá đổ: (a) Thể hiện các thông tin của đập đá đổ một khối; (b) Mô phỏng toán hình dạng đập đá đổ bằng các phần tử rời rạc.

Như hình 3 giới thiệu mô hình đập đá đổ một khối khi mái thượng lưu và hạ lưu có hệ số mái lần lượt là $m = 1,3$ và $1,2$, có vật liệu là đá cứng. Đập có chiều cao $h_{\text{đập}}$, bề rộng đỉnh đập $b_{\text{đập}}$ lần lượt là 15m và 1,45m tựa lên trên nền đá cứng không bị biến dạng theo TCVN (hình 3a). Trong mô hình số, đập đá đổ được mô phỏng bởi rất nhiều các phần tử đá, các phần tử này là hoàn toàn cứng, không bị biến dạng (phần tử màu đen) hình 3b có kích thước $d = [100-300]$ mm có khối lượng riêng là $2,5(\text{g}/\text{cm}^3)$. Gia tốc trọng trường

trong mô hình được chọn là $9,81 (\text{m}/\text{s}^2)$. Chúng tương tác với nhau bởi sự truyền lực tác dụng qua lại giữa chúng như được giới thiệu ở phần trước. Các phần tử đá này có hình dạng là các đa giác, có số cạnh thay đổi từ 4 đến 8 cạnh. Độ rỗng trong thân đập đang xét chiếm khoảng 20% thể tích của thân đập, thoả mãn điều kiện quy định trong TCVN. Nền đập được trình bày là một tổ hợp (Cluster) các phần tử không biến dạng, không chuyển vị làm việc độc lập, chỉ tiếp nhận lực tương tác với thân đập (màu đậm).

Bảng 1. Thông tin các mô hình mô phỏng

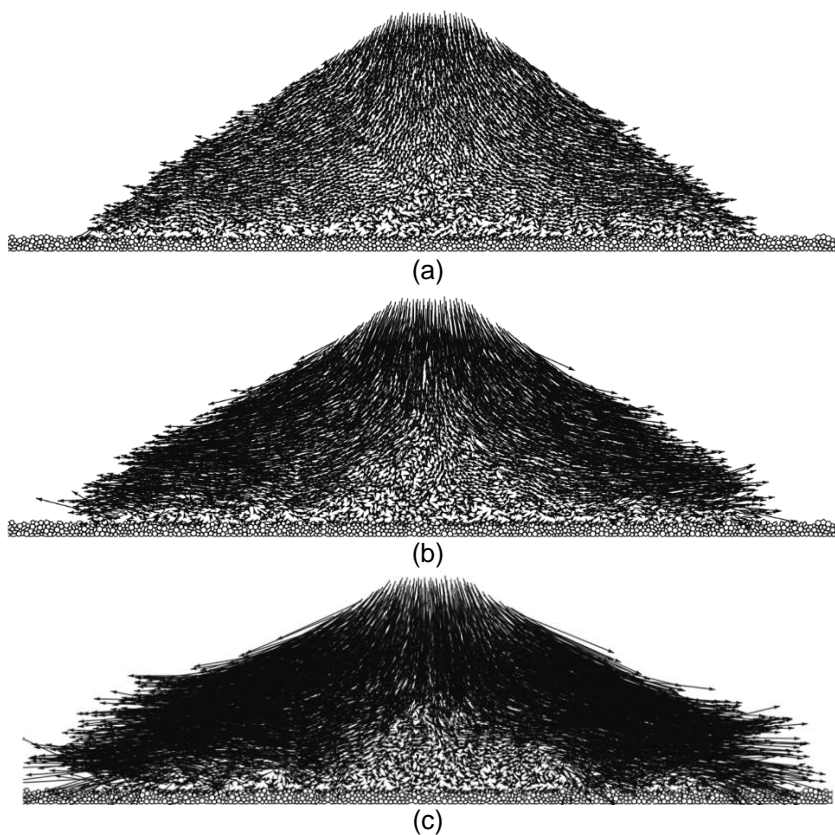
Mã hiệu	Thông tin hệ số mái thượng lưu - hạ lưu		Số lượng phần tử N_p	Số lượng liên kết ban đầu N_c
	Mái thượng lưu m1	Mái hạ lưu m2		
M22	1,2	1,2	4235	8195
M32	1,3	1,2	4862	9483
M43	1,4	1,3	5226	11019

Số lượng các phần tử có sự khác nhau như bảng 1, hệ số mái khác nhau giữa các mô hình nên số lượng phần tử tham gia trong mô hình mô phỏng cũng khác nhau. N_p là tổng số phần tử được mô phỏng, N_c là số lượng liên kết tại mỗi bước tính toán của mô phỏng. Liên kết được định nghĩa như đã thảo luận tại phần 2 (phương pháp số).

3.2 Xét ổn định mái dốc

Trong bài báo này, chúng tôi xét đến sự ổn định của mái dốc dưới tác dụng của trọng lực. Dưới tác dụng của trọng lực các phần tử trong thân đập chỉ tương tác với nhau thông qua quá trình dịch chuyển, chuyển vị gây mất ổn định mái. Trong trường hợp này, hệ số mái của đập được thay đổi từ 1,2; 1,3; 1,4 để kiểm tra các điều kiện trên.

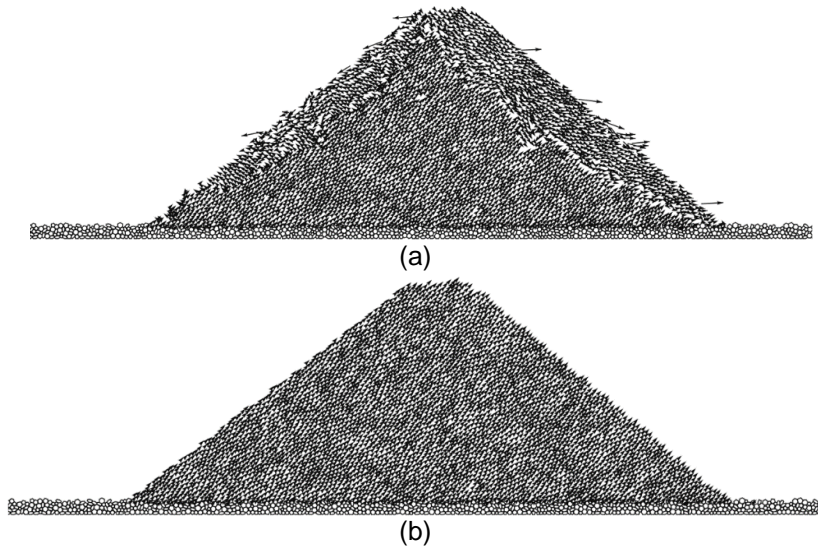
Hình 4 mô tả sự mất ổn định của đập đá đổ khi hệ số ma sát giữa các phần tử đá $\mu = 0,0$. Giá trị độ lớn của mũi tên là giá trị vận tốc của phần tử. Chúng ta có thể nhận thấy các mũi tên đại diện cho mỗi phần tử hướng về thượng lưu và hạ lưu. Lúc này, chúng tạo nên một cung trượt khá lớn. Bởi hệ số ma sát giữa các phần tử $\mu = 0,0$ do đó dưới tác dụng của trọng lực G , các phần tử có xu hướng trượt lên các phần tử dưới nó hay nói cách khác là giá trị gây trượt lớn hơn giá trị chống trượt (hình 4b). Lúc này các phần tử ở giữa đập ít có sự dịch chuyển, phần tử ở dưới chân đập đang xoay do ảnh hưởng của cung trượt. Do sự mất liên kết giữa các phần tử đá này đã làm xuất hiện cung trượt và phá hủy kết cấu đập tại mái thượng hạ lưu như hình 4c.



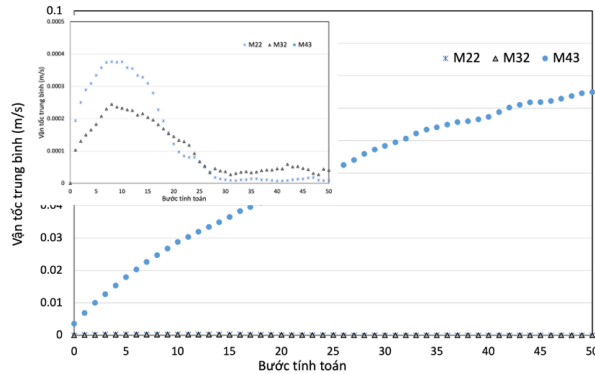
Hình 4. Mô phỏng quá trình mất ổn định của mái đập đá đổ cho trường hợp hệ số mái thượng, hạ lưu lần lượt là 1,4 và 1,3: (a) trạng thái bắt đầu mất ổn định; (b) trạng thái xuất hiện cung trượt lớn; (c) trạng thái trượt mái.

Xét trong trường hợp có ma sát giữa các phần tử $\mu = 0,5$, chúng tôi chọn phân tích cho trường hợp hệ số mái thượng, hạ lưu lần lượt là 1,3 và 1,2 như hình 5a,b. Hình 5a, tại thời điểm ban đầu, chúng ta quan sát được hình dạng 02 cung có thể gây trượt mái. Có thể quan sát thấy, hình dạng cung trượt ở mái hạ lưu lớn hơn thượng lưu, điều khác biệt này là do sự ảnh

hưởng của hệ số mái thượng lưu $m = 1,3$ trong khi hệ số mái của hạ lưu $m = 1,2$. Tuy nhiên giá trị của các mũi tên này nhỏ, chứng tỏ các phần tử đá có sự dịch chuyển hay là chuyển vị bé so với vị trí ban đầu. Dưới tác dụng của thành phần ma sát giúp làm tăng giá trị chống trượt cho kết cấu, kháng được thành phần gây trượt để duy trì được sự ổn định mái đập như hình 5b.



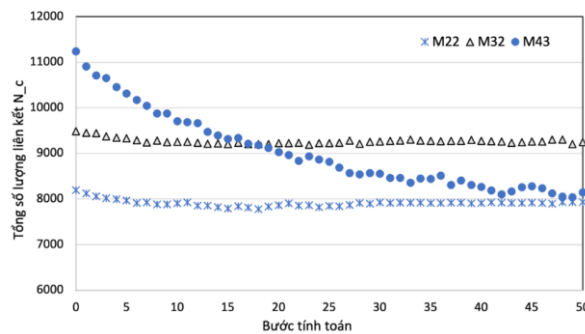
Hình 5. Mô phỏng quá trình mất ổn định của mái đập đá đổ cho trường hợp hệ số mái thượng, hạ lưu lần lượt là 1,3 và 1,2: (a) trạng thái ban đầu; (b) trạng thái ổn định



Hình 6. Quan hệ giữa vận tốc trung bình của các phần tử qua các bước tính toán mô phỏng

Hình 6 thể hiện kết quả vận tốc trung bình của toàn bộ các phần tử tham gia các mô phỏng qua các bước tính toán, hình nhỏ bên trong thể hiện 2 mô phỏng M22 và M32. Chúng ta có thể thấy rằng, sự bất ổn định của mô phỏng M43 khi vận tốc trung

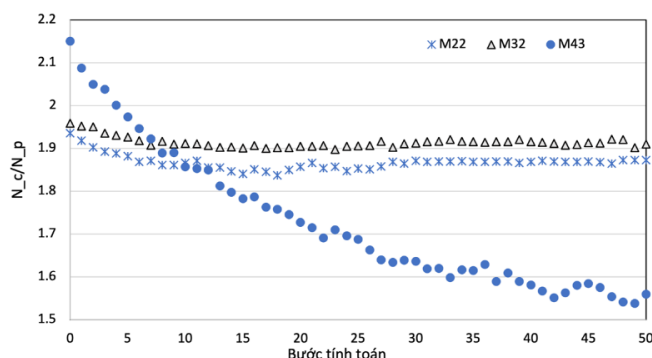
bình của toàn bộ các phần tử qua các bước tính toán tăng lên dẫn đến phá vỡ kết cấu đập. Trong khi đó, mô phỏng M22 và M32 ban đầu có sự sắp xếp (cố kết) trong kết cấu đập, sau đó thì ổn định ở các bước tính toán tiếp theo sau.



Hình 7. Quan hệ giữa tổng số liên kết N_c qua các bước tính toán

Quá trình diễn biến sự mất ổn định của đập đá đổ được thể hiện rõ hơn khi tổng số lượng liên kết giữa các phần tử N_c trong mô phỏng M43 giảm đi rõ rệt như hình 7 và hình 8. Tỷ lệ N_c tại thời điểm bước tính toán thứ 50 so với ban đầu đã giảm đi 27% trong hình 7, và tỷ lệ trung bình N_c/N_p trong hình 8 của mô phỏng M43 giảm từ 2,15 xuống 1,55.

Sự đứt gãy, mất liên kết giữa các phần tử làm giảm ứng suất của đập do không nhận được thông tin tương tác như trình bày trong các phương trình tính toán ở phần 2. Mặt khác số lượng N_c qua các bước tính toán và tỷ lệ trung bình N_c/N_p giảm không đáng kể do sự cố kết, ổn định của mô phỏng M22, M32 như hình 7, và hình 8.

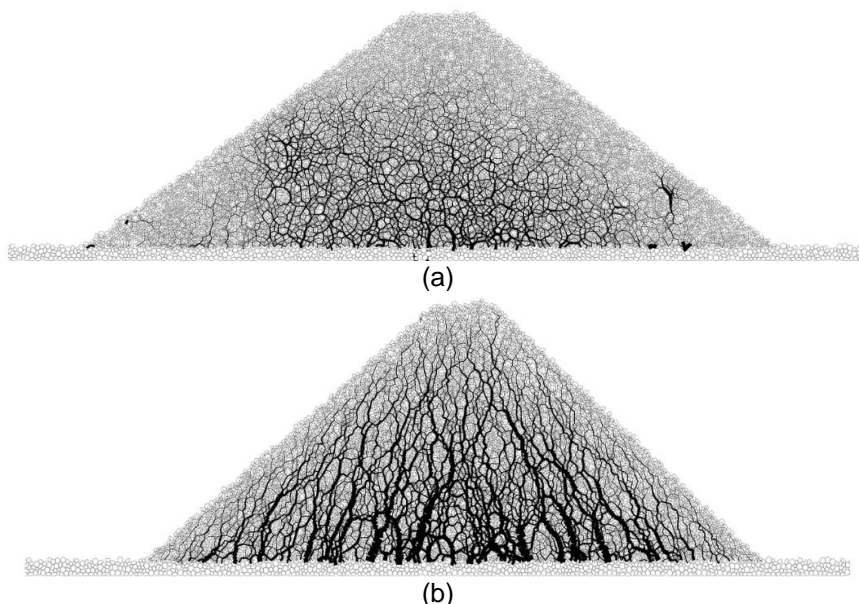


Hình 8. Trung bình của tổng số liên kết N_c với tổng số phân tử trong mỗi mô hình N_p qua các bước tính toán

3.3 Phân bố nội lực trong các trường hợp

Hình 9a,b giới thiệu sự phân bố lực pháp tuyến trong thân đập dưới tác dụng của trọng lực G , các giá trị đại số lực lớn được thể hiện bằng độ lớn của

các đường màu đen đậm, ngược lại khi giá trị nhỏ thì được thể hiện bằng các đường màu đen nhỏ hơn. Các đường lực pháp tuyến này nối giữa tâm các phân tử với nhau khi có tương tác.



Hình 9. Sự phân bố lực pháp tuyến f_n trong thân đập dưới tác dụng của trọng lực G cho hai trường hợp xét ổn định ở mục 3.2

Chúng ta dễ dàng nhận thấy sự phân bố lực tập trung ở bản đáy lớn tại giữa thân đập vì toàn bộ tải trọng của đập được truyền trực tiếp xuống, tại các vị trí biên (phía trên đỉnh đập, hai bên mái đập) thì giá trị lực này nhỏ bởi tải trọng tác dụng lên các phân tử nhỏ.

Trong trường hợp không có ma sát, sự phân bố nội lực đều lên bản đáy dưới tác dụng của trọng lực G , giới hạn trong phạm vi đáy của đập (hình 9a). Có thể quan sát thấy rằng, sự phân bố tương đối đồng đều giá trị lực, tuy nhiên tại vị trí biên thì giá trị rất nhỏ, giảm dần và không có liên kết. Điều này chứng tỏ đã có sự mất dần liên kết, hay nói cách khác là bắt đầu có xu hướng xuất hiện sạt hay trượt mái, được thể hiện rõ trong phần trên.

Trái lại, trong trường hợp có ma sát, chúng ta có thể nhận thấy sự phân bố lực này theo dạng hình chóp và có dạng tương đồng với hình dạng của đập (hình 9b). Lúc này dễ dàng thấy lực liên kết giữa các phân tử thể hiện rõ nét, dưới tác dụng của tải trọng bản thân các phân tử tại tâm xuất hiện giá trị lực lớn, và nhỏ dần ra mái. Khi có ma sát giữa các phân tử, giá trị lực chống trượt tăng lên kháng được thành phần gây trượt, lúc này thành phần lực sẽ kéo (giữ) các phân tử gây trượt.

4. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã sử dụng phương pháp phân tử rời rạc DEM để mô phỏng mối liên kết giữa các phân tử đa giác được lập trình

trên môi trường ngôn ngữ C++. Chương trình mô hình mô phỏng được kế thừa và phát triển từ mã nguồn mở GDM_TK(2D) của Viện nghiên cứu Cơ học và Xây dựng (LMGC), Trường Đại học Montpellier, Pháp. Đại diện cho phần tử đá trong thân đập đá đổ, xem xét sự ảnh hưởng của các đặc trưng đến việc ổn định mái đập. Trong nghiên cứu này, chúng tôi giới hạn các mô phỏng ở phạm vi 2 chiều, mô phỏng đập đá đổ với chiều cao $h_{\text{đập}}$, bề rộng đỉnh đập $b_{\text{đập}}$ và các trường hợp thay đổi hệ số ma sát thượng, hạ lưu đập m . Đập được đặt trên nền hoàn toàn cứng, không chuyển vị và biến dạng. Các liên kết giữa các phần tử ứng với trường hợp nếu không có hệ số ma sát và có xét đến hệ số ma sát $\mu = 0,5$. Liên kết giữa đập với nền được giới hạn bởi các liên kết các phần tử đá với phần tử đá của nền với hệ số ma sát $\mu = 0,5$. Không xét đến trường hợp có nước tại thượng lưu và hạ lưu đập; bỏ qua ảnh hưởng của mực nước ngầm, dòng thấm.

Những kết quả nghiên cứu đạt được cho thấy rằng, ảnh hưởng hệ số ma sát đến việc ổn định mái đập là lớn. Khi thay đổi hệ số ma sát thượng, hạ lưu từ 1,2 đến 1,4 thì mất ổn định, xuất hiện cung trượt, trượt mái đập trong trường hợp không xét hệ số ma sát. Tuy nhiên khi hệ số ma sát khác không cụ thể là 0,5 thì tại trường hợp mái ứng với hệ số 1,2 có xuất hiện tình trạng mất ổn định tạm thời, tuy nhiên ổn định khi thời gian kéo dài. Do sự xuất hiện của lực tiếp tuyến, cũng như có sự gia tăng của giá trị phần chống trượt mái. Hơn nữa, trong bài báo này cũng giới thiệu chi tiết sự phân bố lực liên kết giữa các phần tử để làm cơ sở đối sánh, phân tích khi xuất hiện sự mất ổn định. Tuy nhiên, nghiên cứu này chỉ tập trung xét đến trường hợp đập đá đổ là đồng nhất một khối, trong trường hợp đã hoàn thành quá trình thi công nhưng chưa tích nước. Nghiên cứu tiếp theo sẽ quan tâm xem xét sự ảnh hưởng của các thành phần như mực nước thượng, hạ lưu, xói ngầm, động đất, ổn định đất nền, ứng suất biến dạng của đập, đập với nền.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số: T2022-02-25

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Y. Lu, Y. Tan, and X. Li (2018), "Stability analyses on slopes of clay-rock mixtures using discrete element method", *Eng. Geol.*, vol. 244, no. July, pp. 116–124.
2. L. Nansheng, T. Bo, and X. Lihui (2015), " Slope Stability Analysis of Earth-Rockfill Dams Using MGA

- and UST", *J. Comput. Eng.*, vol. 2015, pp. 1–10.
3. D. V. Griffiths and P. A. Lane (1999), "Slope stability analysis by finite elements", *Geotechnique*, vol. 49, no. 3, pp. 387–403.
4. J. Hu, J. Feng, X. Xu, F. Guo, and C. Yang (2017), "Study on Calculation of Slope Safety Factor by Strength Reduction Finite Element Method", *DEStech Trans. Eng. Technol. Res.*, no. icaenm, pp. 467–473.
5. H. Chen and C. F. Lee (2003), "A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes," *Geomorphology*, vol. 51, no. 4, pp. 269–288.
6. D. mei Sun, X. min Li, P. Feng, and Y. ge Zang (2016), "Stability analysis of unsaturated soil slope during rainfall infiltration using coupled liquid-gas-solid three-phase model", *Water Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 183–194.
7. D. ping Deng, L. Li, and L. heng Zhao (2017), "Limit equilibrium method (LEM) of slope stability and calculation of comprehensive factor of safety with double strength-reduction technique", *J. Mt. Sci.*, vol. 14, no. 11, pp. 2311–2324.
8. S. Y. Liu, L. T. Shao, and H. J. Li (2015), "Slope stability analysis using the limit equilibrium method and two finite element methods", *Comput. Geotech.*, vol. 63, pp. 291–298.
9. W. J. Xu, S. Wang, and M. Bilal (2020), "LEM-DEM coupling for slope stability analysis", *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 63, no. 2, pp. 329–340.
10. Y. Guan, X. Liu, E. Wang, and S. Wang (2017), "The stability analysis method of the cohesive granular slope on the basis of graph theory", *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 3.
11. F. Radjai and V. Richefeu (2009), "Mechanics of Materials Contact dynamics as a nonsmooth discrete element method", vol. 41, pp. 715–728.
12. F. Radjai and F. Dubois (2011), *Discrete-element modeling of granular materials*. Wiley-Iste.
13. T. H. Nguyen, S. Nezamabadi, J. Y. Delenne, and F. Radjai (2017), "Compaction of granular materials composed of deformable particles", *EPJ Web Conf.*, vol. 140, pp. 4–7.
14. S. Nezamabadi, T. H. Nguyen, J. Y. Delenne, and F. Radjai (2017), "Modeling soft granular materials", *Granul. Matter*, vol. 19, no. 1, pp. 1–12.
15. D. H. Nguyen, É. Azéma, P. Sornay, and F. Radjai (2018), "Rheology of granular materials composed of crushable particles", *Eur. Phys. J. E*, vol. 41, no. 4.
16. F. Radjai, D. E. Wolf, S. Roux, M. Jean, and J. J. Moreau (1997), "Force networks in dense granular media", in *Powders & Grains 97*, R. P. Behringer and J. T. Jenkins, Eds. Rotterdam: Balkema, pp. 211–214.
17. J. J. Moreau (1997), "Numerical Investigation of Shear Zones in Granular Materials", in *Friction, Arching, Contact Dynamics*, pp. 233–247.
18. TCVN 10777-2015 (2014), "Công trình thủy lợi – Đập đá đổ bản mặt bê tông – Yêu cầu thiết kế".

Ngày nhận bài: 03/6/2022.

Ngày nhận bài sửa: 28/6/2022.

Ngày chấp nhận đăng: 28/6/2022.

