

PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH MÁI ĐẬP ĐÁ ĐỒ BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ RỜI RẠC

Nguyễn Thanh Hải¹

Tóm tắt: Hiện nay việc tính toán hệ số mái cho các loại đập đá đồ vẫn còn nhiều hạn chế trong các nghiên cứu ở Việt Nam. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng phương pháp phần tử rời rạc DEM để phân tích sự tương tác giữa các phần tử đá bên trong thân đập, ảnh hưởng đến ổn định mái của đập. Trong mô hình 2 chiều (2D), các phần tử đá được mô phỏng bởi các phần tử hoàn toàn cứng có hình dạng đa giác. Các hạt này không bị biến dạng. Nghiên cứu này chỉ xét đến ảnh hưởng của trọng lực lên đập, kết quả nghiên cứu thể hiện miền thể tích của những phần tử có chuyển vị lớn, xu hướng bứt phá ra khỏi kết cấu mái đập. Bằng phương pháp DEM, chúng tôi xác định được hệ số ổn định mái đập cho các phần thể tích, chỉ rõ vị trí trượt mái của kết cấu đập. Kết quả nghiên cứu cũng thể hiện trường vận tốc của phần trượt mái.

Từ khóa: Vật liệu rời rạc, ổn định mái đập, hệ số ổn định mái, đập đá đồ, phương pháp phần tử rời rạc.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vấn đề ổn định mái dốc, mái đập đá đồ được nghiên cứu khá rộng rãi hiện nay, mặc dù vẫn còn nhiều bài toán chưa thể giải quyết triệt để. Trong bối cảnh đó, ổn định mái dốc đối với các công trình xây dựng như ổn định mái dốc đường, ổn định mái cho các đập giữ nước,... đang được quan tâm rất lớn. Chính vì có quá nhiều tham số đặc trưng gây ảnh hưởng đến việc ổn định của mái đập như là hệ số mái, hệ số ma sát, đặc tính của vật liệu, mực nước ngầm, mưa...(L. Nansheng et al., 2015, S. Keming, M.R. Bagale, 2012, N.M. Pinyol et al., 2008) đã gây bất lợi cho công trình. Việc ứng dụng các phương pháp số để giải quyết nó cũng đang đặt ra nhiều vấn đề chưa làm rõ. Trong các phương pháp số thực hiện việc tính toán ổn định mái dốc, phải kể đến phương pháp cân bằng giới hạn (limit equilibrium method - LEM) đã được sử dụng khá phổ biến. Hệ số ổn định - the safety factor trong phương pháp này được định nghĩa là tỷ số lực chống trượt trên lực trượt tại mặt trượt tới hạn.

Trong các phương pháp số, phương pháp phần tử hữu hạn (Finite element method - FEM) cũng

được xem xét xác định hệ số ổn định mái dốc (D.V Griffiths, P.A Lane, 1999). Cung trượt xuất hiện khi xảy ra biến dạng lớn tại những liên kết, lúc này ứng suất cắt nhỏ, cường độ chịu cắt lớn, kết quả ổn định mái phụ thuộc rất lớn đến dữ liệu đầu vào khi khai báo trong tính toán.

Một phương pháp khác nghiên cứu ổn định mái dốc hiện nay có phương pháp phần tử rời rạc (Discrete element method - DEM)(Y. Guan et al., 2017, Y. Lu et al., 2018). Khi xét đến sự ổn định mái dốc, xem kết cấu là tổ hợp của những phần tử rời rạc liên kết với nhau (K.J. Chang, A. Taboada, 2009) hoặc là tổ hợp của 2 thành phần rời rạc và liên tục (Y. Lu, 2018).

Một số nghiên cứu đã sử dụng kết hợp phương pháp cân bằng giới hạn và phương pháp phần tử rời rạc (DEM)(E. Li et al., 2014, W.J. Xu et al., 2019, Y. Guan et al., 2017) để phân tích ổn định mái dốc cũng nhận được kết quả khả quan khi so sánh độc lập với LEM hay DEM. Công trình nghiên cứu (W. Zheng et al., 2014) phân tích mối tương quan giữa tính liên tục và không liên tục để đánh giá ổn định mái dốc bằng đồ thị.

Đặc điểm phương pháp phần tử rời rạc là có xét đến chi tiết bên trong vật liệu, sự liên kết giữa các phần tử cấu thành vật liệu. Điều này cho phép chúng ta nghiên cứu ở phạm vi cấu trúc của vật

¹ Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

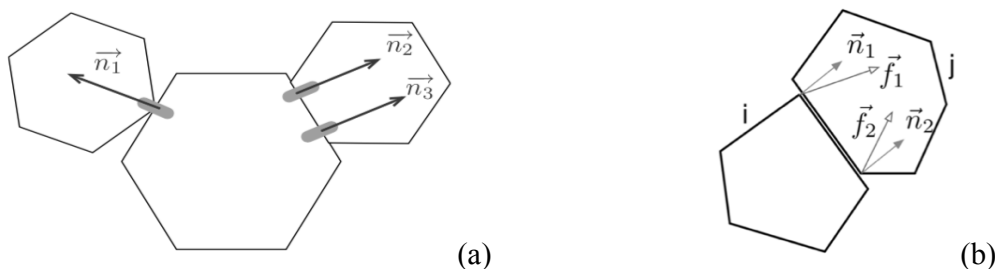
liệu (F. Radjai, F. Dubois 2011, F. Radjai and V. Richefeu 2009, S. Nezamabadi et al. 2017). Do vậy, việc xem xét vật liệu bị phá hủy khi giữa các phần tử mất liên kết tạm thời hay liên kết bị phá bỏ hoàn toàn. Chính điều này gây ra sự trượt kết cấu hay phá hủy một phần của kết cấu. Sự phản ánh chi tiết diễn biến các liên kết các phần tử trong phương pháp phần tử rời rạc cho phép chỉ rõ được quá trình, vị trí của liên kết hay sự phá hủy liên kết.

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng cho trường hợp ổn định mái dốc đập đá đổ được cấu thành từ các phần tử đa giác (xem mục 2, mục 3). Mô phỏng kết cấu đập để có những phân tích sự ổn định mái dốc, thể hiện trường vận tốc (xem mục 4). Chúng tôi có những kết luận tại mục 5 với những kết quả

phản ánh ổn định mái dốc và có những định hướng cho nghiên cứu tiếp theo.

2. PHƯƠNG PHÁP SỐ

Phương pháp phần tử rời rạc DEM cho phép mô phỏng các bài toán trong môi trường các phần tử rời rạc như đá, cát, bột, ... (F. Radjai, F. Dubois 2011, F. Radjai and V. Richefeu 2009). 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, hệ số đàn hồi khi va chạm, lực dính giữa các phần tử. Tại mỗi tương tác có thể xác định các giá trị lực pháp tuyến khi có xét đến hệ số ma sát, lực dính (T.H Nguyen et al. 2017, S. Nezamabadi et al. 2017, K. Krabbenhoft et al. 2012).



Hình 1. Hai loại liên kết giữa các phần tử đa giác (a) liên kết điểm - cạnh (bên trái); cạnh-cạnh (bên phải); (b) xác định véc tơ đơn vị \vec{n} và lực \vec{f} tại liên kết

Xét trong hệ thống nhiều phần tử, sự tương tác trong hệ thống được mô tả bằng những đại lượng vô hướng thể hiện khả năng liên kết giữa các phần tử như hình 1. Lúc này trong hệ thống tồn tại mạng lưới các tiếp xúc tương tác giữa các phần tử. Các điểm tiếp xúc này được xem hoạt động khi các điểm tiếp xúc nhận giá trị lực khác không. Ngược lại, các điểm tiếp xúc không hoạt động là khi giữa hai phần tử không tồn tại tương tác lực, không góp phần vào việc truyền các ràng buộc. 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 a,b. Xác định liên kết giữa hai phần tử đa giác, đối với liên kết đơn giản là điểm - cạnh thì lực pháp tuyến sẽ vuông góc với cạnh. Ngược lại khi liên kết là cạnh - cạnh, lúc này xuất hiện 2 véc tơ đơn vị và 2 giá trị lực pháp tuyến.

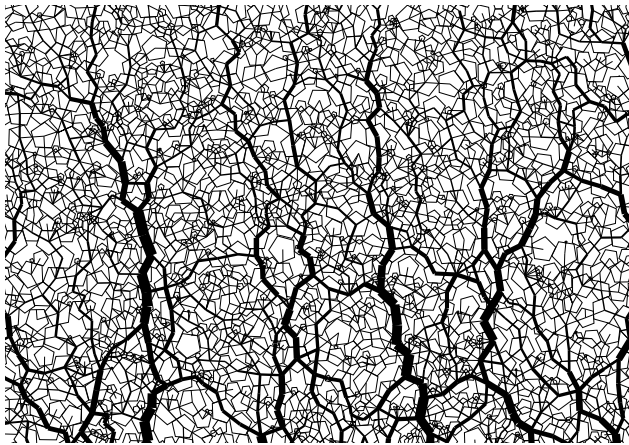
Trong trường hợp này, hai giá trị này có thể được quy đổi thành một giá trị đại diện cho mỗi liên kết này (D.H. Nguyen et al. 2018). Ngoài ra, trường hợp liên kết giữa hai phần tử chỉ là điểm - điểm, trường hợp này rất ít khi xảy ra. Nếu trường hợp tiếp xúc điểm - điểm tồn tại, (D.H. Nguyen et al. 2015, 2018) đề xuất xem chúng là một liên kết đơn giản giữa 2 phần tử hoặc liên kết điểm - cạnh hoặc cạnh - cạnh. Hình 2 giới thiệu hệ thống các lực trong tập hợp các phần tử đa giác cứng. Lực tương tác giữa 2 phần tử thể hiện bởi đoạn thẳng nối 2 phần tử đó. Độ đậm, nhạt của đoạn thẳng này tỷ lệ thuận với giá trị độ lớn của lực tương tác.

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 tensor 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-
sor ứng suất, chúng ta sử dụng mômen lực M^i của
mỗi phần tử (particle i) (J. J. Moreau, 1997):

$$\overline{M}^i = \sum_c \overline{f}^c r^c \quad (1)$$

Trong đó, \overline{f}^c là vector lực tác dụng lên phần tử
 i tại điểm tiếp xúc c , r^c là khoảng cách từ tâm
phần tử i đến điểm đặt của lực. 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 mômen lực của các phần tử thành phần.



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

Xét trong trong hệ thống có n phần tử trong
miền thể tích V , tensor ứng suất được xác định theo
công thức (J. J. Moreau, 1997):

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

Trong đó, l^c khoảng cách nối tâm giữa 2 phần
tử tiếp xúc.

Từ đây, 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 trong bài toán phẳng 2 chiều.

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 (J. Mitchell and K. Soga,
2005) 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:

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

Trong đó σ_c, σ_n lần lượt là thành phần ứng
suất tiếp và ứng suất pháp, C là lực dính kết 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:

$$\sigma_n(\alpha) = p + q \cos(2\alpha) \quad (5)$$

$$\sigma_c(\alpha) = q \sin(2\alpha) \quad (6)$$

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 chi tiết bên trong vật liệu. Đây là điều
kiện để vận dụng phương pháp phần tử rời rạc
phân tích ổn định mái dốc, taluy, mái đập,... sử
dụng vật liệu rời.

3. ÁP DỤNG TÍNH TOÁN ỔN ĐỊNH MÁI ĐẬP ĐÁ ĐỔ

Trong bài báo này chúng tôi thực hiện mô hình
bài toán đập đá đổ gồm các phần tử đa giác dựa
trên tỷ lệ cấp phối hàm lượng các hạt như bảng 1
theo TCVN10777:2015 “Công trình thủy lợi - Đập
đá đổ bản mặt bê tông – yêu cầu thiết kế”.

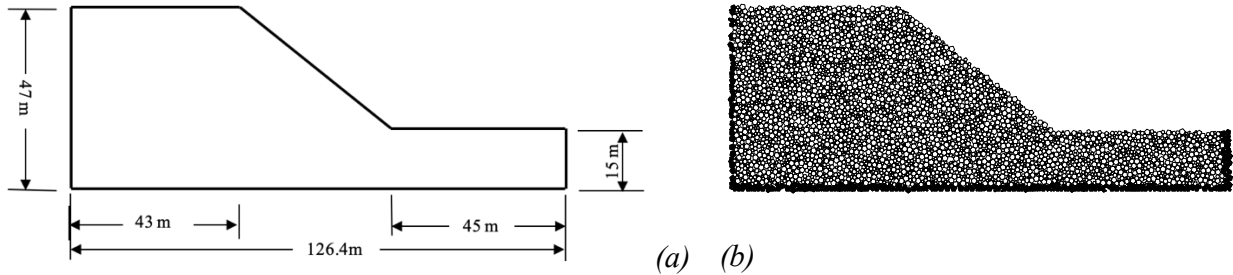
Bảng 1. Tỷ lệ hàm lượng các hạt trong mô hình

STT	Hàm lượng hạt	Kích thước hạt
1	5%	$d = [0.05 - 0.075] \text{mm}$
2	20%	$d = [0.075 - 5] \text{mm}$
3	75%	$d = [5 - 800] \text{mm}$

Phần tử đá được mô phỏng trong mô hình là
các hạt có hình dạng đa giác với số cạnh từ 5-8
cạnh. Phần tử hạt có hình dạng đơn giản là các đa
giác đều, kích thước khác nhau. Các phần tử đá

mô phỏng trong bài báo này là các hạt hoàn toàn cứng, không bị biến dạng, có khối lượng riêng là $2,5(\text{g}/\text{cm}^3)$. Xét đến sự ma sát giữa các phần tử, trong mô hình chúng tôi mặc định hệ số ma sát μ giữa các phần tử là 0,5. Góc ma sát trong của vật liệu φ có thể được xác định theo công thức (3) cho vật liệu rời rạc. Đối với vật liệu là phần tử đá có dạng các đa giác, D.H Nguyen et al., chỉ rõ tỷ số q/p tại trạng thái tới hạn nằm trong phạm vi từ 0,4 đến 0,5, có nghĩa góc ma sát trong sẽ từ 23°

đến 30° (D.H. Nguyen, 2015). Giá trị này tương đối hợp lý cho trường hợp vật liệu là đá rời rạc. Trong mô hình chúng tôi đề xuất nghiên cứu cho trường hợp góc phi là 25° . Gia tốc trọng trường trong mô hình được chọn là $9,81 (\text{m}/\text{s}^2)$. Bên trái, bên phải và bản đáy là những nhóm (cluster) được cấu thành từ những phần tử cứng, không biến dạng, không có chuyển vị. Mặt trên của đập là mặt thoáng.



Hình 3. Mô hình mô phỏng có hình dạng mái đập đá đổ có hệ số mái $m = 1,2$:

(a) Kích thước chi tiết phần kết cấu đập; (b) Mô hình kết cấu đập được cấu thành từ các phần tử đá.

Như hình 2 giới thiệu mô hình mái đập có hệ số mái là $m = 1,2$, có vật liệu là các phần tử đá hoàn toàn cứng hình 2b. Hình 2a thể hiện chi tiết kích thước chiều dài, cao, rộng của mỗi cạnh. Độ rỗng trong thân đập đang xét chiếm khoảng 17% thể tích của kết cấu đập.

Một kết cấu mái dốc đảm bảo ổn định có hệ số K khi tỷ lệ thành phần chống trượt và thành phần gây trượt không được nhỏ hơn 1 như hình 3.

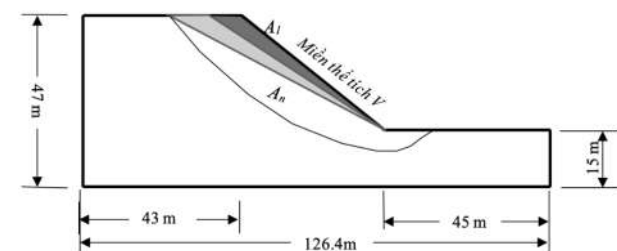
khả năng trượt khỏi kết cấu ban đầu so với tổng số phần tử lưu lại tại kết cấu đập. Xét trong bài toán một tập hợp các phần tử trong miền thể tích V có xu hướng mất liên kết so với phần thể tích còn lại của kết cấu mái đập, lúc này từ phương trình (4) hệ số ổn định K của phần thể tích V được xác định bởi:

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

Nếu $K < 1$ thì mái dốc có khả năng xảy ra trượt mái miền thể tích V , ngược lại nếu $K \geq 1$ thì mái đập đảm bảo ổn định. Khi K càng lớn thì khả năng ổn định càng lớn.

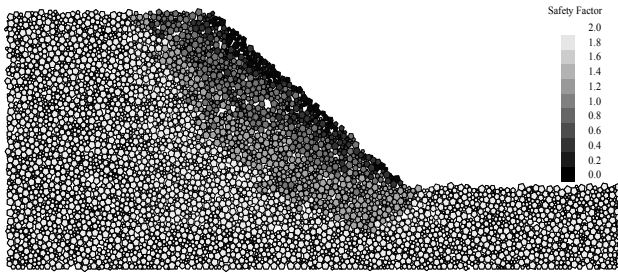
4. KẾT QUẢ VÀ BÌNH LUẬN

Sử dụng ngôn ngữ lập trình C++, thực hiện mô hình số cho bài toán ổn định mái đập dưới tác dụng của trọng lực, xét trong trường hợp không chịu ảnh hưởng của lực mao dẫn, áp lực nước,... Do vậy, các phần tử trong kết cấu đập tương tác với nhau, quá trình dịch chuyển, chuyển vị gây mất ổn định mái.



Hình 4. Miền thể tích V chứa tập hợp các phần tử trong các phần thể tích thành phần A_i có khả năng mất ổn định hoặc ổn định trên toàn bộ mái đập

Trong bài báo này, xác định phạm vi của việc mất liên kết này là giới hạn của tổng số phần tử có



Hình 5. Mô phỏng mật ổn định của kết cấu đập được thực hiện mô phỏng tại thời điểm 10.000 bước tính toán

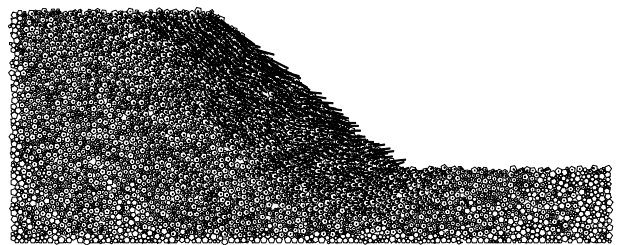
Hình 4 thể hiện các khối trượt hay cung trượt trong quá trình mô phỏng sau 10.000 bước tính toán. Kết quả cho thấy có các khối trượt, xét từ phải sang trái, độ đậm màu giảm dần. Để xác định được giá trị K_i , trong miền thể tích V_i có tập hợp các phần tử có xu hướng mất liên kết với kết cấu, được tính toán như công thức:

$$K_i = \frac{\sum_{i \in V_i} (C + \tan \varphi \sigma_n)}{\sum_{i \in V_i} \sigma_t} \quad (8)$$

Trong nghiên cứu này, mô phỏng sự ổn định đập cấu thành từ các phần tử đá, nên giá trị lực dính giữa các phần tử đá được giả thiết là rất nhỏ, bỏ qua. Tập hợp các phần tử trong miền V_i được chúng tôi định nghĩa là một tập hợp các phần tử có sự chuyển vị trong một phạm vi gần bằng nhau, chênh lệch giữa các phần tử có sự chuyển vị lớn nhất với nhỏ nhất trong miền V_i không được vượt quá 1,5 lần. Do vậy sẽ có việc xuất hiện nhiều V_i cho phép chúng ta thấy rõ những vị trí trượt cục bộ hơn. Lưu ý ở đây, tập hợp các phần tử tính toán trong miền thể tích V là phạm vi được cấu thành từ các phần tử của các thể tích thành phần $A_1, 2, \dots, n$ tức là $V = A_1 + A_2 + \dots + A_n$.

Từ kết quả hình 4, nhận thấy có 4 vùng màu khác nhau, được định nghĩa trong miền diện tích lần lượt là V_1, V_2, V_3, V_4 từ phải sang trái hay mức độ thang màu giảm dần từ đậm sang nhạt. Trong miền V_1 (ngoài cùng, bên phải) có hệ số ổn định $K = [0,6 - 0,8]$ là tập hợp các phần tử trong vùng màu đậm nhất (phần tử trong miền V_1 là các phần tử trong phần thể tích A_1). Tiếp đó là miền V_2 là vùng màu sáng hơn V_1 có hệ số

ổn định $K = [0,8 - 1,0]$ (phần tử trong miền V_2 là tổng các phần tử trong phần thể tích A_1 và A_2). Miền thể tích V_3 được cấu thành từ các phần tử trong phần thể tích A_1, A_2 và A_3 có hệ số ổn định $K = [1,0 - 1,2]$. Miền thể tích V_4 là tập hợp những phần tử còn lại trong thân đập có gam màu sáng. Như vậy, với kết quả nhận được các phần tử trong vùng V_1, V_2 có khả năng trượt khỏi mặt đập. Ngược lại khi xét các phần tử thuộc từ miền V_3 hay V_4 đảm bảo ổn định. Xảy ra khả năng trượt của V_1, V_2 là do các phần tử trong miền V_1 chuyển vị lớn tác động trượt trên các phần tử gần nó, kéo theo các phần tử trong miền thể tích V_2 trượt khỏi mặt đập đá đỡ. Tuy nhiên dưới tác dụng của trọng lực, hệ số ma sát giữa các phần tử, độ gồ ghề của bề mặt phần tử nên đã làm giảm khả năng trượt hay tăng khả năng chống trượt khi xét miền V_3 và V_4 .



Hình 6. Trường vận tốc của các phần tử trong mô hình tại thời điểm 10.000 bước tính toán.

Chúng ta có thể nhận thấy trường vận tốc của các phần tử trong mô hình tại hình 5, phản ánh kết quả tại hình 4. Khi các phần tử ở phía ngoài (bên phải) V_1 và V_2 nhận giá trị lớn, giảm dần khi tiến vào trong lõi đập hay phía trái của đập.

Như đã trình bày trong mục 2, khi giữa các phần tử đá không tiếp xúc hay nói cách khác là không có tương tác, thì lúc này không xuất hiện lực giữa 2 phần tử này. Do vậy, mái đập nếu có mất ổn định, xảy ra quá trình trượt mái chính là do sự mất liên kết giữa các phần tử trong khối thể tích kết cấu mái. Lúc này, một phần thể tích chứa các phần tử đá có xu hướng trượt trên phần thể tích khác dưới tác dụng của trọng lực hay nói cách khác là sự chuyển vị của các phần tử này tăng lớn. Phần thể tích còn lại được xem là ổn định, trường vận tốc tại đây gần như rất nhỏ.

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này tác giả đã sử dụng phương pháp phần tử rời rạc - DEM để mô phỏng mối liên kết giữa các phần tử đa giác được lập trình bởi ngôn ngữ C++, 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. Mái đập mất ổn định dưới sự ảnh hưởng của trọng lực ứng với các phần thể tích trượt khác nhau với hệ số mái đập đá đổ là 1,2. Các miền thể tích chứa các phần tử rời mất ổn định, trượt trên bề mặt mái đập V_1 , V_2 do mất liên kết với khối thể tích còn lại của đập. Sự chuyển vị của các phần tử làm cho sự phân bố ứng suất tại mái đập thay đổi hay giảm xuống do sự mất liên kết, giảm sự tương tác với các khối phần tử tiếp theo. Miền thể tích V_3 tại thời điểm tính toán được xác định là ổn định $K = [1,0 - 1,2]$, tuy nhiên miền này sẽ có khả năng mất ổn định khi các phần tử của miền thể tích V_2 trượt xuống, kéo theo các phần tử tiếp giáp giữa A_2 và A_3 trong thời gian sau. Trường vận tốc của các phần tử cũng được thể hiện rõ, cho thấy sự chuyển vị của các phần tử mất ổn định, trượt khỏi kết cấu mái.

Ưu điểm của mô hình phân tích ổn định bằng DEM là nghiên cứu chi tiết nội tại bên trong vật liệu rời như: (i) độ rỗng, độ chặt của kết cấu; (ii) hình dạng và sự sắp xếp của các phần tử; (iii) xác định liên kết hay phá hủy liên kết giữa các phần tử bên trong kết cấu. So với phương pháp phân tích ổn định phổ biến hiện nay, mô hình trong bài báo mô tả được quá trình mất ổn định từ khi bắt đầu có sự chuyển vị của các phần tử hay sự mất liên kết giữa các phần tử trong kết cấu. Xác định vị trí chính xác sự mất liên kết trong kết cấu để có thể có biện pháp khắc phục, hạn chế sự mất ổn định trượt của mái đập. Hơn nữa, sử dụng mô hình này cũng có thể phân tích, đề xuất các hình dạng, kích thước, cấp phối của đá nhằm giảm độ rỗng, tăng độ chặt của kết cấu. Mô hình này cũng còn tồn tại những vấn đề như chưa xem xét sự ảnh hưởng của mao dẫn, bỏ qua giá trị lực dính, đa dạng hình dạng hình học của các phần tử, số lượng phần tử còn ít. Mô hình chưa xét ảnh hưởng của nước ngầm và dòng thấm. Bên cạnh đó, hạn chế của phương pháp DEM là khối lượng tính toán lớn, tốn nhiều thời gian khi số lượng phần tử trong mô hình tăng lên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- D.H. Nguyen, E.Azéma, F.Radjai, and P.Sornay (2014), “*Effect of size polydispersity versus particle shape in dense granular media*”, Phys. Rev. E 90, 012202
- D.H. Nguyen, E. Azema, P. Sornay, and F. Radjai (2015), “*Effects of shape and size polydispersity on strength properties of granular materials*”, Phys. Rev. E 91, 032203
- D.H. Nguyen, E. Azéma, P. Sornay, F. Radjai (2018), “*Rheology of granular materials composed of crushable particles*”, Eur. Phys. J. E, 41: 50.
- D.V Griffiths, P.A Lane (1999), “*Slope stability analysis by finite elements*”, Géotechnique, V49.3, 387-403.
- E. Li, X.Zhuang, W.Zheng, Y. Cai (2014), “*Effect of graph generation on slope stability analysis based on graph theory*” Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6, 380–386.
- F. Radjai and V. Richefeu (2009), “*Contact dynamics as a nonsmooth discrete element method*”, Mechanics of Materials, 41:715–728, 2.1
- F. Radjai, F. Dubois (2011), “*Discrete-element modeling of granular materials*”, Wiley-ISTE.
- J. Mitchell and K. Soga (2005), “*Fundamentals of soil behavior*”, Wiley, New York.
- J.J. Moreau (1997), “*Numerical investigation of shear zones in granular materials*”, HLRZ-Workshop on Friction, Arching, Contact Dynamics, Singapore. pp.233-247.
- K. Krabbenhoft, A.V. Lyamin, J. Huang, M. Vicente da Silva (2012), “*Granular contact dynamics using mathematical programming methods*”, Computers and Geotechnics, 43,165-176

- K.J. Chang, A. Taboada, (2009), “Discrete element simulation of the Jiufengershan rock-and-soil avalanche triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan”, Journal of geophysical research, VOL. 114, F03003
- L.Nansheng, T. Bo, and X. Lihui (2015), “Slope stability analysis of earth-rockfill Dams using MGA and UST”, Journal of Computational Engineering, Volume 2015, Article ID 895142, 10 pages.
- N.M. Pinyol, E.E. Alonso, S. Olivella (2008), “Rapid drawdown in slopes and embankments”, Water resources research, V 44, W00D03
- S.Keming, M.R.Bagale (2012), “Study on dam slope stability under the condition of rainfall”, International journal of scientific & Technology research, Volum 1, Issue 5.
- S. Nezamabadi, T.H Nguyen, J.Y Delenne, and F. Radjai (2017), “Modeling soft granular materials”, Granular Matter, 19.8
- T.H Nguyen, S Nezamabadi, J.Y Delenne, and F. Radjai (2017), “Compaction of granular materials composed of deformable particles”, EPJ Web of Conferences, 140:05013
- W.J. Xu, S. Wang, M. Bilal (2019), “LEM-DEM coupling for slope stability analysis”, Sci China Tech, 62, <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9387-2>
- W. Zheng, X.Zhuang, D.D.Tannant, Y.Cai, S.Nunoo (2014), “Unified continuum/discontinuum modeling framework for slope stability assessment”, Engineering Geology, 179, 90–101.
- Y. Guan, X. Liu, E. Wang, and S. Wang (2017), “The stability analysis method of the cohesive granular slope on the basis of graphtheory”, Materials, 10, 240; doi:10.3390/ma10030240
- Y. Lu, Y. Tan, X. Li (2018), “Stability analyses on slopes of clay-rock mixtures using discrete element method”, Engineering Geology, V 244, 116-124

Abstract:

STUDY ON SLOPE STABILITY OF ROCKFILL DAMS BY DISCRETE ELEMENT METHOD (DEM)

The calculation of slope stability of rockfill dams is still limited in studies in Vietnam. Rockfill dams are being constructed using experience studies or similar constructions. In this paper, we use a discrete element method DEM to analyze the interactions between the rock elements within the dam body in two-dimension. Rock elements are simulated by rigid particles that have a polygonal shape. These rock elements are not deformed. In this paper, oneonly takes into account the influence of gravity on the dam. We determined the safety factor of slope and the velocity field by DEM method.

Keywords: Granular material, slope stability, safety factor, Rockfill dam, discrete element method.

Ngày nhận bài: 10/10/2019

Ngày chấp nhận đăng: 30/12/2019