NGHIÊN CỨU HÌNH THÁI BIẾN DẠNG VÀ TƯƠNG TÁC GIỮA CÁC HẠT VẬT LIỆU CỦA KHỐI ĐÁ ĐẮP ĐẬP

STUDYING THE DEFORMATION MORPHOLOGY AND INTERACTION OF MATERIAL PARTICLES OF ROCKFILL DAM

NGUYÊN THANH HẢI^{a,}*, NGÔ THANH VŨ^a

^aKhoa Xây dựng Công trình Thuỷ, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng *Tác giả đại diện: *Email:* nthai@dut.udn.vn *Ngày nhận 14/6/2024, Ngày sửa 12/7/2024, Chấp nhận 25/9/2024* https://doi.org/10.59382/j-ibst.2024.vi.vol3-8

Tóm tắt: Vật liệu đá dùng trong các công trình đập đá đổ được bài báo mô phỏng bằng các hạt vật liệu có hình dạng đa giác đều 5 cạnh, với các kích thước khác nhau để đánh giá sư ổn đinh của kết cấu. Ảnh hưởng của sắp xếp cấu trúc từ cấp phối, hình dang hat, trong lực dẫn đến hệ số ma sát giữa các hat vật liêu thay đối. Trong bài viết, nghiên cứu ảnh hưởng của hệ số ma sát biến thiên từ 0,1 đến 0,9 trong mô hình biến dạng của thân đập và chân đập. Lúc này, các phần tử vật liệu của khối thân đập có xu hướng chuyển dịch về phía hạ lưu làm cho chiều cao và chiều dài kết cấu phần thân đập biến dạng lớn. Sự chuyển dịch này ảnh hưởng lớn đến phần chân đập trong các trường hợp hệ số ma sát giữa các phần tử nhỏ hơn 0,3 tuy nhiên ít bị ảnh hưởng khi ma sát lớn hơn. Kết quả của bài báo này cho thấy số lượng tương tác trung bình giữa các phần tử trong hệ thống liên kết, cũng như phân tích sự khác biệt trong các đặc trưng tương tác cạnh-cạnh giữa 2 phần tử đa giác. Kết quả khoa học của bài báo là những nghiên cứu bước đầu của việc áp dụng phương pháp số để đánh giá ổn định cho các công trình sử dụng vật liệu đá.

Từ khóa: Biến dạng đập đá, vật liệu có hình dạng đa giác, phương pháp phần tử rời rạc, số lượng liên kết, hệ số ma sát.

Abstract: Rock materials used in rockfill dam are simulated by material particles with a 5 sides regular pentagon, with different sizes to evaluate the stability of the rock-fill dams. The influence of structural arrangement from particle composition distribution, particle shape, and gravity leads to changes in the friction coefficient between material particles. In this paper, we study the influence of inter-particle friction varying from 0.1 to 0.9 in the deformation model of the rockfill dam. At this time, polygonal particles of the dam body tend to move downstream, causing the height and length of the dam body to be greatly deformed. This displacement affects the foot of the dam in cases where the inter-particle friction is less than 0.3 but is less affected when the friction coefficient is larger. The results of this paper also show the coordination numbers Z in the system's connectivity, as well as analyze the differences in side-to-side contacts between two particles. The scientific results of this paper are initial studies in applying numerical methods to evaluate the stability of structures using rock materials.

Keywords: Deformation of rockfill dam, Polygonal particles, Discrete element method, Coordiation numbers, Inter-particle friction.

1. Đặt vấn đề

Sử dụng vật liệu đá để xây dựng các công trình thủy lợi hay công trình giao thông là khá phổ biến hiện nay, với ưu điểm tận dụng vật liệu sẵn có gần công trình và giảm chi phí trong quá trình xây dựng. Tuy nhiên trong quá trình sử dụng vật liệu đá luôn tiềm ẩn những hiện tượng trượt lở hay mất ổn định công trình [1], [2]. Vật liệu đá có hình dạng, kích thước, tính chất cơ lý khác nhau trong việc sử dụng, do vậy trong mọi quá trình quyết định lựa chọn cũng phải tính đến những yếu tố cơ học của vật liệu.

Hiện tượng sạt lở hay mất ổn định của công trình diễn ra là rất nguy hiểm, gây ra nhiều tổn thất về con người và của cải vật chất, do vậy cấp thiết cần phải nghiên cứu và được rất nhiều nhà khoa học quan tâm hiện nay. Các nghiên cứu sử dụng phương pháp tính toán khác nhau, từ mô hình thực nghiệm đến mô hình mô phỏng khác nhau nhằm dự báo mức độ ổn định công trình, đánh giá quá trình mất ổn định nếu có xảy ra để có phương án xử lý kịp thời, giảm ảnh hưởng đến kinh tế xã hội địa phương [2]. Các công trình có kích thước lớn, phức tạp thì thường được mô hình thực nghiệm trước khi xây dựng, nhằm đánh giá hiệu quả quá trình xây dựng, vận hành và kiểm tra các thông số liên quan [3], [4]. Tuy nhiên phương pháp này thường rất tốn kém do chi phí chế tạo mô hình cao, kèm theo đó là phải có phòng thí nghiệm chuyên dụng. Trong khi đó hiện nay với sự phát triển của khoa học công nghệ, các phần mềm cho phép mô phỏng tương đối tốt các giai đoạn từ thiết kế đến thi công và vận hành công trình. Hơn nữa, chi phí mô phỏng số có giá thành thấp, hiệu quả và có thể tùy biến các thông số kỹ thuật, cũng như kích thước công trình theo yêu cầu thực tế.

Các phương pháp ứng dụng trong mô phỏng công trình thủy lợi, giao thông hiện nay phổ biến ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn, cho phép dự báo mức độ hay phạm vi ổn định của công trình. Tuy nhiên, kết cấu công trình lúc này xem như làm việc trong môi trường liên tục, và xem xét kết cấu có sự biến dạng nhỏ. Trong khi các công trình sử dụng các vật liệu rời, cần quan tâm đến ứng xử của kết cấu khi bị phá hoại lớn thì lúc này phương pháp phần tử rời rạc được xét đến. Ở phương pháp này, cho phép tính toán sự tương tác giữa các vật liệu rời một cách chính xác và hiệu quả. Hơn nữa việc tạo mẫu vật liệu để mô phỏng cho phép đa dạng, từ mô hình hai chiều (2D) đến mô hình ba chiều (3D). Dạng vật liệu hình dạng hình cầu (3D) và hình tròn (2D) [5] được sử dụng phổ biến trong mô hình số, vì để đơn giản trong tính toán cũng như thuận tiện trong việc tạo mẫu vật liệu. Tuy nhiên trong bài toán cần nghiên cứu sự tương tác giữa các phần tử, xét đến bề mặt tiếp xúc, hay sự gồ ghề của vật liệu thì hạt dạng tròn hay dạng cầu lại không phản ánh tốt. Khi đó hạt vật liệu dạng đa giác lại có thể khắc phục được những hạn chế ở trên. Ở đây, khi hạt vật liệu dạng đa giác tương tác nhau trong quá trình mô phỏng thì ngoài việc các bề mặt tiếp xúc với nhau, cũng còn có sự tương tác giữa các đỉnh của vật liệu này với đỉnh hạt vật liệu khác, hay tương tác đỉnh với cạnh bề mặt giữa 2 phần tử [6], [7]. Hơn nữa, khi thiết lập ảnh hưởng của hệ số ma sát giữa các phần tử trong các mô phỏng thì cũng phản ánh tốt sự gồ ghề hay sự tương tác giữa các phần tử trong mô hình [8], [9].

Đập đá đổ là loại đập mà phần lớn khối lượng là đá cỡ lớn, để chống thấm qua thân đập thì có thể sử dụng các phương án chống thấm như là sử dụng vật liệu ít thấm như đất sét, á sét hay vật liệu khác như bê tông, bê tông cốt thép,... Cấu tạo của đập đá đổ thường gồm: lõi đập bằng đá, vùng chuyển tiếp trong thân đập hay vùng chống thấm thân đập, vùng bảo vệ mái thượng và hạ lưu, vùng thoát nước, tầng phủ nền đập,... Để xem xét sự ổn định, sự tương tác giữa các hạt vật liệu, độ chặt hay cấp phối thành phần vật liệu của đập đá đổ vẫn còn khá ít các nghiên cứu.

Do vậy, bài báo này chúng tôi tập trung vào nghiên cứu sử dụng các phần tử hạt vật liệu dạng đa giác để xây dựng công trình đập đá thông qua phương pháp phần tử rời rạc. Vật liệu đá được mô phỏng là các phần tử đa giác đều có 5 cạnh và hoàn toàn không bị biến dạng trong quá trình tương tác. Để xem xét sự gồ ghề của bề mặt vật liệu, chúng tôi thay đổi hệ số ma sát từ 0,1 đến 0,9 cho 9 mô phỏng khác nhau. Nghiên cứu tập trung vào sự tương tác giữa các phần tử dưới tác dụng của trọng lực, gây nên sự mất ổn định công trình. Các mô phỏng được thực hiện trên chương trình mã nguồn mở GDM-TK 2D phát triển bởi Viện nghiên cứu cơ học và xây dựng, Pháp.

2. Phương pháp số

Trong các nghiên cứu trước đây, dạng hạt vật liệu được sử dụng chủ yếu là dạng hình tròn trong mô hình 2 chiều, hoặc hình cầu trong mô hình 3 chiều để đơn giản trong mô phỏng và tính toán. Bài báo này, chúng tôi đề xuất sử dụng loại vật liệu có dạng đa giác để mô phỏng trong mô hình, nhằm xem xét tốt hơn sự tương tác, ảnh hưởng của bề mặt tiếp xúc giữa các phần tử. Tuy nhiên để giảm độ phức tạp của thuật toán tính toán và đơn giản hóa quá trình tính toán, chúng tôi chọn mẫu có dạng đa giác đều 5 cạnh. Phần tử này là phần tử đa giác hoàn toàn cứng, không bị biến dạng, nội tiếp đường tròn có bán kính R = d/2 như hình 1 (a). Kích thước các phần tử trong mô hình này được sử dụng theo cấp phối bao gồm 3 loại hạt như sau: loại 1 có kích thước đường kính từ 0,05 (mm) đến 0,075 (mm) chiếm 5%, loại 2 có kích thước đường kính dưới 5 (mm) chiếm 20%, phần còn lại là loại 3 chiếm 75% có đường kính hạt dưới 800 (mm). Kích thước phần tử được thực hiện theo quy luật ngẫu nhiên, phân phối đều từ đường kính hạt nhỏ đến lớn.

Phương trình chuyển động của các phần tử trong mô hình mô phỏng của phương pháp phần tử rời rạc có dạng như sau:

$$m_{i}\frac{d\vec{v}_{i}}{dt} = m_{i}\vec{g} + \sum_{j}(\vec{F}_{n,ij} + \vec{F}_{t,ij}),$$
(1)

$$I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = -\frac{1}{2} \sum_j \left(\vec{r}_{ij} \times \vec{F}_{t,ij} \right)$$
(2)

trong đó: m_i , I_i , \vec{v}_i và $\vec{\omega}_i$ lần lượt là khối lượng và mô men quán tính, véc tơ vận tốc và véc tơ vận tốc góc

của phần tử i. Khi có sự va chạm giữa 2 phần tử *i* và *j* thì vec tơ lực pháp tuyến và vec tơ lực tiếp tuyến là $\vec{F}_{n,ij}$ và $\vec{F}_{t,ij}$. \vec{r}_{ij} là véc tơ chuyển vị nối giữa tâm của hạt *i* đến vị trí tiếp xúc giữa hai phần tử *i*, *j* [10], [11].



Hình 1. Mô tả các hình thức liên kết: cạnh-cạnh giữa cặp phần tử (i,j), đỉnh-cạnh giữa cặp phần tử (ì,ḱ) và (i,n); các mũi tên là vec tơ đơn vị

Trong quá trình tương tác, các phần tử đa giác trong mô hình sẽ tương tác với nhau thông qua 3 hình thức: liên kết cạnh với cạnh khi tiếp xúc là bề mặt phần tử với nhau, liên kết cạnh với góc (đỉnh) của phần tử khác, liên kết đỉnh của phần tử này với đỉnh của phần tử khác. Trong quá trình dịch chuyển tương tác thì hình thức liên kết đỉnh – đỉnh rất ít khi xảy ra vì xu hướng các phần tử lúc này sẽ mất loại liên kết này để trở thành 1 trong 2 hình thức liên kết đỉnh – cạnh hoặc cạnh – cạnh như Hình 1(b). Xét cho một tập hợp mô hình số gồm nhiều phần tử đa giác, khi có sự liên kết xảy ra trong quá trình va chạm dưới tác dụng ngoại lực, như được thể hiện ở Hình 2. Lực tương tác giữa 2 phần tử *i, j* thể hiện bởi đoạn thẳng nối từ tâm của 2 phần tử đó. Các phần tử đa giác được thể hiện nét mờ trong hình. Độ lớn và nhỏ của đoạn thẳng này tỷ lệ thuận với độ lớn của lực tương tác. Lúc này tương tác cạnh – cạnh đã được quy đổi thành 1 giá trị lực như trình bày ở trên. Lưu ý rằng, có những phần tử không có lực tương tác thì được xem như phần tử đó không có sự liên kết với bất kỳ phần tử nào tại thời điểm đang xét.



Hình 2. Sự phân bố lực tương tác giữa các phần tử trong mô hình

Trong mô hình 2D thì xác định số lượng liên kết trong hệ thống Z cũng là quan trọng, vì giá trị Z này phụ thuộc vào độ chặt mô hình, cũng như xem xét sự đồng nhất về kích thước phần tử trong hệ thống. Đối với các cấu trúc có số lượng liên kết cạnh-cạnh lớn dường như kết cấu này luôn đạt độ chặt lớn hơn so với cấu trúc có nhiều liên kết loại đỉnh-cạnh [7].

3. Mô hình nghiên cứu và các tham số

Thực hiện mô hình, chúng tôi sử dụng và phát triển bộ chương trình mở GDM-TK (2D) của Viện nghiên cứu Cơ học và Xây dựng (LMGC), Trường Đại học Montpllier, Pháp bằng ngôn ngữ C++ [12], [13], [14], [15]. Phát triển từ bộ chương trình này, áp dụng cho 9 mô hình mô phỏng của 9 trường hợp khác nhau của hê số ma sát $\mu \in$ [0,1,0,2,0,3,0,4,0,5,0,6,0,7,0,8,0,9] giữa các phần tử của công trình đập sử dụng vật liệu đá. Bước thời gian cài đặt trong mô hình tương ứng là $dt = 10^{-10}$ ⁵(s).

Đập đá đổ là loại đập mà phần lớn khối lượng là đá cỡ lớn và được xem như là phần chịu lực của công trình nhằm chống đỡ áp lực nước từ bản mặt truyền vào. Khi tính toán thiết kế bộ phận này thường phải đáp ứng các yêu cầu nghiêm ngặt về dung trọng, độ chặt, hệ số thấm,... Trong nghiên cứu này, bài báo tập trung nghiên cứu xem xét ảnh hưởng của vật liệu đắp đập, sự tương tác giữa các phần tử bên trong thân đập, nên chọn một dạng kết cấu đập đơn giản sử dụng vật liệu dạng hạt được mô tả như trên làm vật liệu đắp đập. Mô hình được cấu thành từ 3 thành phần, sử dụng các phần tử dạng hạt đa giác có đặc điểm, kích thước như đã mô tả ở phần 2 đó là thân đập, chân đập và biên của mô hình. Số lượng phần tử (N_p) dạng hạt mô phỏng gồm có 8.482 phần tử, trong đó thành phần thân đập có 4.261 phần tử (N_s); chân đập cấu tạo gồm 3.652 phần tử (N_b), phần còn lại là biên của mô hình như Hình 3. Tỉ lệ thành phần các phần tử của 2 khối thân đập và chân đập là giống nhau. Độ chặt của mẫu ban đầu đạt 0,8. Các phần tử hạt trong 2 khối thân đập và chân đập cho phép chuyển động, tương tác dưới tác dụng của trọng lực với gia tốc trọng trường lấy bằng 9,81 (m/s²), trong khi các phần tử cấu thành biên của mô hình thì không dịch chuyển, cố định hoàn toàn. Tuy nhiên các phần tử của biên này được phép tương tác với các phần tử khối thân đập và chân đập mà vẫn không thay đổi vị trí suốt quá trình mô phỏng.



Hình 3. Mô tả mô hình nghiên cứu, trong đó (a) thể hiện chi tiết kích thước các phạm vi của mô hình, (b) và (c) thể hiện hình thái của mô hình khi bị biến dạng ứng với ma sát là 0,2 và 0,3

Hình 3(a) Mô hình có kích thước tổng thể gồm: chiều cao thân đầu là $h_s = 32$ (m), chiều cao chân đập là $h_b = 15$ (m); bề rộng đỉnh của thân đập và chân thân đập lần lượt là $I_1 = 43$ (m) và $I_1 + I_2 = 81,4$ m. Chiều dài phần chân đập là $I_1 + I_2 + I_3 = 126,4$ (m). Góc α° được tạo bởi mặt thống mái nghiêng so với mặt phẳng nằm ngang là khoảng 41 độ tương ứng với hệ số mái dốc là 1,2. Hình 3 (b, c) mô tả khi đập đá biến dạng và đạt hình thái của mô hình ở trạng thái ổn định tương ứng với 2 trường hợp ma sát lần

ĐỊA KỸ THUẬT - TRẮC ĐỊA

lượt là 0,2 và 0,3. Khi công trình bị biến dạng, chúng tôi định nghĩa chiều cao của thân đập giảm còn lại là h_{f} , chiều dài phạm vi các phần tử lớn nhất của thân đập dịch chuyển về phía hạ lưu là I_{r} .

Nghiên cứu trong bài báo tập trung vào việc phân tích sự biến dạng của đập đá, cấu trúc liên kết giữa các hạt vật liệu trong hệ thống mô hình mô phỏng ứng với 9 trường hợp khác nhau của hệ số ma sát μ . Sự biến dạng của đập đá được thể hiện thông qua các đại lượng về kích thước của chiều cao và chiều dài đập. Cấu trúc liên kết được phân tích thông qua mạng lưới liên kết cũng như hình thức liên



kết cạnh-cạnh và đỉnh-cạnh giữa các hạt vật liệu trong mô hình.

4. Kết quả

4.1 Biến dạng của thân đập và chân đập

Dưới tác dụng của trọng lực đã gây ra sự biến dạng của kết cấu đập trong các mô hình mô phỏng. Các phần tử hạt vật liệu trong kết cấu thân đập và chân đập có sự dịch chuyển ở các mức độ khác nhau phụ thuộc vào yếu tố các giá trị của hệ số ma sát từng mô phỏng.



(b) Giá trị chênh cao của chiều cao đập tại trạng thái ổn định theo các giá trị μ

Hình 4. Mô tả sự thay đổi chiều cao thân đập

Hình 4 mô tả hình thái của phần thân đập theo thời gian mô phỏng cho đến trạng thái ổn định. Chúng ta thấy rằng hình thái của đập đá có sự thay đổi đáng kể trong các mô hình có hệ số ma sát nhỏ tương ứng với ma sát bằng 0,1; 0,2; 0,3. Ngược lại thì gần như không có sự thay đổi hình thái tại vị trí xét h_f đối với các trường hợp còn lại của hệ số ma sát từ 0,4 đến 0,9. Sự mất ổn định do động năng tăng của các phần tử trong khối thân đập, đồng thời ảnh hưởng của ma sát nhỏ tương tác giữa các phần tử nên làm cho các phần tử đá dịch chuyển về phía hạ lưu đập [9]. Dưới tác

dụng đó, thời gian tắt dần của sự mất ổn định cũng giảm dần từ hơn 6(s) của mô phỏng 0,1 đến khoảng 2(s) của trường hợp 0,2 và 0,3 thì các mô phỏng khác dường như không có sự thay đổi này. Chỉ có sự dịch chuyển mất ổn định của các phần tử ở phạm vi sát mái dốc. Để xem xét độ giảm của chiều cao thân đập ở trạng thái ổn định, chúng tôi xét đến chênh lệch giữa độ cao ban đầu và độ cao sau quá trình biến dạng ở vị trí ổn định là ($h_s - h_i$). Hình 4(b) thể hiện quan hệ giữa chênh lệch độ cao ở trên với sự ảnh hưởng của hệ số ma sát của 9 mô phỏng.



Hình 5. Ảnh hưởng của ma sát đến độ chặt của các mô phỏng tại trạng thái cuối cùng

Xét ảnh hưởng của hệ số ma sát đến độ chặt của mô hình tại trạng thái cuối cùng sau khi bị sạt thì chúng tôi thấy rằng, từ hệ số ma sát 0,4 trở lên thì độ chặt của mô hình ở khoảng 0,8 không thay đổi nhiều so với mẫu ban đầu khởi tạo. Tuy nhiên khi hệ số ma sát nhỏ hơn thì có sự ảnh hưởng khá lớn đến độ chặt của mô hình từ khoảng 0,837 đến 0,809 tương ứng với ma sát từ 0,1 đến 0,3 như mô tả ở Hình 5. Có thể thấy mặc dù hạt vật liệu có dạng đa giác đều 5 cạnh, tạo sự gồ ghề và ngăn cản sự chuyển dịch giữa các phần tử, tuy nhiên ảnh hưởng của ma sát đến sự sắp xếp giữa các phần tử trong mô hình cũng tương đối lớn đối với các trường hợp có hệ số ma sát nhỏ hơn 0,4.





Hình 6. Phạm vi dịch chuyển các hạt vật liệu thuộc khối thân đập theo thời gian

Hình 6 thể hiện khoảng dịch chuyển phần chân trước của thân đập trong suốt quá trình mất ổn định theo 9 giá trị khác nhau của hệ số ma sát. Phạm vi l_r được xác định trong phạm vi chuyển động xa nhất trên mặt thoáng như Hình 3, do vậy $I_r = 0$ (m) khi tại vị trí chân của khối thân đập, và $I_r = I_3$ khi vị trí phần tử xa nhất. Khoảng dịch chuyển I_r (m) tăng lên theo thời gian tương ứng với mỗi giá trị của hệ số ma sát. Trái ngược với sự dịch chuyển rất chậm của phần thân đập về phía trước khi hệ số ma sát lớn hơn 0,4, là kết quả sự vận động của các hạt vật liệu trên bề mặt thoáng thân đập, khoảng dịch chuyển này tăng lên nhanh chóng khi hệ số ma sát giảm từ 0,3 đến 0,1. Khoảng dịch chuyển Ir (m) đạt giá trị lớn nhất khi động năng của thân đập bằng 0, tương ứng với trạng thái cân bằng ổn định cuối cùng của đập. Kiểm tra kết quả nghiên cứu với kết quả mô phỏng của [16], [17] thông qua tỷ số chiều dài $(I_r - L_0)/L_0$ thì chúng tôi thấy xu hướng tương đồng khi hệ số ma sát nhỏ nó thực sự ảnh hưởng đến chiều dài dịch chuyển của các phần tử khối thân đập, trong đó $L_0 = (I_1 + I_2)$. Hình 6(a) thể hiện quan hệ tỉ lệ thay đổi phạm vi dịch chuyển của phần tử khối thân đập l, so với chiều dài ban đầu L₀ theo thời gian t(s). Trong trường hợp hệ số ma sát nhỏ thì phạm vi dịch chuyển của hạt vật liệu lớn hơn 30% chiều dài của khối thân đập, cũng

có nghĩa là sự phát sinh động năng lớn trong các mô phỏng này. Hình 6(b) thể hiện góc α° tạo bởi bề mặt của mái đập với mặt phẳng nghiêng tại vị trí cuối cùng của mô hình tương ứng với 9 mô phỏng. Chúng tôi thấy rằng, góc này tăng lên nhiều đối với mô phỏng có hệ số ma sát nhỏ hơn 0,4, tuy nhiên gần như không tăng đối với ma sát lớn hơn 0,4.

4.3 Mạng lưới kết nối các phần tử

Chúng ta thấy rằng, ảnh hưởng của hệ số ma sát giữa các phần tử trong 9 mô phỏng rất rõ nét ở các kết quả trên. Trong phần này, chúng tôi quan tâm đến mối liên kết giữa các phần tử trong hệ thống cũng như đặc điểm của liên kết cạnh-cạnh trong trường hợp hạt vật liệu là các đa giác có sự khác biệt như thế nào khi có ảnh hưởng của hệ số ma sát.

a) Số lượng liên kết trong hệ thống Z

Trong mô hình 2 chiều thì số lượng liên kết trong hệ thống Z được tính bằng $Z = 2N_c/N_p(1 + P_f)$ [7], [13]. Giá trị Z đại diện cho số lượng liên kết trung bình của mỗi hạt vật liệu trong mô hình, được tính tại vị trí cân bằng sau khi mô hình ổn định. Trong đó N_c là tổng số liên kết giữa các phần tử trong hệ thống bao gồm liên kết cạnh-cạnh, cạnh-góc như trình bày ở mục 2. Liên kết cạnh-cạnh lúc này được tính là một (01) liên kết. N_p là tổng số phần tử trong mô hình gồm $N_p = N_b + N_s$. Giá trị P_f là tỷ số giữa các phần tử hạt không tham gia hoặc không có liên kết nào trong hệ thống trên tổng số phần tử tham gia, do vậy $P_f = N_p^f/N_p$. Trong mô hình này dưới tác dụng của trọng lực, thì giá trị P_f bằng 0.

Hình 7 thấy rằng Z giảm khi giá trị của hệ số ma sát tăng, cụ thể là khi hệ số ma sát nhỏ hơn 0,4 thì độ dốc thay đổi lớn, ngược lại khi hệ số ma sát từ 0,4 trở lên thì độ dốc nhỏ. Thứ 2 là khi hệ số ma sát nhỏ thì các phần tử có xu hướng tiếp xúc nhiều hơn. Điều này phản ánh tốt sự thay đổi số lượng liên kết Z trong mô hình 2D của chúng tôi thông qua các nghiên cứu [7].



b) Tỉ lệ các liên kết cạnh - cạnh

Hình 7b thể hiện tỉ lệ số lượng liên kết cạnh-cạnh ở trạng thái ổn định cuối mô hình (P_{ss}) ứng với các trường hợp của hệ số ma sát. Giá trị P_{ss} được xác định thông qua tổng số lượng liên kết cạnh-cạnh so với tổng số liên kết trong hệ thống tại vị trí xét $P_{ss} = N_{ss}/N_c$. Chúng ta thấy rằng tỉ lệ này giảm dần khi hệ số ma sát tăng. Mặc dù hệ số ma sát lớn thì mô hình sẽ ổn định hơn do xuất hiện lực cản của ma sát, tuy nhiên số lượng các liên kết cạnh-cạnh lại chiếm tỉ lệ nhỏ hơn so với các trường hợp hệ số ma sát nhỏ.

5. Kết luận

Bài báo này ứng dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng mô hình đập đá được cấu thành từ các hạt vật liệu có hình dạng đa giác đều 5 cạnh, hoàn toàn cứng và không bị biến dạng. Thực hiện 9 mô phỏng cho các trường hợp khác nhau của hệ số ma sát từ giá trị 0,1 đến 0,9, không xét đến tác dụng, ảnh hưởng của yếu tố nước. Dưới tác dụng của trọng lực, các kết cấu của mô hình thay đổi về hình thái của đập đá, các hạt vật liệu di chuyển tương tác lẫn nhau trong toàn bộ quá trình mô phỏng. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng mức độ biến dạng của đập đá lớn khi các mô phỏng có hệ số ma sát nhỏ hơn 0,3. Tuy nhiên khi hệ số ma sát lớn hơn 0,4 thì dường như mức độ biến dạng của các mô phỏng khác nhau không đáng kể. Bên canh đó, nghiên cứu cũng đánh giá số lương các loại liên kết trong hệ thống khi mô hình là các hạt vật liệu đa giác. Khi hệ số ma sát lớn giữa các hạt vật liệu trong mô hình thì số lượng liên kết trung bình trong hệ thống chỉ khoảng 3, tuy nhiên ngược lại khi hệ số ma sát nhỏ thì số lượng liên kết trung bình này đạt khoảng gần 4 ở trạng thái ổn định. Từ những kết quả nghiên cứu của bài báo, các kết cấu vật liệu rời rạc có thể áp dụng phương pháp phần tử rời rạc để đánh giá chi tiết thêm trong quá trình xây dựng và khai thác công trình. Bài báo chỉ dừng lại ở vật liệu dạng rời, do vậy cần có sự phát triển hơn trong việc đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố khác như là mực nước ngầm, vật liệu ở trạng thái ẩm hoặc bão hòa nước, hay các tác nhân khác đến sự vận động và ổn định của kết cấu công trình trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Văn Lệ (2009), "Một số vấn đề Kết cấu trong xây dựng đập đá đổ bản mặt bê tông," Tạp chí khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, vol. 11, pp. 109– 114.
- [2] Trần Văn Toản, Lê Văn Hùng, Nguyễn Cảnh Thái (2019), "Một số sự cố và bài học kinh nghiệm trong quá trình thi công đập đá đổ bản mặt bê tông Cửa Đạt – Thanh Hóa". Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường, vol. 67, pp. 101–109.

- [3] Giang Thư, Tô Vĩnh Cường (2023), "Vai trò, hiệu quả của thí nghiệm mô hình thủy lực trong thiết kế và xây dựng công trình thủy lợi, thủy điện," Khoa học và công nghệ thủy lợi, vol. 79, pp. 35–43.
- [4] A. Mangeney, O. Roche, O. Hungr, N. Mangold, G. Faccanoni, and A. Lucas (2010), "Erosion and mobility in granular collapse over sloping beds," J Geophys Res Earth Surf, vol. 115, no. 3, Sep, doi: 10.1029/2009JF001462.
- [5] Z. Lai, D. Chen, E. Jiang, L. Zhao, L. E. Vallejo, and W. Zhou (2021), "Effect of fractal particle size distribution on the mobility of dry granular flows," AIP Adv, vol. 11, no. 9, p. 1ENG, Sep, doi: 10.1063/5.0065051.
- [6] Nguyễn Thanh Hải (2019), "Phân tích ổn định mái đập đá đổ bằng phương pháp phần tử rời rạc" *Khoa* học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, vol. 67, pp. 71– 77.
- [7] T. Binaree, E. Azéma, N. Estrada, M. Renouf, and I. Preechawuttipong (2020), "Combined effects of contact friction and particle shape on strength properties and microstructure of sheared granular media," Phys Rev E, vol. 102, no. 2, Aug, doi: 10.1103/PhysRevE.102.022901.
- [8] T. K. Nguyen and T. T. Vo (2023), "Effects of intergranular friction and grain size distributions on the initial void ratio of granular sample," Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)
 HUCE, vol. 17, no. 2, pp. 110–119, Jun, doi: 10.31814/stce.huce2023-17(2)-10.
- [9] Nguyễn Thanh Hải, Võ Thành Trung (2023), "Ảnh hưởng của hệ số ma sát giữa các hạt vật liệu đến ứng xử ổn định của đập đá," Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường, vol. 86, pp. 3–10.

- [10] 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.
- [11] D. H. Nguyen, É. Azéma, P. Sornay, and F. Radjaï (2018), "Rheology of granular materials composed of crushable particles," European Physical Journal E, vol. 41, no. 4, doi: 10.1140/epje/i2018-11656-1.
- [12] E. Azéma, N. Estrada, and F. Radjaï (2012), "Nonlinear effects of particle shape angularity in sheared granular media," Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, vol. 86, no. 4, Oct., doi: 10.1103/PhysRevE.86.041301.
- [13] 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 Stat Nonlin Soft Matter Phys, vol. 90, no. 1, Jul., doi: 10.1103/PhysRevE.90.012202.
- 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, doi: 10.1007/s10035-016-0689-y.
- [15] Nguyễn Thanh Hải, Ngô Thanh Vũ (2022), "Mô hình số ổn định mái dốc bằng phương pháp phần tử rời rạc", Tạp chí Khoa học Công nghê Xây dựng, vol. 2, pp. 21–28.
- [16] Y. Wu, P. Li, and D. Wang (2018), "Erosiondeposition regime formation in granular column collapse over an erodible surface," Phys Rev E, vol. 98, no. 5, Nov., doi: 10.1103/PhysRevE.98.052909.
- [17] Y. Wu, D. Wang, and P. Li (2021), "The collapse of a granular column onto an erodible bed: dynamics and morphology scaling," *Granul Matter*, vol. 23, no. 2, May, doi: 10.1007/s10035-021-01100-x.