

# TÁC ĐỘNG CỦA HÌNH DẠNG HẠT ĐẾN QUÁ TRÌNH SẠT TRƯỢT CỦA KHỐI VẬT LIỆU TRÊN MẶT PHẪNG NẰNG

Nguyễn Thanh Hải

Khoa xây dựng Công trình thủy, Trường Đại học Bách khoa,  
Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

Võ Thành Trung

Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

**Tóm tắt:** Hình dạng mẫu vật liệu ảnh hưởng đáng kể đến quá trình sạt trượt của khối cột vật liệu, các phân tử đa giác có xu hướng gắn chặt vào nhau về mặt hình học, gây ra sự hạn chế chuyển động tương đối giữa chúng. Nghiên cứu này sử dụng mô phỏng cơ học rời rạc DEM thông qua bộ mã nguồn mở GDMTK-2D để phân tích tác động của hình dạng hạt vật liệu đến sạt trượt khối vật liệu, so sánh giữa hai dạng hạt (tròn và ngũ giác), với các hệ số ma sát khác nhau. Phân tích kết quả thấy được rằng, hạt ngũ giác tác động mạnh hơn hạt tròn nhờ khả năng liên kết bề mặt vượt trội hơn; hệ số ma sát cao kết hợp với hình dạng vật liệu góc cạnh làm tăng kháng cắt vật liệu; hiệu ứng gắn chặt vào nhau này làm giảm đáng kể chiều dài sạt trượt, giảm năng lượng và duy trì kết cấu ổn định trong suốt quá trình. Nghiên cứu đã cung cấp sự hiểu biết hơn về sự tác động của hình dạng các phân tử trong mô hình cơ học rời rạc đến quá trình sạt trượt khối vật liệu.

**Từ khóa:** Phương pháp phân tử rời rạc, khối sạt trượt, hình dạng hạt vật liệu, hệ số ma sát, hình thái khối trượt.

**Summary:** Particle shape significantly influences the collapse process of granular materials; polygonal particles tend to interlock geometrically, which restricts their relative movement. This study employs the Discrete Element Method (DEM) simulation using the open-source GDMTK-2D code to analyze the impact of particle shape on granular columns collapse. A comparative investigation is conducted between circular and pentagonal shape grains under varying friction coefficients. The analysis shows that pentagonal particles exert a stronger effect than circular ones due to their superior surface interlocking capability. High friction coefficients combined with irregular and angular particle shapes increase the material's shear resistance; this mutual interlocking effect notably reduces run-out distance, decreases energy, and maintains structural stability throughout the collapse process. The research provides further insight into the influence of particle shape on discrete mechanical modeling of granular column collapse.

**Keywords:** Discrete element method, granular column collapse, particle shape, friction coefficient, deposition morphology.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện tượng sạt trượt vật liệu rời là một trong những vấn đề quan trọng trong địa kỹ thuật và các hiện tượng sạt trượt trong tự nhiên như là sạt lở đất đá, mất ổn định công trình xây dựng. Quá trình sạt trượt xảy ra khi các hạt vật liệu dịch chuyển khối lượng lớn, dẫn đến mất ổn định kết cấu và gây nên những thiệt hại đáng kể về của cải, tài nguyên môi trường và nhân mạng của địa phương [1–3]. Hiện tượng sạt trượt trên mặt phẳng ngang được biết đến như

là mô hình phổ biến nhất và nó có thể cung cấp hiểu biết sâu hơn về đặc tính cơ lý vật liệu, địa hình của các hiện tượng sạt trượt trong tự nhiên [4–6]. Thí nghiệm của Lajeunesse và nhóm nghiên cứu [4] thực nghiệm hiện tượng sạt trượt đơn giản với vật liệu cát hạt thô trên mặt phẳng ngang với các trường hợp khác nhau của tỉ lệ chiều cao cột với bề rộng cột. Thí nghiệm này đã chỉ rõ các chế độ sạt trượt dưới tác động của chiều cao cột, vật liệu cấu thành cột vật liệu. Hơn nữa, tác động của hình dạng của vật liệu đóng vai trò quyết định đến khả năng kháng cắt và độ ổn định của khối vật liệu, đặc biệt khi các hạt có hình dạng đa giác, góc cạnh như ngũ giác, lục giác [7–10]. Hình

Ngày nhận bài: 18/7/2025

Ngày thông qua phản biện: 29/8/2025

Ngày duyệt đăng: 10/9/2025

dạng hạt vật liệu và hệ số ma sát giữa các hạt vật liệu tác động đến hành vi dịch chuyển thông qua nhiều cơ chế khác nhau như cản trở sự quay của các hạt do sự liên kết, giảm năng lượng và chiều dài lớn nhất trong suốt quá trình sạt trượt của khối vật liệu.

Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng, hình dạng hạt và hệ số ma sát bề mặt là hai yếu tố chính ảnh hưởng đến khả năng kháng cắt và sự ổn định của vật liệu rời [9,11]. Peijun Guo and Xubin Su thực hiện thí nghiệm với cát thô để khảo sát tác động của hiện tượng khóa lẫn nhau giữa các hạt góc cạnh lên độ bền và sự giãn nở của vật liệu dạng hạt [12]. Đặc biệt, các nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tử rời rạc (Discrete Element Method, DEM) đã giúp làm rõ cơ chế tương tác giữa các hạt ở quy mô vi mô và vĩ mô [10,13,14]. Nghiên cứu của Lu và nhóm nghiên cứu sử dụng kết hợp thí nghiệm trực tiếp và mô phỏng DEM để phân tích hiệu ứng khóa lẫn nhau trong vật liệu hỗn hợp cát – sỏi, cho thấy rằng sự tăng cường của khóa lẫn nhau có liên quan mật thiết đến độ chặt, hàm lượng hạt thô và hình dạng hạt [13]. Sử dụng mô hình DEM 2D và 3D để khảo sát tác động của hình dạng các phân tử khác nhau để đánh giá ảnh hưởng đến cường độ nén của kết cấu vật liệu [11,14]. Tuy nhiên các nghiên cứu về tác động hình dạng hạt vật liệu vẫn tập trung nghiên cứu ở các bài toán cơ bản nhằm khảo sát sức kháng cắt của vật liệu; quan hệ ứng suất và biến dạng thông qua mẫu nén [10,12,13] mà vẫn còn thiếu nghiên cứu tác động của nó đến quá trình sạt trượt để áp dụng trong tự nhiên. Hơn nữa trong phần lớn các nghiên cứu trước đây chỉ tập trung vào vật liệu đồng nhất hoặc các phân tử có hình dạng đơn giản như hình tròn trong mô hình 2 chiều hoặc hình cầu trong mô hình 3 chiều [15,16]; hoặc các hình đa giác đều [9], trong khi các vật liệu thực tế thường có hạt hình dạng đa giác ngẫu nhiên, góc cạnh thay đổi. Điều này dẫn đến các mô hình còn hạn chế trong việc mô tả chính xác cơ chế tương tác giữa các hạt và dự đoán khả năng kháng cắt của khối vật liệu khi xảy ra sạt trượt. Đặc biệt, đối với các hạt vật liệu dạng tròn hoặc hình cầu thì có xu hướng dễ lăn, xoay và trượt dài nên ảnh hưởng rất lớn đến hình thái khối sạt trượt cuối cùng. Tuy rằng các hạt dạng đa

giác đều có cấu trúc ổn định hơn hạt tròn, nhưng vẫn thiếu các nghiên cứu về hình dạng khác nhau của đa giác (đa giác không đều), thêm nữa đó là sự ảnh hưởng của ma sát giữa các phân tử này. Để từ đó có thể đánh giá tốt hơn về cơ chế cũng diễn tiến khối sạt, năng lượng, hay mối liên kết trong hệ thống dưới tác động của hình dạng hạt vật liệu cấu thành nên khối sạt như trong tự nhiên.

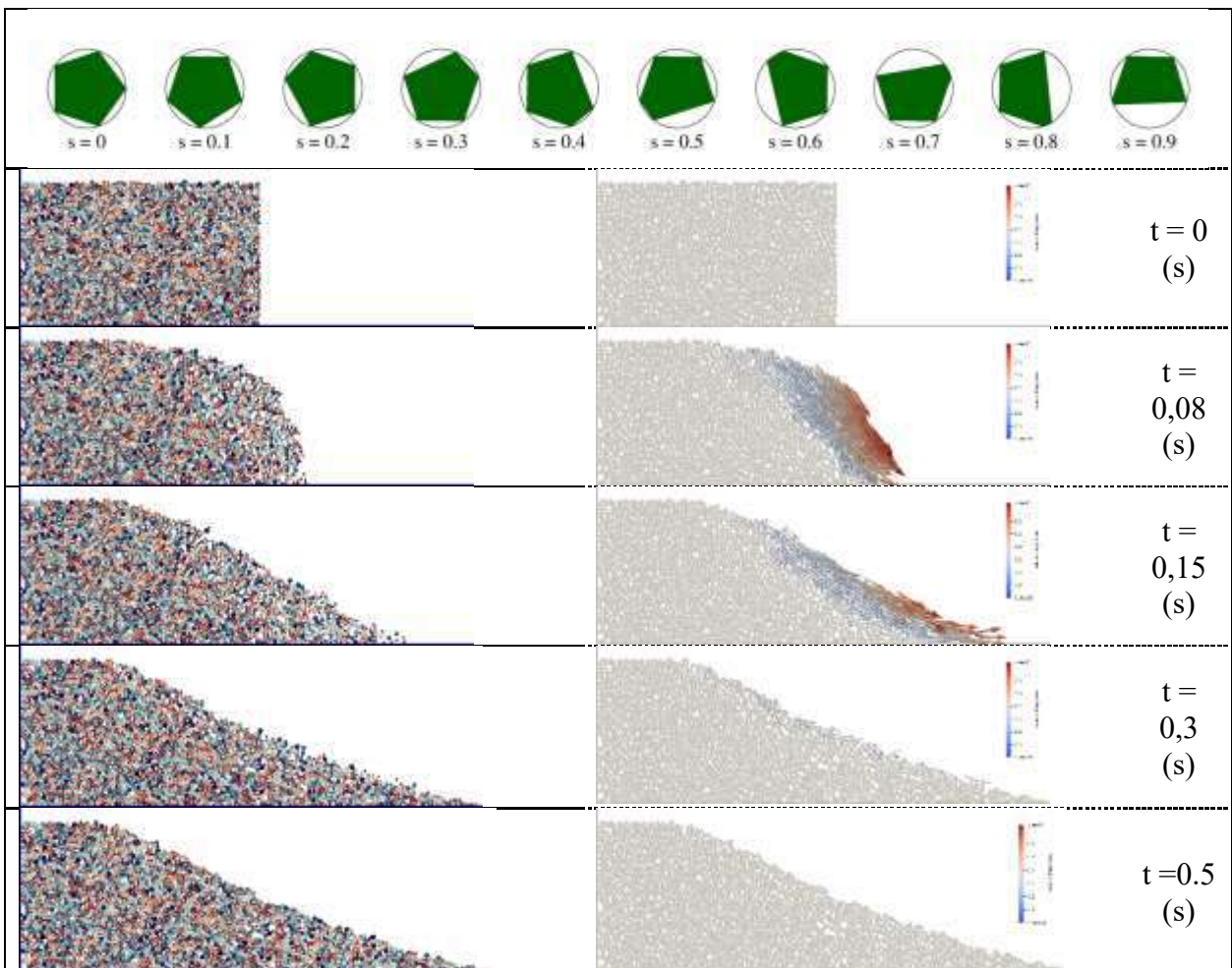
Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng phương pháp phân tử rời rạc DEM để mô phỏng quá trình sạt trượt của khối vật liệu với các hạt có hình dạng khác nhau (tròn và ngũ giác), đồng thời xem xét ảnh hưởng của hệ số ma sát giữa các hạt. Mô hình DEM này cho phép phân tích, đánh giá sự tác động và ảnh hưởng của hình dạng vật liệu đến hình thái khối sạt trượt; biến thiên thế năng, động năng; và mức độ liên kết giữa các hạt vật liệu trong suốt quá trình sạt trượt. Kết quả của nghiên cứu này cung cấp những sự hiểu biết sâu hơn về ảnh hưởng của hình dạng hạt vật liệu ở các bài toán sạt trượt trong tự nhiên.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ MÔ HÌNH MÔ PHỎNG NGHIÊN CỨU

Trong nghiên cứu này ứng dụng phương pháp phân tử rời rạc (DEM) để phân tích và mô phỏng bài toán. Phương pháp DEM phù hợp với các bài toán xem xét các phân tử hạt vật liệu rời, cho phép xác định lực tiếp xúc, chuyển vị và quay của từng phân tử trong hệ thống. Hạt vật liệu được mô phỏng là hoàn toàn cứng và không bị phá hủy khi có sự va chạm với các phân tử khác [17–19]. Sự tương tác trong mô hình được đặc trưng bởi hệ số ma sát và hệ số đàn hồi giữa bản thân các phân tử. Xét khi hạt vật liệu là phân tử có dạng hạt tròn thì tương tác giữa các phân tử này đơn giản tuy nhiên khi hạt vật liệu là phân tử có dạng đa giác, sự tương tác giữa các hạt phân tử này xảy ra 3 dạng, tương tác cạnh – cạnh, cạnh – đỉnh và đỉnh – đỉnh. Tuy nhiên dạng tương tác đỉnh – đỉnh thì hiếm khi xảy ra nên trong phương pháp này xem xét tồn tại 2 kiểu tương tác cạnh – cạnh và cạnh – đỉnh [11,20]. Để thực hiện các mô phỏng của bài toán vật liệu rời rạc, trong bài báo này chúng tôi sử dụng bộ chương trình mã nguồn mở có tên gọi là GDMTK-2D, bộ chương trình này đã thực hiện các nghiên cứu được công bố rộng rãi [21–24].

Trong nghiên cứu này sử dụng mô hình khối sạt trượt được cấu tạo từ các hạt vật liệu dạng tròn và dạng ngũ giác từ đều đến không đều nội tiếp đường tròn bán kính  $R$ . Khối sạt trượt trên mặt phẳng ngang, với chiều cao và chiều dài khối trượt ban đầu lần lượt là  $h_0 = 0,06\text{m}$  và  $l_0 = 0,1\text{m}$ ; và hệ số chặt đạt xấp xỉ 0,8. Sau khi kích hoạt khối trượt bằng việc loại bỏ tường ngăn bên phải khối vật liệu, dưới tác dụng của trọng lực thì khối vật liệu bắt đầu dịch chuyển. Quá trình sạt trượt của khối vật liệu trải qua 4 giai đoạn: dưới tác dụng của trọng lực khối vật liệu sụp đổ, (2) là chất đông và chiều dài khối sạt tăng nhanh đáng kể, (3) chảy tràn trên mặt bề mặt đến khi đạt được mức độ ổn định ở giai đoạn lắng đọng (4)[4,24]. Hình 1 mô tả vật liệu khối sạt là các hạt dạng ngũ giác từ đều đến không đều, và

quá trình sạt trượt tại các thời điểm khác nhau được khảo sát thông qua mô hình. Trong đó hình dạng vật liệu ngũ giác được tạo bởi việc thay đổi hệ số  $s$  thông qua thay đổi góc tạo bởi các đỉnh  $\theta_i = \theta_0 + \frac{2\pi}{n}(i - s)$ . Trong công thức này, để xây dựng hình dạng hạt vật liệu khác nhau phụ thuộc vào giá trị  $s$  tạo nên, trong đó  $i$  là số thứ tự các đỉnh của một đa giác  $n$  cạnh. Do vậy khi  $s = 0$  thì đa giác được tạo ra sẽ là đa giác đều nội tiếp đường tròn, và khi hình dạng hạt có độ lệch càng nhiều thì giá trị  $s$  tăng lên. Trong hình 1 này, giá trị ma sát giữa các phần tử được đặt là  $\mu_p = 0,7$  và ma sát giữa hạt vật liệu với tường là  $\mu_w = 0,5$ . Bước thời gian rất nhỏ  $\Delta t = 10^{-6}$  giây cho phép mô hình ổn định và mô tả chính xác diễn tiến toàn bộ quá trình sạt trượt.



Hình 1: Quá trình sạt trượt của khối sạt được tạo thành từ các hạt vật liệu dạng ngũ giác góc cạnh với  $s = 0$  đến 0,9, hệ số ma sát  $\mu_p = 0,7$  và  $\mu_w = 0,5$

Sử dụng phương pháp DEM để mô phỏng bài toán tác động của hình dạng hạt vật liệu đến khối sạt trượt trong bài toán mô phỏng 2 chiều, với các thông số chính để thực hiện mô hình mô phỏng ở bảng 1. Kích thước hạt vật liệu được khảo sát trong mô hình tương đương với

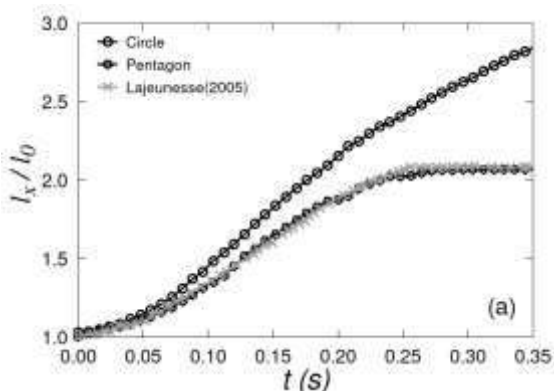
kích thước cát dạng hạt thô. Sau thời gian kích hoạt khoảng 0,5 giây, thì khối sạt trượt đạt trạng thái ổn định, giá trị vận tốc trung bình của các hạt vật liệu tiến về gần không, điều này cho phép thực hiện các phép đo đặc, phân tích kết quả đạt được của mô hình mô phỏng.

**Bảng 1: Các thông số được sử dụng trong mô hình**

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Đường kính hạt nhỏ nhất	$d_{min}$	1,25	mm
Đường kính hạt lớn nhất	$d_{max}$	2,5	mm
Khối lượng riêng	$\rho$	2600	$kg\ m^{-3}$
Gia tốc trọng trường	$g$	9,81	$m\ s^{-2}$
Hệ số ma sát hạt – tường	$\mu_w$	0,5	-
Hệ số ma sát hạt – hạt	$\mu_p$	0,7	-
Bước thời gian mô phỏng	$\Delta t$	$1e^{-6}$	s

### 3. KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH

Để thực hiện chọn thông số mô hình phù hợp và đối sánh với kết quả của các nghiên cứu thực nghiệm đã thực hiện, trong nghiên cứu này ban đầu thực hiện với 2 mô phỏng với 2 dạng vật liệu hình tròn và ngũ giác, trong đó hạt ngũ giác là nội tiếp đường tròn và giá trị  $s$  thay đổi từ 0 đến 0,9. Hai mô phỏng này đều có kích thước khối sạt trượt ban đầu là  $h_0$  và  $l_0$ , được thực hiện các bước như mô tả ở mục II và kết quả được mô tả ở hình 2.



*Hình 2: Đối sánh với kết quả mô hình số và kết quả thực nghiệm của tác giả Lajeunesse và nhóm nghiên cứu hình [4]*

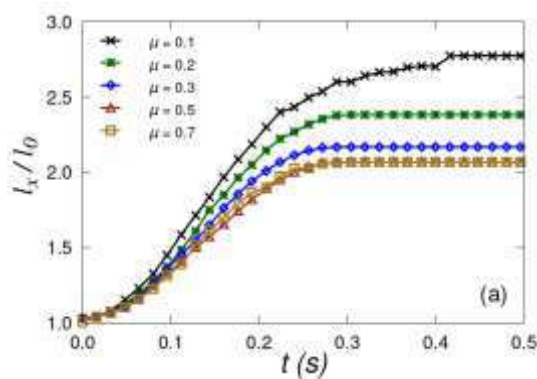
Từ hình 2, khi thực hiện mô hình số khảo sát sự ảnh hưởng của các hình dạng hạt vật liệu cấu thành nên khối trượt trên mặt phẳng nằm ngang, thực hiện đối sánh với kết quả của Lajeunesse và nhóm nghiên cứu [4] cho thấy

rằng ứng với trường hợp cột vật liệu là các hạt ngũ giác thì rất tương đồng với thí nghiệm cột cát hạt thô của Lajeunesse trong suốt quá trình sạt trượt từ khi được kích hoạt đến khi ổn định. Trong khi đó, cột vật liệu là các hạt dạng tròn thì kết quả chiều dài khối sạt trượt sai khác rất lớn so với thực nghiệm. Trong nghiên cứu này, tập trung xem xét sự tác động của hình dạng hạt khác nhau của các phần tử đến quá trình sạt trượt của khối vật liệu, do đó các hình dạng vật liệu được xét là các ngũ giác (đều đến không đều) nội tiếp đường tròn, có hệ số  $s$  thay đổi  $s = 0 - 0,9$ . Tuy nhiên để đánh giá so sánh giữa hình dạng vật liệu, thì nội dung bài báo này cũng sẽ thực hiện phân tích thêm hình dạng hạt tròn để có sự phản ánh tốt trong các tính chất cơ học của dòng vật liệu. Hệ số ma sát giữa các phần tử đa giác được khảo sát với các giá trị khác nhau  $\mu_p = 0,1 - 0,7$ , trong khi hệ số ma sát giữa tường và các hạt vật liệu giữa không đổi là  $\mu_w = 0,5$ . Các thông số của mô hình được duy trì như bảng 1 như là kích thước, khối lượng riêng của vật liệu; bước thời gian mô phỏng; gia tốc trọng trường.

### 4. KẾT QUẢ

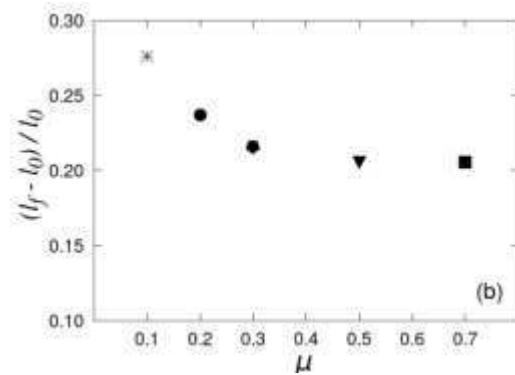
Để khảo sát tác động của hình dạng hạt vật liệu đến sự sạt trượt của khối vật liệu, những yếu tố như hình thái khối sạt trượt cuối cùng, vận tốc hay năng lượng suốt quá trình, và đặc biệt là độ khóa cứng giữa các phần tử

được đặc trưng bởi mỗi liên kết sẽ được phân tích, đánh giá lần lượt các nội dung dưới đây. Thực hiện mô phỏng với các dạng mẫu vật liệu khác nhau P0, P2, P5, P8 và P09 tương ứng với hệ số  $s$  lần lượt là 0, 0,2, 0,5, 0,8, và trộn lẫn mẫu ngũ giác có hệ số  $s$  từ 0 đến 0,9. Mặt khác sự ảnh hưởng của hệ số ma sát cũng được xem xét đến khi thay đổi hệ số ma sát giữa các phần tử trong các mô phỏng của mẫu P09 đã được kiểm chứng ở mục III.



#### 4.1. Ảnh hưởng của hệ số ma sát đến hình thái khối trượt

Thực hiện các mô phỏng trên mẫu ngũ giác P09 với các giá trị ma sát giữa các phần tử khác nhau, kết quả được thể hiện ở hình 4. Hình 4a mô tả toàn bộ diễn tiến của chiều dài khối trượt theo thời gian, với giá trị  $l_x$  là chiều dài đo được tại vị trí thời gian  $t$  tương ứng. Có thể thấy rằng, ảnh hưởng của hệ số ma sát đã tác động lên hình thái khối trượt, cụ thể khi ma sát tăng lên đã làm cho sức kháng cắt của vật liệu tăng lên, làm giảm chiều dài trượt.



Hình 4: Ảnh hưởng của hệ số ma sát giữa các phần tử  $\mu_p$  đến hình thái khối trượt, (a) chiều dài khối trượt theo thời gian, (b) mối quan hệ giữa giá trị cuối cùng của khối trượt với  $\mu_p$ .

Nguyen và nhóm nghiên cứu đã chỉ rõ sự ảnh hưởng của hệ số ma sát giữa các phần tử đến chiều cao và chiều dài cũng như hình thái của khối trượt [24], khi hệ số ma sát lớn hơn 0,3 thì gần như không có sự ảnh hưởng đến chiều dài khối trượt, trong khi đó ngược lại khi giá trị ma sát giữa các phần tử nhỏ hơn 0,3 thì thấy rõ mức độ lan rộng của chiều dài khối trượt lớn. Điều này được giải thích do khi ma sát giảm thì tính linh động hay là lực quán tính giảm, dẫn đến động năng tăng lên làm cho chiều dài khối trượt lớn hơn như kết quả hình 4b, với  $l_f$  là chiều dài cuối cùng được đo được của khối trượt.

#### 4.2. Ảnh hưởng của hình dạng hạt vật liệu

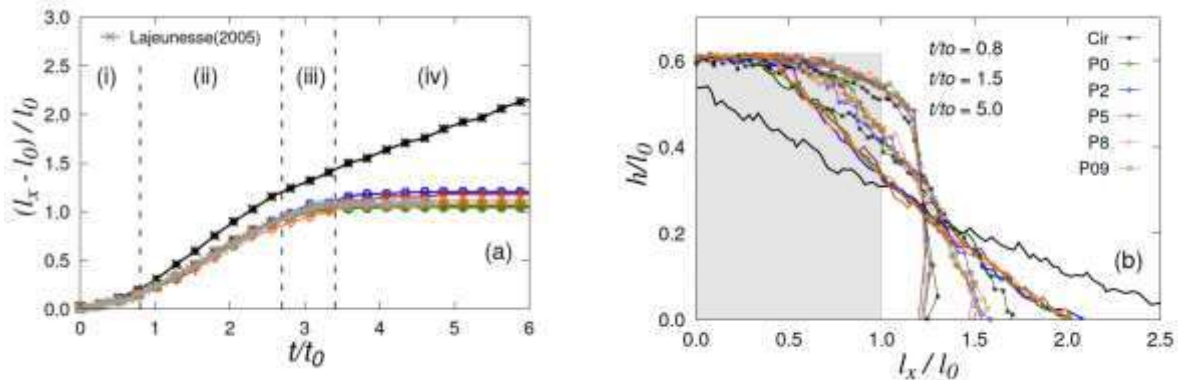
Như đã đặt vấn đề ở phần trên, ảnh hưởng của hình dạng hạt cấu thành trong khối vật liệu cần được quan tâm và hiểu rõ hơn, đặc biệt là với

các phần tử có góc cạnh. Hình 5 a,b mô tả ảnh hưởng của các dạng hạt đến hình thái khối trượt trong các mô phỏng với các dạng phần tử vật liệu khác nhau từ hạt tròn (ký hiệu Cir) đến các phần tử ngũ giác nội tiếp đường tròn (ký hiệu P0, P2, P5, P8 và P09).

Hình 5a mô tả diễn tiến chiều dài khối trượt theo thời gian, trong đó  $t_0$  được định nghĩa là biến đổi của thế năng  $t_0 = \sqrt{h_0/g}$ . Kết quả cho thấy ảnh hưởng của hình dạng hạt vật liệu khác nhau, khi vật liệu dạng tròn thì mức độ trượt lớn hơn rất nhiều so với các vật liệu dạng ngũ giác. Tuy nhiên ảnh hưởng của các dạng vật liệu ngũ giác góc cạnh khác nhau thì không đáng kể, phù hợp với thí nghiệm của Lajeunesse và nhóm nghiên cứu [4]. Suốt quá trình trượt được chia làm 4 giai đoạn như đề cập ở phần mô tả mô hình mục 2.2, cụ thể

giai đoạn (i) từ khi khối sạt trượt bị kích hoạt đến  $t/t_0 = [0-0,8]$ , giai đoạn (ii) là  $t/t_0 = [0,8-2,7]$ , giai đoạn (iii) là  $t/t_0 = [2,7-3,3]$  và giai đoạn (iv) là giai đoạn ổn định sau giai đoạn 3. Dễ dàng thấy rằng trong giai đoạn 2, chiều dài khối trượt tăng lên nhanh đáng kể, đây là giai đoạn chuyển thế năng của cột theo phương đứng sang động năng theo phương ngang, các hạt có

xu hướng chuyển dịch mạnh. Hình 5b thể hiện hình thái khối sạt trượt theo các mốc thời gian tương ứng với các vùng ở hình 5a. Tuy nhiên do tác động của hình dạng các phần tử ngũ giác nên sự chuyển dịch này giảm đáng kể so với hạt tròn. Mặc dù giá trị ma sát lớn những vật liệu dạng hạt tròn có bản chất dễ lăn, trượt và xoay nên phạm vi chiều dài khối sạt rất lớn.



Hình 5: Hình thái khối sạt trượt trong suốt thời gian: (a) chiều dài và (b) chiều cao của các mô phỏng với các dạng vật liệu khác nhau

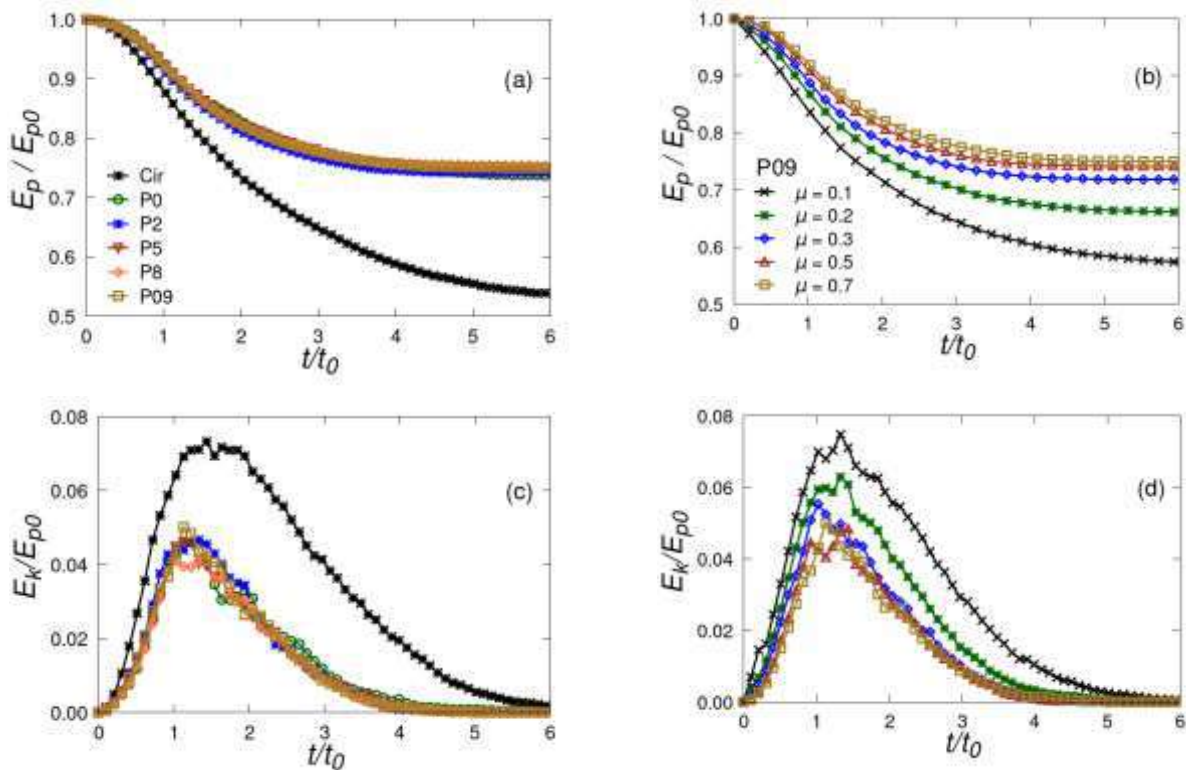
### 4.3. Năng lượng khối sạt trượt

Một trong các yếu tố quan trọng khi xét đến ảnh hưởng của hình dạng hạt đến quá trình sạt trượt đó là năng lượng, vì khi các phần tử đa giác có khả năng cài khóa lẫn nhau, làm ngăn cản chuyển động của các phần tử, do vậy làm giảm năng lượng nhanh chóng. Để thực hiện khảo sát ảnh hưởng, trong bài báo này xem xét đến năng lượng của khối sạt trượt từ khi bị kích hoạt đến khi ổn định, tức là khi vận tốc của các hạt tiến đến bằng không hoặc động năng trung bình của khối sạt tiến về bằng không. Thế năng và động năng được định nghĩa theo:  $E_p = \sum_{i=1}^N m_i g h_i$  và  $E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i v_i^2$ , trong đó  $h_i$ ,  $m_i$  và  $v_i$  lần lượt là chiều cao, khối lượng, và vận tốc của các phần tử  $i$  tương ứng với thời gian xét. Năng lượng ban đầu  $E_{p0}$  được xác định là thế năng ban đầu của khối vật liệu chưa bị kích hoạt.

Hình 6 mô tả biến thiên năng lượng (thế năng và động năng) của các trường hợp mô phỏng khác nhau. Kết quả cho thấy rằng, các mẫu vật liệu có dạng ngũ giác khác nhau gần

như không có sự khác nhau về sự biến thiên năng lượng, tuy nhiên thế năng trung bình giảm rất lớn với mẫu tròn. Trong khi thế năng giảm của các trường hợp vật liệu dạng ngũ giác khoảng 27% thì vật liệu dạng tròn có xu hướng giảm gần 50% thế năng. Trong khi các hạt ngũ giác đan cài vào nhau, hạn chế sự dịch chuyển giữa các phần tử hơn dẫn đến động năng đạt cực đại nhỏ hơn so với hạt tròn, được thể hiện trong kết quả hình 6a và 6c.

Khi thay đổi các trường hợp mô phỏng khác nhau trên mẫu P09 cho các giá trị ma sát thì kết quả tại hình 6b và 6d thấy rằng, ứng với các giá trị ma sát lớn đã làm giảm hay ngăn sự vận động của các phần tử trong hệ thống dẫn đến năng lượng giảm. Đặc biệt là tương ứng với các trường hợp ma sát nhỏ hơn và lớn hơn 0,3 như đã phân tích ở các phần trên. Như vậy, đối với các hạt góc cạnh thì tác động của việc then cài lẫn nhau giữa các phần tử làm năng lượng bị giữ lại tại các liên kết trong hệ thống, dẫn đến các phần tử không thể chuyển động được.



Hình 6: Biến thiên năng lượng (thế năng và động năng) theo thời gian sạt trượt ứng với các mô phỏng: (a) và (c) hình dạng hạt khác nhau, (b) và (d) thay đổi hệ số ma sát của mẫu P09

#### 4.4. Mức độ liên kết trong hệ thống

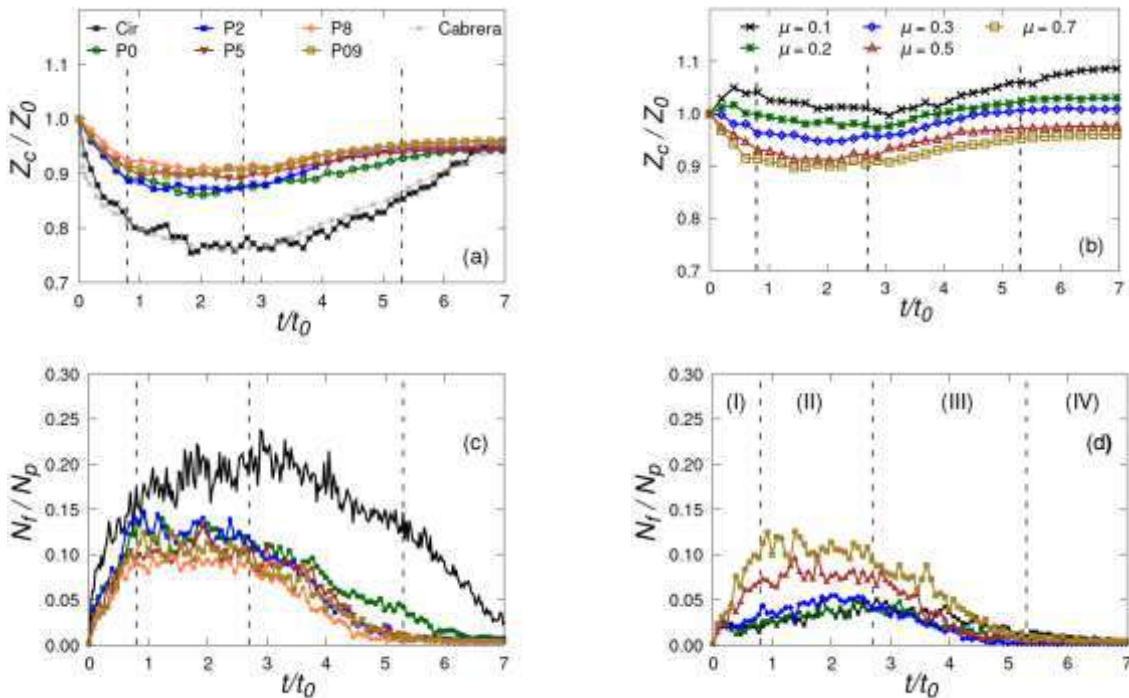
Đối với các hạt vật liệu dạng đa giác, hiện tượng then cài hoặc cản trở chuyển động giữa các phần tử xảy ra làm cho liên kết giữa các phần tử được duy trì trong hệ thống, đã làm giảm động năng cũng như hạn chế dịch chuyển của các phần tử như đã phân tích ở trên. Trong phần này, nghiên cứu làm rõ thêm ảnh hưởng của hình dạng hạt được phân tích bởi sự liên kết giữa các phần tử trong suốt quá trình sạt trượt. Lưu ý rằng, bề mặt vật liệu gồ ghề của vật liệu xảy ra hiện tượng cản trở chuyển động lẫn nhau, tức là tổng số liên kết giữa các phần tử duy trì ở mức cao và ngăn ngừa sự mất liên kết.

Hình 7a và 7b thể hiện tỉ số liên kết trung bình trên toàn hệ thống so với số liên kết tại thời điểm ban đầu là một hàm số với tỉ lệ thời gian trong đó  $Z$  được định nghĩa là  $Z = 2N_c/N_p$  trong đó  $N_c$  là tổng số lượng liên kết ứng với các thời điểm,  $N_p$  là tổng số phần tử trong mô hình [11]. Kết quả hình 7a thể hiện rõ sự mất liên kết trong gian đoạn đầu rất nhanh, duy trì mất liên kết này và phục hồi lại liên kết sau đó.

Đặc biệt là sự ảnh hưởng của các hình dạng vật liệu cấu thành khối sạt trượt, khi mà tỉ lệ hạt càng đều thì càng dễ dàng mất liên kết, đặc biệt là vật liệu dạng hình tròn. Khi thực hiện đối sánh với kết quả của Cabrera và nhóm nghiên cứu [25] thì cho kết quả rất tương đồng khi nhóm nghiên cứu này thực hiện mô hình dạng hạt tròn. Trái ngược với đó là khi hạt có hình dạng góc cạnh kém đều thì sự mất liên kết ít hơn, điều này có thể do liên kết cạnh – cạnh dễ dàng được duy trì trong suốt quá trình sạt trượt. Kết quả hình này phản ánh sự ảnh hưởng rõ nét của dạng hạt vật liệu cấu thành khối sạt trượt trong bài toán sạt lở. Hình 7b mô tả số liên kết của mẫu hạt vật liệu P09 với các giá trị ma sát giữa các phần tử, thấy được rằng sự ảnh hưởng của hệ số ma sát này là tương đối lớn, tỉ lệ thuận với việc tăng hệ số ma sát. Giai đoạn đầu, tỉ lệ này tăng lên do ma sát nhỏ, dẫn đến sự tự sắp xếp các phần tử trong hệ thống, trong khi ma sát lớn hơn thì không xảy ra. Sau đó giảm ở giai đoạn 2, giai đoạn mà ảnh hưởng của trọng lực làm cho các hạt ở

phía ngoài khối trượt (bên phải) theo phương thẳng đứng. Bước qua giai đoạn 3, thì khối trượt có xu hướng trượt dài trên bề mặt nằm ngang theo phương x, và phục hồi lại liên kết đến khi vận tốc khối trượt giảm đến không (đạt ổn định) ở giai đoạn 4. Mặc dù số liên kết trung bình  $Z_c$  tăng tại hệ số ma sát thấp, điều này chưa phản ánh đúng bản chất của tác động hình dạng vật liệu. Vì tại ma sát thấp, các tiếp xúc hình thành nhiều nhưng không bền, dẫn đến cấu trúc lỏng lẻo, chiều dài khối trượt lớn. Ngược lại, khi ma sát tăng, số tiếp xúc trung bình giảm nhẹ nhưng lại tạo nên các ràng buộc hình học mạnh và dai dẳng hơn, hạn chế chuyển động, dẫn đến hình thái đồng ổn định và vận động bị cản trở rõ hơn như đã phân tích

ở mục 4.1 và 4.2 và 4.3. Hình 7a và 7b này cũng làm rõ được các quá trình sạt trượt như là sụp đổ, lan truyền, chảy tràn và ổn định. Tuy nhiên khi so sánh với kết quả hình 5a về chiều dài lắng đọng thì mặc dù thời gian đoạn 3 và đoạn 4 xác định ở hình 7 lớn hơn, vì khi chiều dài gần như thay đổi ít rồi đạt đến ổn định thì liên kết có sự tăng đáng kể rồi mới đạt đến độ ổn định. Điều này có thể do các phần tử hạt vật liệu tìm kiếm sự ổn định trên bề mặt khối trượt như hình 1 tại thời điểm  $t = 0,3$  giây. Riêng đối với hạt vật liệu dạng tròn thì do lực quán tính và hình dạng hạt nên sự phục hồi liên kết chậm điều này thấy rõ trong các kết quả năng lượng, chiều dài khối trượt đã phân tích ở trên.



Hình 7: Mức độ liên kết và mật liên kết trung bình trong hệ thống: (a) và (c) hình dạng hạt khác nhau, (b) và (d) thay đổi hệ số ma sát của mẫu P09

Khi nghiên cứu xét đến tỉ lệ các phần tử vật liệu bị mất liên kết thì hình 7c và 7d cho thấy rằng khoảng 5% đến 10% của khối vật liệu dạng hạt góc cạnh, và hơn 20% đối với hạt vật liệu dạng tròn bị mất liên kết. Lưu ý ở đây,  $N_f$  là số lượng phần tử mất hẳn liên kết, hoặc không có bất kỳ liên kết, tương tác với phần tử khác trong hệ thống. Các phần tử có hệ số s

lớn thì sự liên kết tốt hơn so với các hạt có giá trị s nhỏ, điều này hợp lý khi liên kết bề mặt được duy trì lớn, lưu giữ liên kết bền hơn so với các trường hợp s nhỏ như thể hiện ở hình 7c. Hay nói cách khác là nó tăng khả năng then cài lẫn nhau, làm giảm động năng và chiều dài hay phạm vi dịch chuyển lan truyền của khối sạt. Trong khi hệ số ma sát nhỏ thì sự

mắt liên kết giảm như kết quả hình 7d, điều này đã được phân tích như trên, ít phần tử bị mắt liên kết tuy nhiên mức độ liên kết này không bền và khi ma sát giữa lớn đã khóa các phần tử tại các liên kết cạnh - cạnh với nhau.

## 5. KẾT LUẬN

Tác động của hình dạng hạt cấu thành khối vật liệu đến quá trình sạt trượt trên mặt phẳng nằm ngang được khảo sát thông qua việc áp dụng phương pháp phần tử rời rạc, bằng những mô phỏng với các dạng vật liệu khác nhau, hệ số ma sát khác nhau. Tất cả các mô phỏng được thực hiện trên mã nguồn mở GDMTK-2D của Viện nghiên cứu Cơ học và Xây dựng của Pháp. Khối sạt trượt được cấu thành từ các phần tử có dạng tròn, ngũ giác đều đến không đều được kích hoạt để xảy ra sạt trượt. Từ những kết quả nhận được, các dạng vật liệu có hình ngũ giác tác động khá rõ nét đến quá trình sạt trượt như là giảm chiều dài khối sạt; sự duy

trì mối liên kết chặt chẽ trong hệ thống; sự biến thiên năng lượng nhỏ hơn so với dạng vật liệu hình tròn. Bên cạnh đó, khi khảo sát trên mẫu vật liệu ngũ giác với các trường hợp mô phỏng hệ số ma sát giữa các phần tử khác nhau, thì thấy rằng các trường hợp ma sát lớn làm tăng khả năng kháng cắt của vật liệu, và giảm đáng kể phạm vi ảnh hưởng của khối vật liệu khi xảy ra sạt trượt.

Bài báo này chỉ xét đến trường hợp hạt vật liệu với trường hợp hạt vật liệu khô trong mô hình 2 chiều, không bị ảnh hưởng của các yếu tố nước, hay tính kết dính giữa các phần tử vật liệu. Nghiên cứu tập trung xét khi khối vật liệu có tỉ lệ chiều cao so với chiều dài cột ban đầu thấp ( $h_0/l_0 = 0,6$ ). Tuy nhiên những kết quả đã được đối sánh với các công trình quốc tế đã công bố, đảm bảo khoa học để làm tài liệu tham khảo trong việc nghiên cứu các hiện tượng sạt trượt diễn ra ngày càng phức tạp hiện nay.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Taboada A, Estrada N. Rock-and-soil avalanches: Theory and simulation. *J Geophys Res Solid Earth* 2009;114. <https://doi.org/10.1029/2008JF001072>.
- [2] Nguyen TH, Vo TT. Effect of inter-particle friction on the behavior stability of rock-fill dams. *Khoa Học Kỹ Thuật Thủy Lợi và Môi Trường* 2023;86:3–10.
- [3] Vo TT, Tran DM, Nguyen CT, Nguyen TK. Discrete element investigation of the mobility of granular mass flows. *Solid State Commun* 2023;369. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2023.115190>.
- [4] Lajeunesse E, Monnier JB, Homsy GM. Granular slumping on a horizontal surface. *Physics of Fluids* 2005;17. <https://doi.org/10.1063/1.2087687>.
- [5] Lube G, Huppert HE, Sparks RSJ, Freundt A. Collapses of two-dimensional granular columns. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* 2005;72. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.72.041301>.
- [6] Balmforth NJ, Kerswell RR. Granular collapse in two dimensions. *J Fluid Mech* 2005;538:399–428. <https://doi.org/10.1017/S0022112005005537>.
- [7] Man T, Huppert HE, Li L, Galindo-Torres SA. Deposition morphology of granular column collapses. *Granul Matter* 2021;23. <https://doi.org/10.1007/s10035-021-01112-7>.
- [8] Man T, Zhang Z, Huppert HE, Galindo-Torres SA. Axisymmetric column collapses of bifrictional granular mixtures. *J Fluid Mech* 2023;963. <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.217>.
- [9] Gong J, Cheng L, Liu M, Jiang J, Ou X. The effect of particle shape on the collapse characteristics of granular columns via the DEM. *Advanced Powder Technology* 2024;35. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2023.104283>.
- [10] Saint-Cyr B, Delenne JY, Voivret C, Radjai F, Sornay P. Rheology of granular materials composed of nonconvex particles. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* 2011;84:1–14. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.84.041302>.
- [11] Binaree T, Azéma E, Estrada N, Renouf M, Preechawuttipong I. Combined effects of contact friction and particle shape on strength properties and microstructure of sheared granular media. *Phys Rev E* 2020;102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.022901>.

- [12] Guo P, Su X. Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials. *Canadian Geotechnical Journal* 2007;44:579–91. <https://doi.org/10.1139/T07-010>.
- [13] Lu R, Luo Q, Wang T, Connolly DP, Xie T. A combined experimental and DEM investigation of grain interlocking in sheared granular assemblies. *Particuology* 2024;90:436–51. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.01.015>.
- [14] Tran TD, Nezamabadi S, Bayle JP, Amarsid L, Radjai F. Effect of interlocking on the compressive strength of agglomerates composed of cohesive nonconvex particles. *Advanced Powder Technology* 2025;36. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2025.104780>.
- [15] Vo TT, Nguyen TK. Collapse dynamics and deposition morphology of low-viscocohesive granular columns on a rough horizontal surface. *Phys Rev E* 2024;109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.109.014904>.
- [16] Lai Z, Jiang E, Zhao L, Wang Z, Wang Y, Li J. Granular column collapse: Analysis of inter-particle friction effects. *Powder Technol* 2023;415. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118171>.
- [17] Jean M, Moreau JJ. Unilaterality and dry friction in the dynamics of rigid body collections. *Proceedings of Contact Mechanics International Symposium, Lausanne, Switzerland: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes; 1992, p. 31–48.*
- [18] Moreau JJ. An introduction to unilateral dynamics. In: Frémond M, Maceri F, editors. *Novel approaches in civil engineering*, Springer-Verlag; 2004, p. 1–46.
- [19] Radjai F, Dubois F. *Discrete-element modeling of granular materials*. Wiley-Iste; 2011.
- [20] Azéma É, Radjai F, Roux JN. Internal friction and absence of dilatancy of packings of frictionless polygons. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* 2015;91:1–5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.91.010202>.
- [21] Nezamabadi S, Nguyen TH, Delenne JY, Radjai F. Modeling soft granular materials. *Granul Matter* 2017;19:1–12. <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0689-y>.
- [22] Nguyen TH, Nezamabadi S, Delenne JY, Radjai F. Compaction of granular materials composed of deformable particles. *EPJ Web Conf* 2017;140:4–7. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714005013>.
- [23] Nguyễn TH, Ngô TV. Nghiên cứu hình thái biến dạng và tương tác giữa các hạt vật liệu của khối đá đắp đập. *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng* 2024;3:56–63. <https://doi.org/10.59382/j-ibst.2024.vi.vol3-8>.
- [24] Nguyen T-H, Ngo T-V, Vo T-T. Combined Inter-Particle and Wall-Particle Friction Coefficient Effects on Collapse Mobility and Deposition Morphology of a Granular Column Composed of Pentagonal Grains. *Mechanics of Solids* 2025. <https://doi.org/10.1134/S0025654425600618>.
- [25] Cabrera M, Estrada N. Granular column collapse: Analysis of grain-size effects. *Phys Rev E* 2019;99. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.99.012905>.