

KHẢO SÁT HIỆU QUẢ CỦA CÁC GIẢI PHÁP ĐẬP CHẮN TRONG PHÒNG CHỐNG LŨ Bùn đá tác động đến tường chắn hạ lưu

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF DAM SOLUTIONS IN MITIGATING DEBRIS FLOW IMPACTS ON A DOWNSTREAM RIGID BARRIER

NGÔ THANH VŨ^a, VÕ THÀNH TRUNG^b, NGUYỄN THANH HẢI^{a,*}

^aKhoa Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

^bKhoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Đà Nẵng

*Tác giả đại diện: Email: nthai@dut.udn.vn

Ngày nhận 12/9/2026, Ngày sửa 28/9/2026, Chấp nhận 30/9/2026

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2026.vi.vol3-4>

Tóm tắt: Dòng lũ bùn đá chuyển động trên địa hình dốc có thể tạo tải trọng lớn lên công trình hạ lưu. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử rời rạc ba chiều với hạt superquadric để mô phỏng dòng hạt khô, đại diện cho pha vật liệu rắn, nhằm đánh giá hiệu quả của ba dạng đập chắn gồm đập kín, đập khe và đập giàn thép, bố trí tại hai vị trí cách nguồn 1,0m và 1,5m. Kết quả cho thấy vị trí đập ảnh hưởng rõ đến diễn biến năng lượng, trong khi hình thức đập chi phối mạnh khả năng lưu giữ vật liệu và lực tác động lên tường chắn ở hạ lưu. Đập kín cho hiệu quả giảm tải trọng tại hạ lưu cao nhất, trong khi đập khe cho lượng vật liệu truyền qua và lực tác động còn lại lớn nhất trong 3 loại. Những kết quả này cho thấy hiệu quả giảm tải phụ thuộc đồng thời vào việc nghiên cứu bố trí hình thức công trình chặn dòng, và vị trí đặt công trình phù hợp với điều kiện nghiên cứu.

Từ khóa: Lũ bùn đá, Phương pháp phần tử rời rạc, Hạt superquadric, Đập kín, Đập khe, Đập giàn thép.

Abstract: Debris flows moving over steep terrain can impose severe loads on downstream structures. This study employs a three-dimensional Discrete Element Method (DEM) with superquadric particles to simulate dry granular flow as a representation of the solid phase in debris flow, aiming to evaluate the effectiveness of three check-dam configurations—closed, slit, and steel-grid dams—installed at 1.0 and 1.5 m from the source. The results show that dam location has a stronger influence on the evolution of flow energy, whereas dam configuration more strongly controls material retention and the residual load on the downstream rigid barrier. The closed dam provides the highest reduction in downstream impact, while the slit dam allows the greatest material transmission and produces the largest residual impact force among the three configurations. These

results indicate that effective impact mitigation depends on both the dam configurations and its location, which should be selected appropriately according to the flow and site conditions.

Keywords: Debris flow, Discrete Element Method (DEM), Superquadric particles, Closed dam, Slit dam, Steel-grid dam.

1. Đặt vấn đề

Dòng lũ bùn đá là một trong những dạng dòng chảy địa chất, mà nó cuốn theo lượng đất đá tăng có kích thước lớn dọc theo dòng chảy, và có khả năng gây ra thiệt hại nghiêm trọng đối với công trình, cơ sở hạ tầng và khu dân cư ở hạ lưu. Khi chuyển động trên địa hình dốc, vật liệu có thể gia tốc nhanh dưới tác dụng của trọng lực, chuyển hóa thế năng thành động năng và tạo ra tác động va đập đáng kể khi tương tác với các công trình hay gây thiệt hại đáng kể cho con người ở hạ lưu [1], [2]. Hiện tượng này ngày càng xảy ra khá phổ biến ở Việt Nam đặc biệt ở vùng đồi núi dốc tại miền Bắc và miền Trung, nơi địa hình thường có độ dốc trung bình khoảng 30⁰-50⁰, địa chất đá vôi nứt nẻ mạnh [3], [4]. Vì vậy, kiểm soát sự lan truyền của dòng vật liệu và giảm tải trọng truyền tới các công trình ở hạ lưu là một nội dung quan trọng trong phòng chống và giảm nhẹ tác động của lũ bùn đá [5]. Vào tháng 4 năm 2025, công trình đập chắn Sabo đầu tiên được xây dựng tại xã Nậm Păm (cũ) nay là xã Mường La, tỉnh Sơn La, Việt Nam nhằm kiểm soát dòng lũ bùn đá, giữ lại các khối đá lớn, ngăn chặn gỗ trôi và các vật liệu khác có khả năng gây nguy hiểm, qua đó giảm thiểu rủi ro và thiệt hại cho khu vực hạ lưu.

Trong thực tế, nhiều giải pháp công trình đã được sử dụng để kiểm soát dòng vật liệu, trong đó phải kể đến các giải pháp công trình như là đập kín, đập khe, đập dạng lưới hoặc giàn kết cấu thép, các giải pháp

tiêu năng và hệ thống cọc tiêu năng [6], [7], [8], [9], [10]. Mỗi hình thức công trình này có cơ chế làm việc khác nhau. Đập kín ngăn chặn trực tiếp dòng vật liệu; đập khe cho phép một phần vật liệu đi qua khe mở; trong khi đập dạng lưới/giàn thép phân tán quá trình truyền vật liệu thông qua nhiều lỗ mở. Hơn nữa, việc bố trí các vị trí của các giải pháp công trình trên tuyến dòng chảy cũng phải được xem xét. Do đó, hiệu quả của một công trình không chỉ phụ thuộc vào hình thức kết cấu mà còn liên quan đến vị trí mà công trình được bố trí trên đường chuyển động của dòng.

Các nghiên cứu thực nghiệm và mô hình số đã cung cấp nhiều hiểu biết về tải trọng tác động của dòng vật liệu lên tường chắn phía hạ lưu [11], [12], [13], [14]. Nổi bật có nhóm tác giả Jiang và Towhata (2013) [11] đã thực hiện thí nghiệm về tác động của dòng vật liệu dạng hạt khô lên tường chắn cứng và chỉ ra rằng tải trọng tác động là kết quả của tương tác động lực học giữa dòng vật liệu và công trình. Các nghiên cứu về đập khe cũng cho thấy kích thước khe và cơ chế truyền vật liệu qua công trình có ảnh hưởng đáng kể đến tải trọng và khả năng lưu giữ. Tuy nhiên, các nghiên cứu nêu trên chủ yếu tập trung vào cơ chế tác động của dòng hạt lên một công trình đơn lẻ hoặc ảnh hưởng của đặc trưng hạt và trạng thái dòng đến tải trọng. Việc đánh giá đồng thời ảnh hưởng của hình thức đập chắn vị trí bố trí đập đến quá trình lưu giữ vật liệu và tải trọng còn lại truyền tới một công trình tiếp nhận ở phía sau vẫn cần được làm rõ hơn.

Một vấn đề khác liên quan đến việc mô hình hóa dòng vật liệu là ảnh hưởng của hình dạng hạt đến ứng xử của dòng và quá trình truyền tải trọng. Nhiều mô hình số sử dụng các phần tử dạng cầu trong mô phỏng ba chiều hoặc mô hình hạt tròn trong mô phỏng hai chiều để đại diện cho vật liệu. Trong khi đó, vật liệu tự nhiên thường có hình dạng không cầu và hình học không đều, do đó cơ chế tiếp xúc, lăn, trượt và khóa hình học có thể khác đáng kể so với giả thiết hạt cầu. Albaba và cộng sự (2015) [15] đã sử dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng dòng hạt khô chuyển động trên máng nghiêng và tác động lên tường chắn cứng. Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của hình dạng hạt được khảo sát thông qua việc so sánh phần tử dạng cầu và phần tử dạng cụm hạt (clump), được tạo bởi hai hạt cầu chồng lấn. Kết quả cho thấy phần tử clump làm giảm chuyển động quay của hạt, tăng hiệu ứng khóa hình học và cho kết quả lực tác động gần với thực nghiệm hơn so với phần tử cầu.

Trên cơ sở đó, phương pháp phần tử rời rạc (Discrete Element Method – DEM) với phần tử superquadric được sử dụng trong nghiên cứu hiện tại nhằm mô tả hình dạng hạt phi cầu và tương tác hạt – hạt, hạt – tường biên một cách phù hợp hơn. Nghiên cứu sử dụng dòng hạt khô như một mô hình đơn giản hóa của pha rắn trong lũ bùn đá/lũ đá để đánh giá đồng thời ảnh hưởng của hình thức và vị trí bố trí đập chắn đến sự biến đổi năng lượng, khả năng lưu giữ hoặc truyền vật liệu và tải trọng tác động lên tường chắn phía hạ lưu. Mô phỏng DEM ba chiều với hạt superquadric được sử dụng để so sánh ba hình thức đập gồm đập kín, đập khe và đập giàn thép tại hai vị trí trên máng nghiêng. Ba nhóm chỉ tiêu được phân tích gồm: (i) thay đổi trạng thái năng lượng của dòng; (ii) lưu giữ hoặc cho phép truyền một phần khối vật liệu đất đá chảy qua công trình; và (iii) giảm tải trọng tác động lên tường chắn hạ lưu. Cách tiếp cận này cho phép nhìn nhận hiệu quả của công trình theo một chuỗi cơ chế vật lý thay vì đánh giá dựa trên một chỉ tiêu đơn lẻ.

2. Phương pháp nghiên cứu và mô hình nghiên cứu

2.1 Phương pháp nghiên cứu

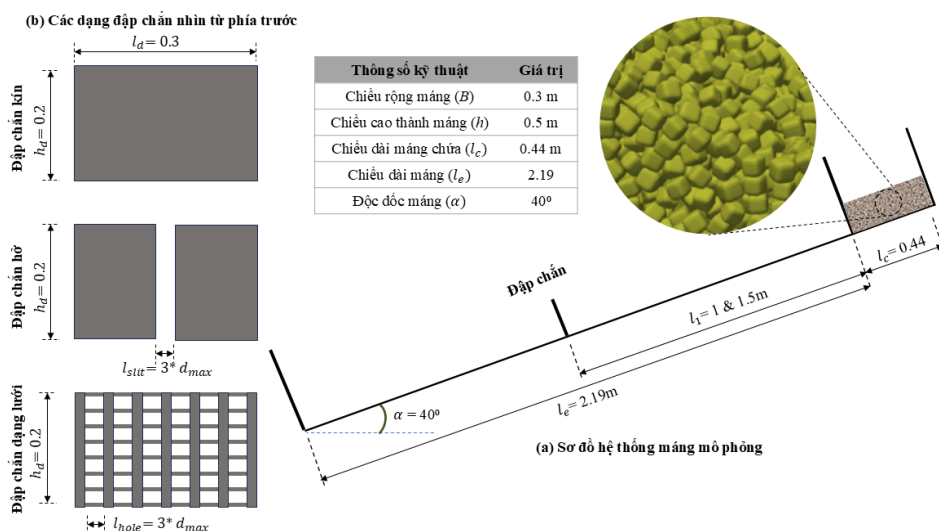
Trong nghiên cứu này, dòng vật liệu được đơn giản hóa dưới dạng dòng hạt khô, đại diện cho pha rắn của lũ bùn đá/lũ đá, nhằm tập trung khảo sát cơ chế chuyển động, lưu giữ và truyền tải trọng của vật liệu hạt khi tương tác với các giải pháp đập chắn. Phương pháp phần tử rời rạc (Discrete Element Method – DEM), được đề xuất bởi Cundall và Strack [16], được sử dụng để mô phỏng chuyển động và tương tác của từng phần tử vật liệu rời trong suốt quá trình mô phỏng. Chuyển động của hạt được xác định từ các phương trình cân bằng động lực học, còn tương tác tiếp xúc giữa các phần tử được mô tả bằng mô hình Hertz. Mô hình cho phép mô phỏng trực tiếp các quá trình va chạm, ma sát, trượt, lăn, tái sắp xếp của vật liệu dạng hạt [17], [18], [19], [20]. Trong nghiên cứu này, các phần tử superquadric được sử dụng thay cho các phần tử cầu lý tưởng. Cách tiếp cận này phù hợp với mục tiêu mô tả vật liệu phi cầu và cho phép mô phỏng quá trình tương tác giữa vật liệu với đáy máng, thành máng, đập chắn và tường chắn hạ lưu. Bộ công cụ mã nguồn mở LIGGGHTS được sử dụng để thực hiện các mô phỏng trong nghiên cứu này [21].

2.2 Mô hình nghiên cứu

Mô hình nghiên cứu gồm một máng nghiêng có chiều dài hình học 2,63 m và bề rộng 0,30 m, đặt

ngiêng 40° so với phương ngang. Ở cuối máng bố trí một tường chắn cứng để ghi nhận tải trọng tác động của phần vật liệu truyền xuống hạ lưu. Khối vật liệu ban đầu được bố trí ở phía thượng lưu trong một miền có kích thước $0,44 \text{ m} \times 0,15 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$ theo các phương dọc máng, phương đứng và phương ngang. Khối vật liệu gồm khoảng 17.000 hạt superquadric cấu thành từ hai nhóm hạt có khối lượng lần lượt khoảng $0,0013 \text{ kg}$ và $0,0019 \text{ kg}$. Mô hình sử dụng cấp phối nhị phân gồm hai nhóm hạt có kích thước đặc trưng $0,008 \text{ m}$ và $0,010 \text{ m}$ với tỷ lệ số lượng xấp xỉ 1:1. Các hạt được phân bố ngẫu nhiên trong miền vật liệu (hình 1a) nhằm tạo cấu trúc ban đầu không có sự sắp đặt trước, phù hợp với đặc trưng của vật liệu hạt rời trong thực tế. Các hạt superquadric có cùng chỉ số góc cạnh là 4. Khác với phần tử dạng hình cầu thường được sử dụng trong mô phỏng DEM, phần tử superquadric cho phép mô tả gần đúng về hình dạng góc cạnh của hạt vật liệu, qua đó phản ánh hợp lý hơn các cơ chế lăn, trượt, khóa hình học của vật liệu tự nhiên. Kích thước hạt được lựa chọn đủ đảm bảo không bị ảnh hưởng của ma sát tường biên đến quá trình dịch chuyển của hạt vật liệu, đồng thời đảm bảo khối hạt vật liệu không bị sắp xếp quá chặt ở thời điểm ban đầu.

Sau khi cửa giữ vật liệu được loại bỏ, các hạt vật liệu chuyển động dưới tác dụng của trọng lực, di chuyển dọc theo máng rồi tương tác với hệ thống đập được bố trí giữa máng. Trong nghiên cứu này, hai vị trí đập được xem xét, tương ứng với khoảng cách $l_1 = 1,0 \text{ m}$ và $1,5 \text{ m}$ tính từ nguồn vật liệu như mô hình. Vị trí được sơ bộ lựa chọn căn cứ vào quá trình biến thiên động năng của dòng đối với trường hợp không bố trí đập chắn, và trước khi động năng đạt cực đại. Ba loại đập gồm đập kín, đập khe và đập giàn thép được xem xét với cùng chiều cao $h_d = 0,20 \text{ m}$ và chiều dài đập theo phương vuông góc dòng $l_d = 0,30 \text{ m}$. Đập khe được tạo bởi hai khối đập với khe trung tâm có bề rộng $l_{slit} = 3 \times d_{max}$; đập giàn thép gồm 36 lỗ với kích thước đặc trưng $l_{hole} = 3 \times d_{max}$ như mô tả trong Hình 1b, với d_{max} được định nghĩa là đường kính lớn nhất của hạt vật liệu. Việc lựa chọn kích thước của khe trung tâm và kích thước lỗ trên đập giàn thép, đủ lớn để cho các hạt có thể vượt qua giữa khe hoặc vượt qua được các lỗ mà đã được khuyến cáo của những nghiên cứu trước đây [7], [14]. Sau khi tương tác với đập, phần vật liệu không được giữ lại tiếp tục chuyển động đến tường chắn hạ lưu. Toàn bộ mô hình mô phỏng nghiên cứu này được mô tả trong Hình 1, để khảo sát hiệu quả của các giải pháp phòng chống lũ bùn đá tác động lên tường chắn hạ lưu.



Hình 1. Mô hình khảo sát hiệu quả của các giải pháp phòng chống lũ bùn đá tác động lên tường chắn

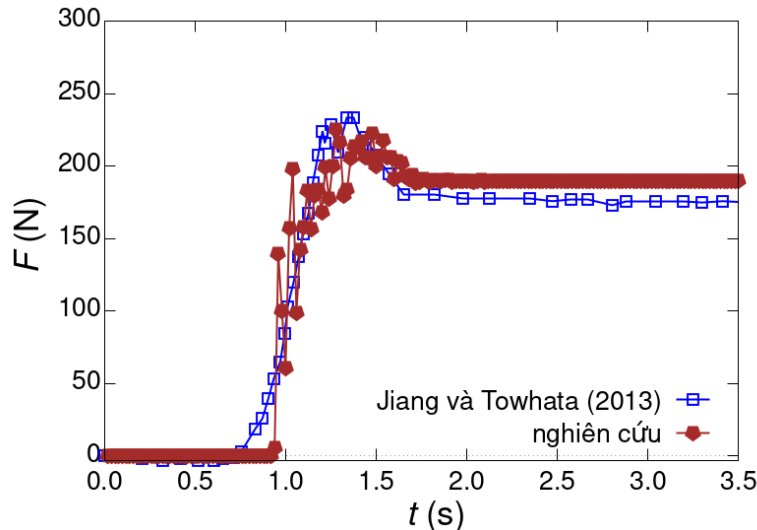
2.3 Kiểm chứng mô hình

Trước khi khảo sát các cấu hình đập, hay vị trí đặt các đập chắn, mô hình không bố trí đập chắn được sử dụng để kiểm chứng khả năng tái hiện tải trọng tác động lên tường chắn. Mô hình số được xây dựng và kiểm chứng với mô hình thực nghiệm của Jiang và Towhata (2013). Trong trường hợp này, sau khi được giải phóng,

toàn bộ khối vật liệu chuyển động trên máng và tác động trực tiếp vào tường chắn cuối máng. Lực tác động vào tường chắn theo thời gian của mô hình số được so sánh với kết quả thực nghiệm của Jiang và Towhata (2013) [11]. Kết quả trên Hình 2 cho thấy diễn biến lực thu được từ mô hình số có xu hướng tương đồng với thí nghiệm, cả về thời điểm xuất hiện tải trọng lớn và

mức lực sau khi hệ đạt trạng thái ổn định. Trên cơ sở đó, bộ thông số đã kiểm chứng được sử dụng cho các mô phỏng khác có bố trí đập chắn trên dọc tuyến dòng chảy nhằm đánh giá hiệu quả của các giải pháp công

trình. Bộ thông số chính được trình bày tại Bảng 1, như là khối lượng riêng của vật liệu là 2300 kg/m^3 , mô đun Young là $5,84 \times 10^6$, hệ số Poisson là 0,3, bước thời gian là $2 \times 10^{-5} \text{ (s)}$.



Hình 2. Đối chứng kết quả về lực tác động lên tường chắn với mô hình thực nghiệm [11]

Bảng 1. Bộ thông số chính được sử dụng trong các mô phỏng

Tên tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng riêng hạt vật liệu	ρ	2300	kg/m^3
Khối lượng hạt nhỏ	m_s	0,0013	kg
Khối lượng hạt lớn	m_l	0,0019	kg
Ma sát giữa hạt – hạt	μ_{p-p}	0,49	
Ma sát giữa hạt – tường	μ_{p-w}	0,40	
Hệ số poisson	ν	0,3	
Mô đun Young	E	$5,84 \times 10^6$	
Bước thời gian	Δt	2×10^{-5}	s

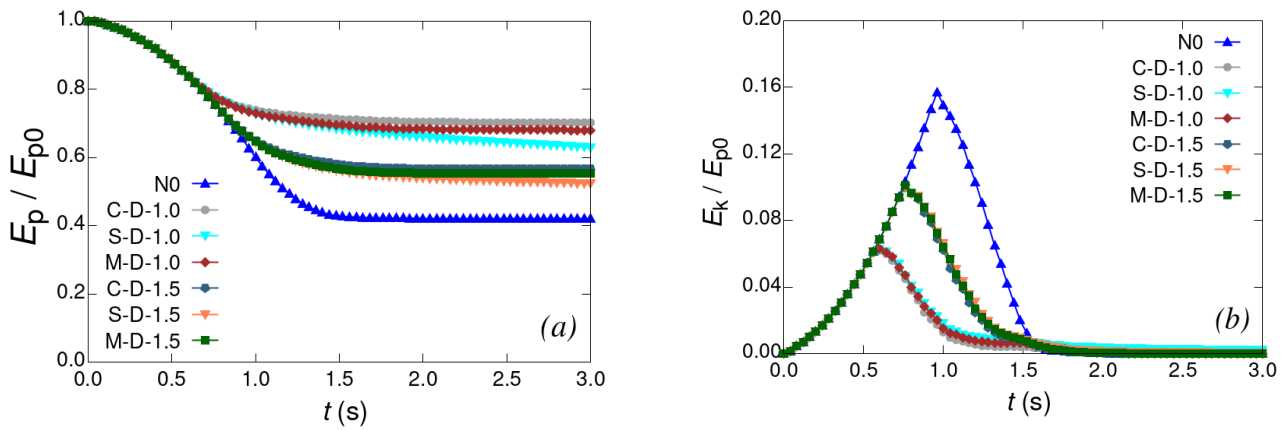
3. Kết quả

Hiệu quả của các giải pháp được đánh giá theo ba nhóm chỉ tiêu, thứ nhất là sự biến thiên năng lượng của dòng thông qua các đại lượng chuẩn hóa E_p/E_{p0} , E_k/E_{p0} , E_{kx}/E_{p0} và E_{kz}/E_{p0} , trong đó E_{p0} là thể năng ban đầu của toàn bộ khối vật liệu. Thứ hai là khả năng lưu giữ vật liệu, được đánh giá thông qua khối lượng M và tỷ số lưu giữ $\eta = M/M_0$, trong đó M_0 là tổng khối lượng vật liệu đất đá được mô phỏng. Thứ ba là tải trọng tác động lên tường chắn hạ lưu, gồm thành phần theo phương đứng F_z , thành phần theo phương ngang F_x và lực tổng hợp F tác động vuông góc với tường chắn hạ lưu. Các ký hiệu được sử dụng để đơn giản định nghĩa các hình dạng đập cũng như vị trí bố trí đập trên tuyến lần lượt là: trường hợp không có đập (N0) và các trường hợp có đập kín (C-D), đập khe (S-D) và đập dạng giàn thép

(M-D), ký hiệu 1.0 hay 1.5 là hai vị trí được khảo sát tương ứng với $l_1 = 1,0 \text{ m}$ và $1,5 \text{ m}$.

3.1 Hiệu quả của các giải pháp trong diễn biến năng lượng

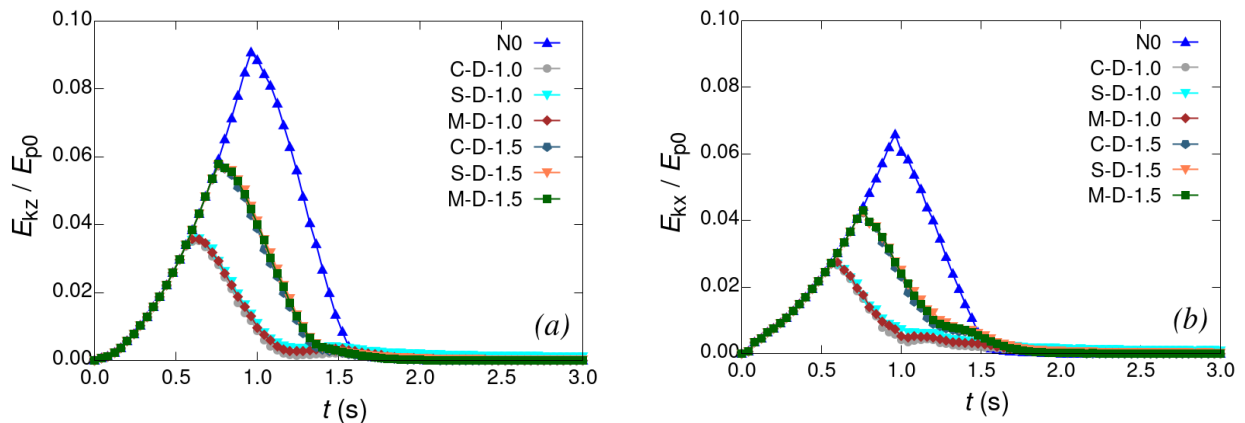
Hình 3 trình bày sự biến thiên của thể năng và động năng chuẩn hóa trong suốt quá trình mô phỏng, trong đó $E_p = mgh$, $E_k = 0,5mv_i^2$, $E_{kx} = 0,5mv_{x,i}^2$, $E_{kz} = 0,5mv_{z,i}^2$, m, g, v_i lần lượt là khối lượng của từng hạt superquadric trong mô phỏng, gia tốc trọng trường $g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$, vận tốc của từng phân tử. Trong giai đoạn đầu, sau khi giải phóng, thể năng giảm nhanh khi vật liệu chuyển động xuống dốc nghiêng và một phần năng lượng được chuyển hóa thành động năng. Sau khi vật liệu tương tác với công trình và tái sắp xếp lại các vị trí, đường năng lượng dần tiến đến trạng thái ổn định như mô tả tại Hình 3a.



Hình 3. Biến thiên (a) thế năng và (b) động năng chuẩn hoá theo thời gian

Đối với thế năng trong Hình 3a, ở trạng thái cuối, thế năng chuẩn hóa của trường hợp không có đập ổn định ở khoảng $E_p/E_{p0} \approx 0,41$. Khi bố trí đập ở vị trí 1,0 m, các đường cong ổn định quanh khoảng 0,62-0,70, trong khi tại vị trí 1,5 m, giá trị ổn định đạt khoảng 0,55-0,58. Sự khác biệt này phản ánh việc đập chắn được đặt ở các thời điểm khác nhau của quá trình chuyển động. Khi đập được bố trí gần nguồn hơn, dòng bị can thiệp sớm hơn, nên vật liệu bị giữ và tái sắp xếp sớm hơn trước khi có thể chuyển hóa thêm một phần thế năng ban đầu. Khi đập ở xa hơn $l_1 = 1,5$ m, vật liệu có quãng đường chuyển động dài hơn khi bị chặn bởi đập chắn, nên hệ tiếp tục hạ thấp độ cao và tiến tới trạng thái năng lượng khác.

Đối với động năng trong Hình 3b, trường hợp không bố trí đập chắn (N0), E_k/E_{p0} tăng nhanh và đạt cực đại khoảng 0,16 trước khi giảm nhanh về gần bằng không sau khoảng 1,5s. Khi có đập, cực đại động năng giảm rõ rệt tại cùng một vị trí bố trí. Các trường hợp $l_1 = 1,0$ m đạt cực đại khoảng 0,065, trong khi các trường hợp $l_1 = 1,5$ m có thể đạt xấp xỉ 0,10. Đáng chú ý, tại cùng một vị trí, sự biến thiên động năng không có khác biệt rõ giữa 3 hình thức bố trí đập chắn. Như vậy, trong phạm vi đang xét, thời điểm dòng bị đập chắn lại thì ảnh hưởng rõ hơn so với bản thân các hình thức kết cấu của đập đối với trạng thái động năng tổng thể hệ thống.



Hình 4. Hiệu quả của các giải pháp trong việc hạn chế động năng theo (a) phương đứng và (b) phương ngang dòng lũ bùn đá

Hình 4 phân tách động năng theo phương đứng và phương ngang, qua đó làm rõ hơn cơ chế trên. Động năng theo phương đứng E_{kz} (Hình 4a) xuất hiện rõ rệt trong giai đoạn dòng tương tác và tái sắp xếp. Trường hợp không có đập cho giá trị E_{kz} lớn hơn và điểm cực đại xuất hiện muộn hơn, phù hợp với quá trình dòng phát triển trên toàn chiều dài máng trước khi tác động lên tường chắn. Khi đập được bố trí gần

nguồn, giá trị động năng phương đứng xuất hiện sớm hơn và có biên độ nhỏ hơn so với khi đập được bố trí ở 1,5 m. Thành phần E_{kx} được trình bày tại Hình 4b đại diện trực tiếp hơn cho chuyển động theo phương dọc máng, cũng thể hiện xu hướng tương tự.

Nhìn chung, Hình 3 và Hình 4 chỉ ra rằng vai trò của đập chắn là làm thay đổi thời điểm và trạng thái động lực học của dòng khi bị cản. Tuy nhiên, sự phân

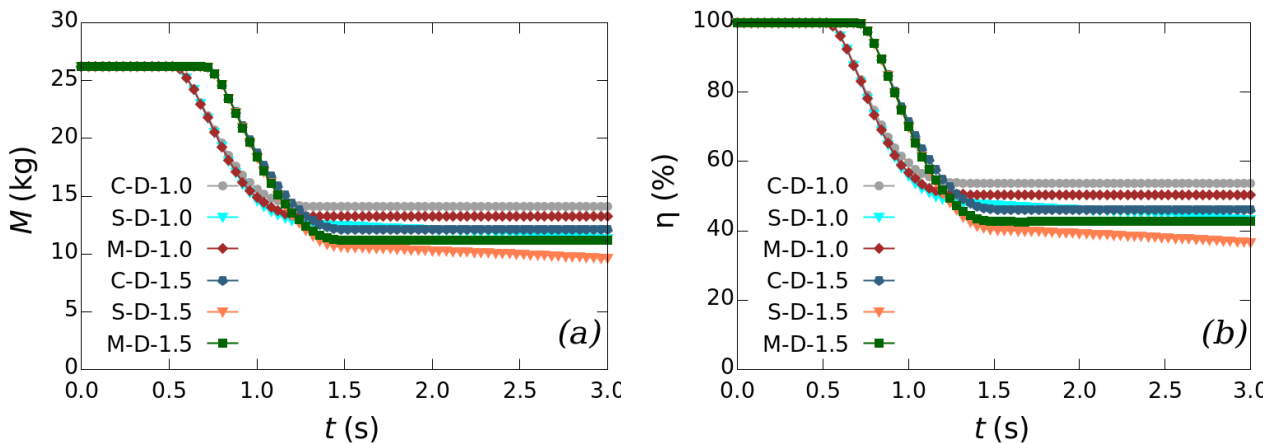
biệt giữa đập kín, đập khe và đập giàn thép chưa thật sự rõ nếu chỉ quan sát năng lượng tổng hoặc các thành phần động năng. Kết quả này gợi ý rằng năng lượng là chỉ tiêu phù hợp để đánh giá ảnh hưởng của vị trí bố trí đập chắn, nhưng chưa đủ để phân biệt cơ chế làm việc của các hình thức đập. Để làm rõ vai trò của hình thức đập, cần tiếp tục xét lượng vật liệu thực sự được giữ lại và vượt qua công trình.

3.2 Hiệu quả lưu giữ khối lượng vật liệu

Hình 5a thể hiện khối lượng vật liệu M kg được lưu giữ ở phía thượng lưu đập chắn theo thời gian. Các đường cong bắt đầu rời trạng thái ban đầu vào khoảng 0,6 s đối với các trường hợp $l_1 = 1,0$ m và khoảng 0,7 s đối với $l_1 = 1,5$ m. Điều này phản ánh thời gian cần thiết để dòng vật liệu lan truyền từ nguồn tới vị trí công trình.

Khi bắt đầu tương tác với đập, khối lượng vật liệu trước đập giảm gồm một phần vật liệu tích tụ phía trước công trình và phần vượt qua được đập chắn. Với đập kín, quá trình lưu giữ khối lượng tiến tới một giá trị ổn định tương đối cao, cho thấy cơ chế giữ vật

liệu mang tính bền vững. Đập giàn thép cũng đạt mức lưu giữ khoảng 13,2 và 11,2 kg trong các khảo sát, chứng tỏ một phần vật liệu đã vượt qua được các lỗ mở trên hệ thống giàn thép. Cơ chế làm việc của đập giàn thép khác đập kín ở chỗ vật liệu được truyền qua theo nhiều lỗ nhỏ và đồng thời tương tác với các thanh chắn, do đó một phần vật liệu vẫn có thể bị giữ lại hoặc hình thành tích tụ cục bộ trước công trình. Tuy nhiên đập khe thể hiện xu hướng khác biệt rõ nhất. Khối lượng lưu giữ ở giai đoạn đầu tương tự như 2 đập khác, nhưng sau đó giảm dần khi mô phỏng tiếp tục. Sự giảm này là bằng chứng trực tiếp cho quá trình truyền vật liệu liên tục qua khe trung tâm sau khi khối vật liệu đã hình thành vùng tích tụ phía thượng lưu. Nói cách khác, khả năng lưu giữ của đập khe mang tính động: công trình có thể giữ lại một phần vật liệu trong giai đoạn đầu nhưng không duy trì toàn bộ lượng vật liệu đó khi dòng tiếp tục cấp vật liệu từ phía thượng lưu. Đây là điểm khác biệt quan trọng so với đập kín và là cơ sở để giải thích tại sao lực tác động lên tường chắn hạ lưu của đập khe vẫn lớn hơn.

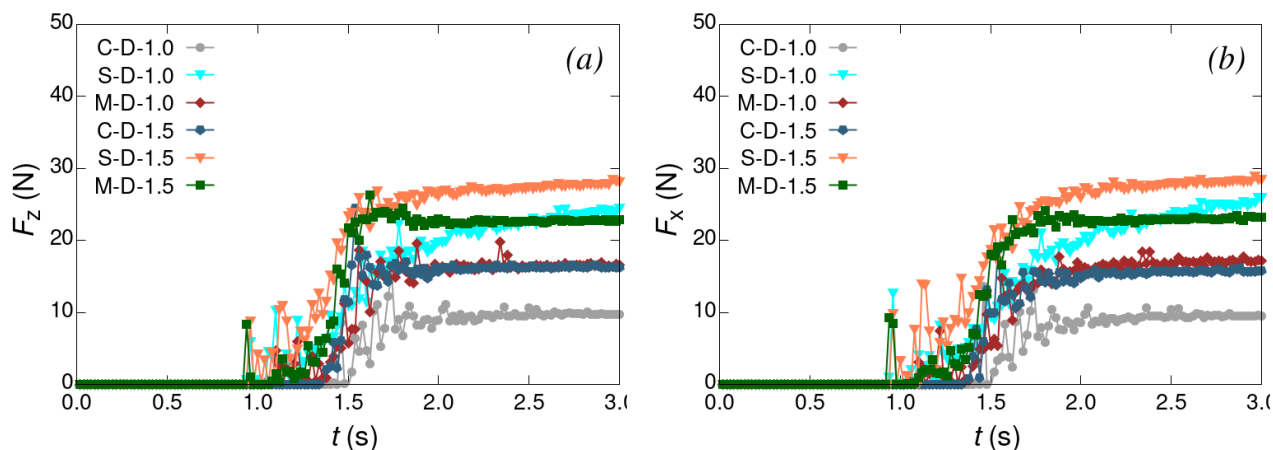


Hình 5. Khối lượng được lưu giữ lại trước đập chắn (a), và hiệu quả lưu giữ của các giải pháp đập chắn (b)

Hình 5b cho thấy cùng một cơ chế dưới dạng chuẩn hóa của tỉ lệ khối lượng lưu giữ lại $\eta = M/M_0$. Sau giai đoạn tích tụ, tỷ số lưu giữ của các dạng đập kín và dạng giàn thép duy trì ở mức tương đối ổn định, trong khi đập khe có xu hướng tiếp tục giảm theo thời gian. Vì vậy, hình dạng loại đập chắn trở thành yếu tố có ý nghĩa rõ rệt khi đánh giá khả năng kiểm soát khối lượng vật liệu truyền xuống hạ lưu. Kết quả này cũng cho thấy cùng một mức thay đổi về năng lượng không thể tạo ra cùng một lượng vật liệu truyền qua: cơ chế mở của công trình quyết định trực tiếp quá trình phân chia khối lượng giữa vùng thượng lưu và hạ lưu của đập chắn.

3.3 Hiệu quả giảm lực tác động

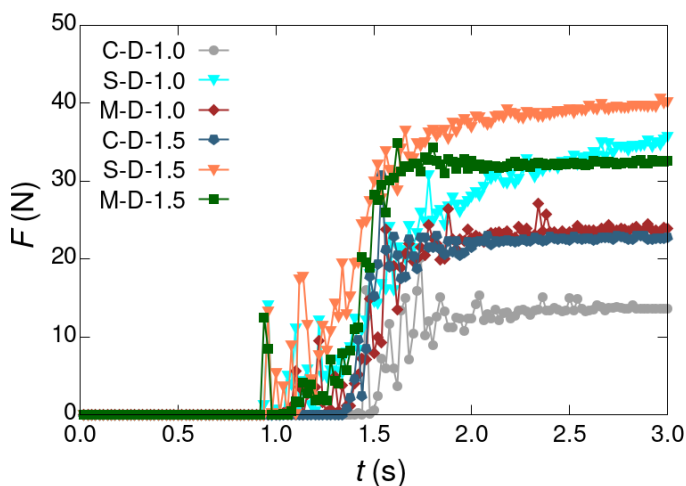
Các kết quả ở Hình 6 và Hình 7 cho phép kết nối trực tiếp hai cơ chế đã phân tích ở trên với tải trọng tác động vào tường chắn ở hạ lưu. Trong khi sự khác biệt về năng lượng giữa các hình thức đập tương đối nhỏ ở cùng một vị trí bố trí đập chắn, lực tác động lại phân biệt rõ hơn giữa đập kín, đập giàn thép và đập khe. Điều này cho thấy tải trọng tác động lên tường chắn hạ lưu phụ thuộc không chỉ vào năng lượng tổng của hệ thống mà còn phụ thuộc vào khối lượng vật liệu thực tế được lưu giữ trước tường chắn và trạng thái chuyển động của phần vật liệu đó.



Hình 6. Lực tác động lên tường chắn theo (a) phương đứng z và (b) phương ngang x

Theo phương đứng z, Hình 6a cho thấy đập kín giảm lực tác động vào tường chắn thấp nhất, đập khe ghi nhận lực tác động lớn nhất, còn đập giàn thép có giá trị trung gian được xác định tại trạng thái ổn định cuối cùng. Việc đập kín giữ lại phần lớn khối lượng vật liệu ở phía thượng lưu làm giảm đồng thời số lượng hạt vật liệu và thời gian tiếp xúc trực tiếp vào tường chắn, do đó thành phần lực đứng giảm rõ rệt. Ngược lại, với đập khe, vật liệu tiếp tục đi qua khe và tạo ra các đợt va chạm, tái sắp xếp ở vùng hạ lưu, làm thành phần lực đứng duy trì ở mức cao hơn. Đối với đập giàn thép, sự tương tác phân tán vật liệu qua nhiều lỗ trên hệ thống giàn thép nên tường chắn ở hạ lưu tiếp nhận lực tác động ở mức trung gian. Theo

phương ngang x mô tả Hình 6b, xu hướng tương tự được quan sát trong Hình 6a nhưng ý nghĩa cơ học còn trực tiếp hơn, bởi đây là phương chuyển động chính của dòng và cũng là phương truyền động lượng tới tường chắn. Do đó, sự khác biệt về F_x có liên hệ chặt chẽ với lượng vật liệu vượt qua đập và khả năng duy trì vận tốc của phần vật liệu này. Đập kín làm giảm F_x mạnh nhất; đập khe duy trì F_x lớn hơn do vật liệu truyền qua khe; đập giàn thép cho tải trọng trung gian. Sự tương đồng của thứ tự giữa F_z và F_x cho thấy hiệu quả của đập không chỉ làm giảm một thành phần lực riêng lẻ mà còn làm thay đổi trạng thái va chạm của toàn dòng trước khi đến tường chắn.



Hình 7. Lực tổng hợp tác động lên tường chắn hạ lưu

Hình 7 cho thấy hiệu quả giảm tải trọng tổng thể rõ rệt hơn so với trường hợp không có đập. Trong thí nghiệm đối chứng, lực tổng tác động trực tiếp lên tường chắn đạt cực đại khoảng 240 N và sau đó ổn định ở khoảng 190 N. Khi bố trí đập, đỉnh lực lớn này được giảm mạnh, thậm chí hầu như không còn xuất hiện như trong trường hợp không có công trình (N0). Đây là một kết quả có ý nghĩa thực tế vì đối với công

trình bảo vệ, việc hạn chế tải trọng cực đại có ý nghĩa quan trọng không kém việc giảm tải trọng sau khi hệ đạt trạng thái ổn định.

Đập kín cho hiệu quả giảm lực lớn nhất cụ thể là khi bố trí tại $l_1 = 1,0$ m, giá trị lực tại tường chắn hạ lưu khoảng 13,63 N; với $l_1 = 1,5$ m, lực còn lại khoảng 22,72 N. So với mức ổn định khoảng 190 N của trường hợp không có đập, các giá trị này tương ứng

với mức giảm xấp xỉ 93% và 88%. Đập khe vẫn cho hiệu quả đáng kể nhưng kém hơn so với đập kín, với lực còn lại khoảng 38,80 N tại $l_1 = 1,0$ m và 41,32 N tại $l_1 = 1,5$ m, tương ứng mức giảm khoảng 80% và 79%. Đập giàn thép cho giá trị trung gian, phù hợp

với xu hướng lưu giữ khối lượng ở Hình 5, các giá trị thu nhận được cho thấy thay đổi vị trí từ 1,0 m sang 1,5 m lần lượt là 24,41 N và 32,62 N. Chi tiết giá trị các lực tác động lên tường chắn hạ lưu ở trạng thái ổn định cuối cùng thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 2. Tổng hợp lực tác động lên tường chắn ở trạng thái ổn định

Loại đập chắn	Đập chắn tại $l_1 = 1$ (m)	Đập chắn tại $l_1 = 1,5$ (m)	Đơn vị
Đập kín	13,63	22,72	N
Đập khe	38,80	41,32	N
Đập giàn thép	24,41	32,62	N

Một điểm đáng chú ý là kết quả về lực cho thấy không thể đánh giá hiệu quả công trình chỉ từ sự suy giảm năng lượng. Ở cùng một vị trí, các loại đập có sự biến thiên năng lượng khá tương đồng nhưng lực tác động vào tường chắn hạ lưu lại khác nhau rõ rệt. Nguyên nhân là lực phụ thuộc vào sự kết hợp giữa khối lượng, vận tốc, hướng chuyển động và thời gian tương tác của phần vật liệu thực sự truyền

tới tường chắn. Vì vậy, với những kết quả từ Hình 3 đến Hình 7 cho phép rút ra một cơ chế thống nhất: vị trí đập chi phối trạng thái năng lượng tại thời điểm dòng bị chặn; hình thức đập chi phối lượng vật liệu được giữ lại hoặc truyền qua; và sự kết hợp của hai yếu tố này quyết định lực tác động cuối cùng lên tường chắn hạ lưu, kết quả này có thể sơ bộ tóm tắt ở Bảng 3.

Bảng 3. Tổng hợp xu hướng hiệu quả của các giải pháp

Tiêu chí	Ảnh hưởng của vị trí	Ảnh hưởng của hình thức	Xu hướng chính
Năng lượng	Rõ rệt	Tương đối nhỏ	$l_1 = 1,0$ m làm giảm mức động năng cực đại so với 1,5 m
Khối lượng lưu giữ	Ảnh hưởng đến thời điểm bắt đầu tích tụ	Rõ rệt	Đập kín và đập giàn thép giữ ổn định; đập khe giảm sau cực đại
Lực F_z	Rõ rệt	Rõ rệt	Đập kín thấp nhất; đập khe cao nhất; đập giàn thép có mức trung gian
Lực F_x	Rõ rệt	Rõ rệt	Đập kín thấp nhất; đập khe cao nhất; đập giàn thép có mức trung gian
Lực tổng F	Rõ rệt	Rõ rệt	Đập kín hiệu quả giảm lớn nhất; vị trí gần nguồn ghi nhận lực thấp hơn

4. Kết luận

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phần tử rời rạc (DEM) ba chiều với hạt superquadric để mô phỏng dòng hạt khô và đánh giá hiệu quả của ba dạng đập chắn gồm đập kín, đập khe và đập giàn thép, được bố trí tại hai vị trí cách nguồn lần lượt 1,0 m và 1,5 m trên máng nghiêng 40°. Mô hình không bố trí đập chắn được đối chứng với thí nghiệm trước khi áp dụng cho các cấu hình khảo sát.

Kết quả cho thấy vị trí đập chắn ảnh hưởng rõ hơn đến diễn biến năng lượng: bố trí cách nguồn 1,0 m làm giảm đỉnh động năng hơn so với bố trí cách nguồn 1,5 m. Ngược lại, hình thức đập quyết định rõ hơn khả năng lưu giữ và lực tác động lên tường chắn hạ lưu cụ thể giải pháp đập kín ghi nhận lực nhỏ nhất; đập khe cho lực lớn nhất do vật liệu tiếp tục truyền qua khe; đập giàn thép ghi nhận giá trị lực ở mức

trung gian so với 2 loại đập khác. Tại $t = 3,0$ s, sáu cấu hình cho lực tổng khoảng 13,63 N đến 41,32 N, giảm khoảng 79–93% so với mức ổn định khoảng 190 N của trường hợp không bố trí đập chắn. Từ những kết quả đó, nhận thấy rằng việc lựa chọn và bố trí công trình phòng chống cần được thực hiện theo cách tiếp cận đa tiêu chí, để đạt được hiệu quả tốt nhất cho các giải pháp công trình.

Nghiên cứu hiện tại chỉ mô phỏng pha vật liệu hạt rời, khô nên chưa phản ánh đầy đủ pha lỏng, áp lực nước lỗ rỗng và tương tác hai pha của lũ bùn đá tự nhiên. Chiều cao đập mới khảo sát tại $h_d = 0,20$ m, hai vị trí bố trí đập chắn, một tỷ số mở $l_{slit} = 3 \times d_{max}$ với đập khe và $l_{hole} = 3 \times d_{max}$ với đập giàn thép. Các nghiên cứu tiếp theo hướng đến cần xem xét tỷ số mở so với kích thước hạt vật liệu, vị trí bố trí công trình cũng như mô hình hai pha để tăng khả năng khái quát và ứng dụng thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] V. Cabral, F. Reis, V. Veloso, C. Correa, C. Kuhn, and C. Zarfl (2023), "The consequences of debris flows in Brazil: a historical analysis based on recorded events in the last 100 years," *Landslides*, vol. 20, no. 3, pp. 511–529, Mar, doi: 10.1007/s10346-022-01984-7.
- [2] O. Hungr, S. Leroueil, and L. Picarelli (2014), "The Varnes classification of landslide types, an update," Springer Verlag. doi: 10.1007/s10346-013-0436-y.
- [3] P. Van Tien, V. C. Minh, D. M. Duc, L. H. Luong, D. H. Nam, and T. T. Hieu (2025), "Rainfall-induced catastrophic rapid and long-traveling landslide in Lang Nu hamlet: the worst natural landslide disaster in Vietnam," May 01, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s10346-025-02490-2.
- [4] B. T. Vũ và T. T. H. Nguyễn (2023), "Phân tích đặc trưng lưu vực phát sinh lũ bùn đá - lũ quét và cơ chế tác động của lũ ở lưu vực suối Nậm Păm," *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật và Công nghệ Việt Nam*, vol. 65 (6), pp. 58–66. Jun, doi: 10.31276/VJST.65(6).58-66.
- [5] Vũ Bá Thao (2020), "Công trình trị lũ bùn đá," *Tạp chí khoa học và công nghệ thủy lợi*, vol. 60, pp. 54–64.
- [6] W. Shen, T. Li, P. Li, and Y. Lei (2020), "Numerical assessment for the efficiencies of check dams in debris flow gullies: A case study," *Comput. Geotech.*, vol. 122, Jun, doi: 10.1016/j.compgeo.2020.103541.
- [7] H. Hu et al. (2020), "Effect of slit size on the impact load against debris-flow mitigation dams," *Eng. Geol.*, vol. 274, Sep, doi: 10.1016/j.enggeo.2020.105764.
- [8] L. Canelli, A. M. Ferrero, M. Migliazza, and A. Segalini (2012), "Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers - Experimental tests and impact analysis," *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 12, no. 5, pp. 1693–1699, doi: 10.5194/nhess-12-1693-2012.
- [9] S. Li et al. (2022), "Small-Scale Flume Investigation of the Performance of Step-Baffle Drainage Channels in Mitigating Debris Flows," *Front. Earth Sci. (Lausanne)*, vol. 10, Jul, doi: 10.3389/feart.2022.921716.
- [10] T. K. Nguyen, N. H. T. Nguyen, T. T. Vo, and L. Chen (2025), "Dissipative effects of baffles on the dynamics of debris flow and its impact on downstream structure," *Comput. Geotech.*, vol. 184, Aug, doi: 10.1016/j.compgeo.2025.107246.
- [11] Y. J. Jiang and I. Towhata (2013), "Experimental study of dry granular flow and impact behavior against a rigid retaining wall," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 46, no. 4, pp. 713–729, Jul, doi: 10.1007/s00603-012-0293-3.
- [12] X. Zhou, Y. Cui, J. Fang, H. Tang, Z. Zhang, and S. Wang (2025), "Link Between the Impact Mechanisms of Granular Flow-Dam Interaction and the Generated Seismic Signal: Insights From Laboratory Experiments," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 130, no. 4, Apr, doi: 10.1029/2024JB029946.
- [13] P. V. N. Ho, T. H. Nguyen, D. M. Tran, H. P. Nguyen, and T. T. Vo (2026), "Superquadric particle shape effects on the impact behavior of granular debris flows against a rigid barrier," *Powder Technol.*, vol. 480, Aug, doi: 10.1016/j.powtec.2026.122675.
- [14] T. V. Ngo, T. H. Nguyen, and T. T. Vo (2026), "Impact behavior and long-term retention mechanism of binary-size debris flows against a slit dam," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 85, no. 7, Jul, doi: 10.1007/s10064-026-05061-4.
- [15] A. Albaba, S. Lambert, F. Nicot, and B. Chareyre (2015), "Relation between microstructure and loading applied by a granular flow to a rigid wall using DEM modeling," *Granul. Matter*, vol. 17, no. 5, pp. 603–616, Oct, doi: 10.1007/s10035-015-0579-8.
- [16] P. A. Cundall and O. D. L. Strack (1979), "A discrete numerical model for granular assemblies," *Géotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47–65, Mar, doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47.
- [17] T.-H. Nguyen, T.-T. Vo, N. H. T. Nguyen, and D. C. Vu (2026), "A robust depositional point in friction-dominated granular flows," *Advanced Powder Technology*, vol. 37, no. 8, p. 105362, Aug, doi: 10.1016/j.appt.2026.105362.
- [18] T. T. Vo and T. H. Nguyen (2025), "Combined Effect of Particle Shape and Interparticle Friction on the Collapse Mobility and Deposition Morphology of a Granular Column," *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 50, no. 3, pp. 1412–1429, Feb, doi: 10.1002/nag.70174.
- [19] T. H. Nguyễn (2025), "Phân tích ảnh hưởng của lực liên kết trong khối vật liệu sạt trượt bằng phương pháp phần tử rời rạc," *Vietnam Institute for Building Science and Technology*, vol. 2025, no. vi.vol4, p. 55, Dec, doi: 10.59382/j-ibst.2025.vi.vol4-7.
- [20] T. H. Nguyen and T. T. Vo (2025), "Unified power-law scaling behavior of collapse mobility and deposition morphology of granular columns composed of frictional-pentagonal grains," *Granul. Matter*, vol. 27, no. 4, Nov, doi: 10.1007/s10035-025-01586-9.
- [21] C. Goniva, A. Hager, S. Amberger, and S. Pirker (2012), "Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM," *Progress in Computational Fluid Dynamics*, vol. 12, no. 3, pp. 140–152.