

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VỀ TÁC ĐỘNG ĐỘNG CỦA DÒNG CHẢY Bùn ĐÁ LÊN TƯỜNG CHẮN CỨNG ĐƠN

Nguyễn Thanh Sơn^{a,*}, Vũ Văn Lực^b, Đàm Đức Hùng^c, Phan Thị Nga^c,
Hoàng Phúc Lâm^c, Đinh Văn Nguyên^c

^aKhoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bBan Quản lý và Đào tạo kỹ sư CLC, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^cKhoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 04/4/2025, Sửa xong 16/5/2025, Chấp nhận đăng 19/5/2025

Tóm tắt

Việc hiểu rõ cơ chế tác động và dự báo chính xác tải trọng tác động của dòng lũ bùn đá lên các công trình bảo vệ là yếu tố quan trọng trong thiết kế các biện pháp kỹ thuật phòng chống. Trong nghiên cứu này, một chuỗi thí nghiệm trong phòng sử dụng máng trượt thu nhỏ đã được thực hiện để đánh giá cơ chế tác động của dòng chảy bùn đá lên tường chắn cứng đơn. Các đặc trưng động lực học của dòng chảy bùn đá, như vận tốc và áp lực tác động lên tường chắn, được đo đặc thông qua các cảm biến siêu âm và cảm biến lực. Kết quả cho thấy vận tốc dòng chảy bùn đá dao động từ 1,13 đến 2,2 m/s, trong khi áp lực lớn nhất tác động lên tường chắn nằm trong khoảng 1,36 đến 2,13 kPa. Dựa trên phân tích hồi quy, phương trình dự báo áp lực cực đại dòng chảy bùn đá lên tường chắn cứng bên dưới mái dốc đã được đề xuất theo mô hình thủy động lực học. Giá trị số Froude thu được ($Fr = 1,68 - 2,01$) có sự tương đồng tốt với các giá trị số Froude quan sát trong các sự kiện lũ bùn đá tự nhiên, cho thấy tính khả thi và độ tin cậy của mô hình máng trượt thu nhỏ trong việc tái hiện động lực học của dòng chảy bùn đá.

Từ khóa: lũ bùn đá; máng trượt; rào chắn cứng; lực tác động; tiêu tán năng lượng.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DEBRIS FLOW IMPACT DYNAMICS ON A SINGLE RIGID BARRIER

Abstract

Understanding and predicting the impact loads of debris flows on protective structures is crucial for the design of engineering countermeasures. In this study, a series of small-scale flume experiments were conducted to investigate the impact behavior of debris flow against a rigid retaining wall. Key hydrodynamic characteristics of the debris flows, including flow velocity and total impact pressure, were measured using ultrasonic sensors and load cells. Experimental results indicated that the debris flow velocity ranged from 1.13 to 2.2 m/s, while the maximum impact pressure on the rigid retaining wall varied between 1.36 and 2.13 kPa. Based on regression analysis, a new predictive equation for estimating the peak impact pressure exerted by debris flows on rigid barrier located at the slope base was proposed, derived from hydrodynamic modeling principles. The resulting Froude numbers ($Fr = 1.68 - 2.01$) show good agreement with those observed in natural debris flow events, demonstrating the feasibility and reliability of the small-scale flume model in replicating debris flow dynamics.

Keywords: debris flow; flume test; rigid barrier; impact force; energy dissipation.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(2V\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(2V)-04) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: sonnt@huce.edu.vn (Sơn, N. T.)

1. Giới thiệu

Do ảnh hưởng của biến đổi khí hậu, các tai biến tự nhiên nguy hiểm như lũ quét, lũ bùn đá và trượt lở đất đá và đang có xu hướng ngày càng gia tăng cả về tần suất, cường độ và phạm vi ảnh hưởng trên toàn thế giới [1]. Trong đó, lũ bùn đá (debris flow) là một dạng dòng chảy hỗn hợp vật chất không đồng nhất gồm đất, đá rời rạc (thường là sỏi, đá cuội và đá tảng), kết hợp với trầm tích mịn như đất sét, bùn sét và cát, chứa đầy nước chuyển động với một tốc độ rất cao [2, 3]. Lũ bùn đá thường xuất hiện trên các kênh suối ở khu vực đồi núi, nơi có độ dốc địa hình lớn, hình thành do sự nghẽn dòng tại một số các thung lũng sông hoặc trong các lưu vực thoát nước có cấu tạo dạng nút thắt cổ chai ở phần thượng lưu. Tại đây, vật liệu thô được tích tụ và bồi lắng. Vào mùa mưa hoặc trong các cơn bão nhiệt đới kèm mưa lớn kéo dài, khi một lượng lớn nước đổ, dòng chảy có thể phá vỡ các vật liệu đã tích tụ tại nút thắt, tạo thành dòng lũ bùn đá có khối lượng vật chất rất lớn, di chuyển với vận tốc cao (từ 0,5–20 m/s) [4]. Quá trình này cuốn theo nhiều vật chất trên đường đi, tàn phá cơ sở hạ tầng và gây thiệt hại nghiêm trọng về người, tài sản và môi trường sinh thái. Tại Việt Nam, lũ bùn đá xảy ra ở các tỉnh miền núi phía Bắc và một số khu vực miền núi thuộc Bắc Trung Bộ và Trung Trung Bộ [5]. Nhiều trận lũ quét, lũ bùn đá đã gây thiệt hại nặng nề về người và nhà cửa. Điển hình, vào sáng ngày 10/9/2024, một trận lũ quét-lũ bùn đá kinh hoàng đã xảy ra tại Làng Nủ, xã Phúc Khánh, huyện Bảo Yên, tỉnh Lào Cai, chôn vùi toàn bộ thôn làng với 33 hộ dân, 168 nhân khẩu, làm 52 người thiệt mạng. Hình 1 cho thấy tác động rất lớn của dòng lũ bùn đá lên cơ sở hạ tầng trường học ở trung tâm thị trấn Mù Cang Chải, Yên Bái vào ngày 03/08/2017 khiến 17 người chết và bị thương [6].

Không giống như trượt lở đất, lũ bùn đá thường xảy ra đột ngột, gần như không có cảnh báo trước và tạo ra lực tác động rất lớn lên các công trình vật trên đường di chuyển. Trong thực tế, việc quan trắc trực tiếp dòng lũ bùn đá gặp nhiều khó khăn do tần suất xuất hiện thấp và thời gian diễn ra ngắn. Điều này gây trở ngại đáng kể cho quá trình thu thập dữ liệu chi tiết nhằm phục vụ phân tích và đánh giá. Với mật độ vật chất cao hơn nước gấp nhiều lần, lũ bùn đá gây ra mối đe dọa nghiêm trọng đối với cơ sở hạ tầng và đời sống con người tại các khu vực miền núi. Để giảm thiểu một cách hiệu quả các tác động nguy hiểm của lũ bùn đá, các kết cấu phòng tránh như tường chắn bê tông cốt thép và đập chắn thường được sử dụng ở cuối kênh nhằm hạn chế thiệt hại [7, 8]. Tuy nhiên, việc thiết kế các kết cấu này đòi hỏi phải dự báo chính xác lực tác động cực đại tiềm tàng của dòng lũ bùn đá để đảm bảo tính ổn định và khả năng chống chịu của các kết cấu chắn giữ. Do đó, một trong những vấn đề quan trọng trong kỹ thuật phòng chống thiên tai và quản lý rủi ro là dự báo chính xác lực tác động hoặc áp lực của dòng lũ bùn đá lên các kết cấu chắn giữ bảo vệ [9].



Hình 1. Hình ảnh lũ bùn đá gây hư hỏng nặng cho cơ sở hạ tầng trường học ở trung tâm thị trấn Mù Cang Chải, Yên Bái vào ngày 03/08/2017 [6]

Nhiều các nghiên cứu đã được thực hiện nhằm khám phá đặc tính của dòng chảy bùn đá. Theo đó,

các mô hình để dự báo tác động của dòng lũ bùn đá được chia thành ba nhóm chính: (1) công thức kinh nghiệm dựa trên dữ liệu lịch sử, (2) mô hình thực nghiệm (bao gồm thí nghiệm hiện trường và trong phòng), và (3) mô hình số. Tuy nhiên, vẫn chưa có một mô hình hoàn chỉnh nào dựa trên cơ chế và lý thuyết đủ chính xác để ước tính lực tác động của lũ bùn đá trong thời gian thực nhằm hỗ trợ thiết kế công trình [10]. Ngoài ra, sự biến thiên của hệ số tác động của dòng chảy bùn đá trong các điều kiện khác nhau cũng cần được nghiên cứu sâu hơn để nâng cao độ tin cậy của các mô hình dự báo. Gần đây, các phương pháp mô phỏng số tiên tiến được xem là công cụ hiệu quả để nghiên cứu đặc tính và dự đoán lực tác động của dòng lũ bùn đá [11, 12]. Tuy nhiên, độ chính xác của các mô hình số thường bị hạn chế do sự không chắc chắn của dữ liệu đầu vào, bao gồm địa hình, đặc tính vật liệu và các điều kiện biên. Những yếu tố này có thể làm giảm đáng kể độ tin cậy của kết quả dự đoán. Đối với các thí nghiệm hiện trường, mặc dù đo đạc hiện trường có thể giúp xác định chính xác lực tác động của dòng lũ bùn đá, nhưng phương pháp này gặp nhiều hạn chế do khó dự báo chính xác thời điểm xảy ra lũ bùn đá. Việc lắp đặt và vận hành thiết bị đo đạc cũng rất tốn kém [13, 14]. Vì vậy, các mô hình thử nghiệm quy mô nhỏ trong phòng thường được sử dụng để nghiên cứu cơ chế chuyển động của dòng lũ bùn đá và đo đạc lực tác động lên kết cấu nhờ khả năng kiểm soát tốt các điều kiện biên và cho phép lặp lại thí nghiệm một cách dễ dàng [15]. Tuy nhiên, nhược điểm chính là khó khăn trong việc thiết lập tỷ lệ mô hình vật lý phù hợp để mô phỏng dòng chảy lũ bùn đá trong thực tế [3]. Phần lớn các nghiên cứu thực nghiệm trong phòng trước đây chỉ tập trung vào dòng chảy vật liệu rời, trạng thái khô đồng nhất tác động lên các kết cấu chắn giữ cứng [16]. Chỉ có rất ít nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện với dòng chảy lũ bùn đá có sự phân bố kích thước hạt rộng, và chảy nhớt [17]. Do đó, việc nghiên cứu lực tác động của dòng chảy bùn đá, có xét đến sự phân bố kích thước hạt trong thành phần vật liệu, là một hướng nghiên cứu quan trọng và cần thiết.

Từ những phân tích trên, có thể thấy rằng việc hiểu và dự báo lực tương tác giữa dòng lũ bùn đá với các kết cấu phòng tránh đóng vai trò quan trọng trong thiết kế nhằm đảm bảo an toàn cho các công trình. Trong nghiên cứu này, ba thử nghiệm mô hình thu nhỏ sử dụng máng trượt trong phòng thí nghiệm đã được thực hiện nhằm khám phá cơ chế tác động của dòng chảy bùn đá lên kết cấu tường chắn cứng bố trí bên dưới chân mái dốc. Quá trình tác động của dòng chảy lên tường chắn được ghi lại bằng hệ thống camera độ phân giải cao đặt tại nhiều vị trí khác nhau. Vận tốc và lực tác động của dòng bùn đá trước khi va chạm được đo đạc thông qua các cảm biến siêu âm kết hợp với các cảm biến lực được lắp đặt trực tiếp trên kết cấu. Ngoài ra, nghiên cứu cũng khảo sát và phân tích ảnh hưởng của vị trí đặt tường chắn đến lực tác động của dòng chảy bùn đá. Kết quả thu được từ nghiên cứu cung cấp một tài liệu hữu ích cho các kỹ sư trong việc thiết kế các biện pháp bảo vệ trước tác động của lũ bùn đá trong tương lai, dựa trên cơ sở khoa học đáng tin cậy.

2. Các mô hình dự báo lực tác động của dòng lũ bùn đá lên kết cấu chắn giữ cứng

Trong thiết kế kỹ thuật hiện nay, hai mô hình chính thường được sử dụng để ước tính lực tác động cực đại lên kết cấu chắn giữ là mô hình thủy tĩnh (hydrostatic model) và mô hình thủy động (hydrodynamic model) [18]. Các mô hình này dựa trên nguyên lý cân bằng động lượng chất lỏng và phương trình Bernoulli trong thủy lực học. Mô hình thủy tĩnh đã được áp dụng rộng rãi trong hơn 30 năm qua để ước tính lực tác động của dòng chảy lũ bùn đá. Theo mô hình này, lực tác động của dòng lũ bùn đá có thể được biểu diễn theo công thức sau:

$$F = \frac{1}{2} k \rho g h^2 w \quad (1)$$

trong đó F là lực tác động của dòng chảy bùn đất đá (N), k là hệ số áp lực thủy tĩnh, ρ là mật độ khối lượng riêng của dòng chảy vật liệu (kg/m^3), g là gia tốc trọng trường (m/s^2), h là chiều cao lớn nhất

của dòng chảy khi tiến gần sát kết cấu (m); w là chiều rộng của tường chắn (m). Mô hình thủy tĩnh giả định rằng áp lực của dòng chảy bùn đá phân bố theo chiều cao tác động có dạng tam giác, trong đó lực tác động chỉ phụ thuộc vào mật độ của dòng lũ và chiều cao dòng chảy. Để ước lượng lực tác động, hệ số kinh nghiệm k đã được sử dụng. Bảng 1 cung cấp một số giá trị tham khảo cho hệ số k , tùy thuộc vào đặc tính của dòng chảy và điều kiện thực tế [19, 20].

Đối với mô hình thủy động lực học, lực tác động lớn nhất của dòng chảy bùn đá lên kết cấu bảo vệ có thể xác định như sau:

$$F_p = \alpha \rho v_o^2 h w \quad (2)$$

trong đó F_p là lực va chạm cực đại (N); α hệ số áp lực động; ρ là mật độ vật chất dòng chảy; v là vận tốc dòng chảy vật liệu; h và w như định nghĩa bên trên. Trong công thức (2), hệ số α có vai trò quan trọng tới tính chính xác của mô hình dự báo. Các nghiên cứu chỉ ra rằng sự biến thiên lớn của hệ số α trong mô hình dự báo có thể bắt nguồn từ một số nguyên nhân như sự bất ổn trong thành phần dòng chảy (liên quan đến phân bố kích thước của nguồn vật liệu), đặc điểm của môi trường tự nhiên, loại hình kết cấu tường chắn và tác động của lực động [11]. Thông qua kết quả của 27 mô hình thực nghiệm, Cui và cs. [2] đã chỉ ra rằng hệ số động α phụ thuộc lớn vào đặc tính kích thước hạt của dòng bùn đá, với giá trị α dao động từ 0,4 đến 2. Watanabe và Ikeya [21] lần đầu tiên áp dụng mô hình thủy động lực học để phân tích dòng bùn núi lửa ở Nhật Bản, và họ phát hiện rằng giá trị của α dao động trong khoảng từ 2 đến 4, phụ thuộc vào hàm phân bố kích thước hạt của dòng hỗn hợp. Theo khuyến nghị của Văn phòng Địa kỹ thuật Hồng Kông [22], giá trị của α được xác định là 2,5 đối với kết cấu chắn giữ cứng. Canelli và cs. [23] đưa ra giả thuyết rằng giá trị nằm của α trong khoảng từ 1,5 đến 5. Nhìn chung, việc lựa chọn giá trị α chủ yếu phụ thuộc vào sự phán đoán chủ quan và kinh nghiệm của người thiết kế. Một số giá trị hệ số α đề xuất và phạm vi áp dụng của nó được tổng hợp và liệt kê như trong Bảng 2. Do đó, nó thiếu đi các minh chứng khoa học chặt chẽ và vẫn chưa có tiêu chí rõ ràng nào để áp dụng cho mọi loại dòng chảy lũ bùn đá. Hübl và cs. [10] chỉ ra rằng mô hình thủy động lực học có thể chưa hiệu quả trong việc dự đoán dòng lũ bùn đá với vận tốc thấp và độ sâu dòng chảy cao, trong khi mô hình thủy tĩnh cũng không thể cung cấp hiệu suất phù hợp trong việc dự đoán các dòng lũ bùn đá với vận tốc cao và độ sâu dòng chảy thấp. Vì vậy, số Froude (Fr), được xác định là tỷ số giữa lực quán tính và lực hấp dẫn của khối dòng chảy vật liệu, $Fr = v / \sqrt{gh \cos \theta}$, trong đó θ là góc nghiêng của máng trượt, đã được sử dụng rộng rãi để xác định quy mô tương tác của dòng vật chất với các kết cấu. Đối với cách tiếp cận này, số Froude cần phải có giá trị tương tự như các sự kiện lũ bùn đá trong tự nhiên. Hübl và cs. [10] đã chỉ ra rằng lực tác động từ các quan sát quy mô thực tế được ước tính trong phạm vi hệ số Froude từ 0 đến 2. Tuy nhiên, nhiều thí nghiệm trong phòng chủ yếu được thực hiện ở số Froude cao hơn, điều này cho thấy các mô hình dựa trên dữ liệu thực nghiệm chưa tương đồng với dữ liệu thực địa. Vì vậy, trong phần tiếp theo nhóm nghiên cứu sẽ trình bày các mô hình thực nghiệm quy mô nhỏ để phân tích lực tác động của dòng chảy bùn đá lên tường chắn cứng. Sự tương đồng về mặt động học giữa mô hình thí nghiệm trong phòng so với mô hình thực địa sẽ được đánh giá dựa trên thang đo Froude, nhằm đánh giá tính phù hợp của kết quả thu được từ mô hình nghiên cứu.

Bảng 1. Một số giá trị đề xuất cho hệ số áp lực thủy tĩnh

Giá trị k	Nguồn thông tin thu được	Tác giả
3,5 - 5,5	Lý thuyết và kinh nghiệm thực tế thiết kế	Lichtenhahn [24]
4,5	Lý thuyết và thực nghiệm trong phòng	Armanini [19]
2,5 - 7,5	Thực nghiệm trong phòng	Scotton & Deganutti [25]

Bảng 2. Một số giá trị của hệ số áp lực động và phương trình đề xuất để tính toán lực tác động của dòng lũ bùn đá, theo [26]

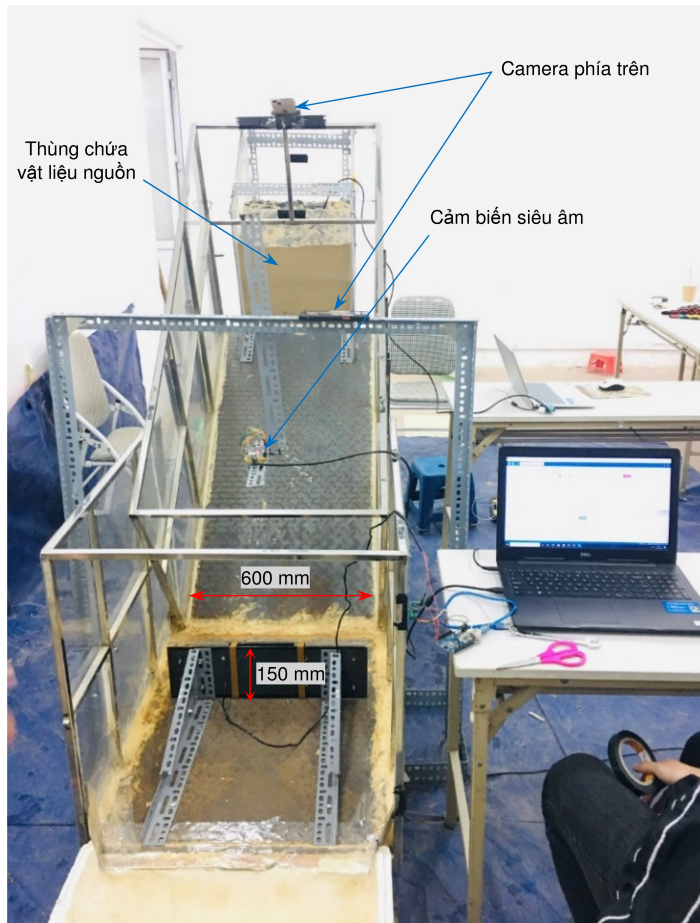
Giá trị α	Phương trình đề xuất	Phạm vi áp dụng	Tác giả
1,5	$F_{imp} = \alpha \rho v_o^2 h w$	Lực tác động phân bố đều và vuông góc với hướng dòng chảy	Hunger và cs. [18]
1,5 - 5	$F_{imp} = \alpha \rho v_o^2 h w$	Thực nghiệm trong phòng	Canelli và cs. [23]
0,7 - 2,0	$F_{imp} = \alpha \rho v_o^2 h w$	Dòng vật chất đồng nhất với $\rho < 1900 \text{ kg/m}^3$ và $\rho \geq 1900 \text{ kg/m}^3$	Wendeler [27]
$5,3Fr^{-1,5}$	$F_{imp} = 5,3Fr^{-1,5} \rho v_o^2 h w$	Dòng chảy bùn đá nhớt, $Fr < 3$	Cui và cs. [2]
$5Fr^{-1,2}$	$F_{imp} = 5\rho v_o^{0,8} (gh)^{0,6} h w$	Dòng vật chất đồng nhất	Hubl và cs. [10]
$7,23Fr^{-0,74}$	$F_{imp} = 7,23Fr^{-0,74} \rho v_o^2 h w$	Dòng lũ bùn đá, $Fr < 3$	Scheidl và cs. [14]

3. Thiết bị thí nghiệm và mô tả mô hình thực nghiệm

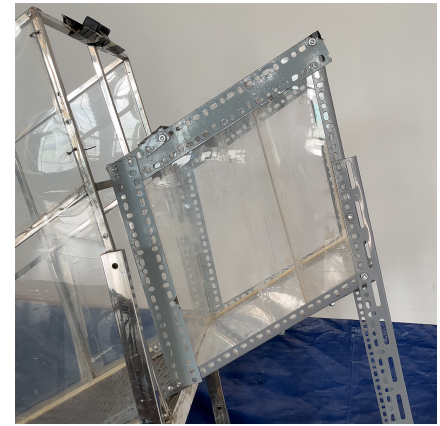
3.1. Sơ đồ hình học và thông số vật liệu

Các thí nghiệm được thực hiện thông qua mô hình máng vật lý như thể hiện trong Hình 2. Máng thí nghiệm được cấu tạo từ khung thép gồm hai phần: phần máng trượt trên dài 1200 mm và phần máng trượt dưới nằm ngang dài 800 mm (Hình 2(a)). Trong nghiên cứu này, phần máng trượt trên được cố định với góc nghiêng 40° nhằm cho phép gia tăng lực tác động của dòng hỗn hợp khi chúng va đập vào tường chắn phía dưới. Chiều rộng của máng trượt là 600 mm. Bản đáy của máng trượt được làm từ thép tấm có chiều dày 3,0 mm để đảm bảo không bị biến dạng dưới tác động của trọng lượng khối hỗn hợp vật liệu. Hai thành bên của máng thí nghiệm được làm bằng các tấm mica nhẵn trong suốt, cho phép quan sát và ghi lại chuyển động của dòng vật chất trong suốt quá trình thí nghiệm. Thùng chứa vật liệu ở phía trên cùng của máng trượt được thiết kế dạng hình hộp với kích thước: dài 40 cm, rộng 40 cm, và cao 45 cm, được cấu tạo từ nhựa mica cứng kết hợp khung thép bao quanh. Thể tích hỗn hợp vật liệu tối đa mà thùng chứa có thể chứa là khoảng $0,064 \text{ m}^3$. Thùng chứa được chia thành hai khoang, ngăn cách bởi một tấm chắn đục lỗ. Mục đích của sự phân chia này là để nước cấp từ phía sau có thể ngấm một cách từ từ vào hỗn hợp vật liệu trước khi chúng được tháo ra khỏi thùng chứa và chảy trên máng trượt (Hình 2(b)). Phía trước của thùng chứa được thiết kế là một hệ thống cửa nâng rút. Trong tất cả các thí nghiệm, tốc độ rút cửa là đủ nhanh để đảm bảo không ảnh hưởng đến ứng xử ban đầu của dòng chảy vật liệu.

Trong thực tế, đặc điểm của trầm tích lũ bùn đất đá thường bao gồm các vật chất có kích thước đa dạng. Vì vậy, nhóm nghiên cứu đã lựa chọn một hỗn hợp vật liệu bao gồm ba thành phần chính: cát mịn, đá dăm và cát thạch anh, để làm nguồn vật liệu trong nghiên cứu. Dựa trên mật độ hỗn hợp trong thực tế, tỷ lệ phần trăm các thành phần được thiết kế như sau: cát mịn (40%), thạch anh (15%), đá dăm (25%), và hàm lượng nước chiếm 20% thể tích. Tổng thể tích hỗn hợp ban đầu tương đương với $5,83 \times 10^4 \text{ cm}^3$, tương ứng với khối lượng 75 kg. Nồng độ chất rắn theo thể tích (được định nghĩa là thể tích hạt vật liệu trên tổng thể tích hỗn hợp) đạt 74,3%. Giá trị này phù hợp với quy ước của Iverson [28] về dòng lũ bùn đá, khi yêu cầu nồng độ thể tích rắn của dòng lũ bùn đá lớn hơn 50%. Sau khi chuẩn bị xong các vật liệu nguồn, hỗn hợp được trộn đều nhiều lần để đảm bảo tính đồng nhất, sau đó được đổ vào thùng chứa phía sau. Trước khi tạo dòng chảy bùn đá trên máng trượt, hỗn hợp được cho nước thấm qua cho đến khi độ ẩm hỗn hợp đạt khoảng 30%. Hình 3 thể hiện hình ảnh cốt liệu dạng hạt sử dụng trong thí nghiệm. Đường cong thành phần hạt của hỗn hợp được thể hiện như trên Hình 4.



(a) Mô hình tổng thể máng trượt



(b) Mặt bên của thùng chứa



(c) Mặt bên của tường chắn cứng

Hình 2. Ảnh chụp mô hình máng trượt nhóm nghiên cứu xây dựng



(a) Đá dăm



(b) Cát mịn



(c) Cát thạch anh



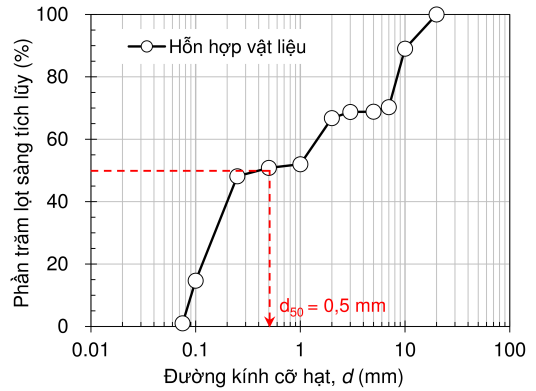
(d) Hỗn hợp vật liệu

Hình 3. Hình ảnh vật liệu sử dụng trong thí nghiệm

Để đánh giá tác động của dòng chảy vật liệu lên tường chắn bên dưới, trong thí nghiệm, một bản thép cứng đã được lựa chọn để thay thế cho cấu trúc tường chắn bê tông cốt thép thông thường trong thực tế. Tường chắn cứng được cấu tạo từ các tấm thép đặc có kích thước $50 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 0,3 \text{ cm}$, được liên kết với nhau bằng hệ thanh chống góc hình L phía sau (Hình 2(c)). Hệ thanh chống này sau đó sẽ được bắt bằng bulông trực tiếp vào bản đáy của máng trượt tạo thành một kết cấu cứng. Vị trí của tường chắn được thiết kế nằm dưới chân mái dốc, cách chân dốc một khoảng cách nhất định theo

các kịch bản nghiên cứu, như đã chỉ rõ trong Bảng 3.

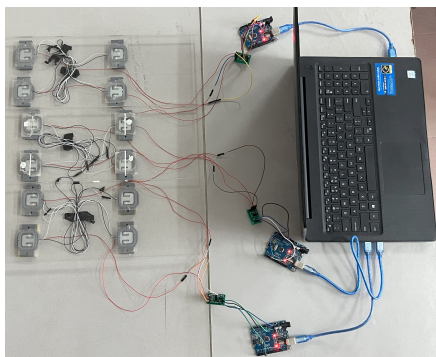
Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng dòng chảy vật liệu hạt quy mô phòng thí nghiệm có thể tái tạo thực tế các đặc điểm chính của các trận lũ bùn đá trong thực tế, miễn là một số điều kiện được đáp ứng. Theo đó, chúng cần phải đáp ứng ba tiêu chí quan trọng để một thí nghiệm quy mô nhỏ có thể tái tạo một cách thực tế một trận lũ bùn dạng hạt quy mô lớn bao gồm: (1) sự tương đồng về hình học giữa mô hình quy mô nhỏ và quy mô lớn, bao gồm kích thước hạt, hình dạng và độ nhám bề mặt; (2) mật độ hạt và không khí phải giống nhau ở cả hai quy mô; và (3) hệ số cản giữa điều kiện phòng thí nghiệm và thực tế phải tương đương. Tuy nhiên, điều kiện đầu tiên thường rất khó đạt được, vì trong các thí nghiệm quy mô nhỏ, chúng ta thường phải sử dụng các hạt có kích thước nhỏ hơn nhiều so với thực tế. Điều kiện thứ hai tương đối dễ dàng đạt được. Tuy nhiên, tiêu chí thứ ba lại gặp nhiều khó khăn trong việc thực hiện. Ngoài ra, một tiêu chí bổ sung liên quan đến kích thước hạt trong các thí nghiệm máng trượt là để tránh các hiệu ứng biên, bên cạnh việc sử dụng thành bên rất mịn, tỷ lệ giữa đường kính hạt trung bình và chiều rộng máng cần phải nhỏ hơn 1/20. Trong nghiên cứu này, thí nghiệm được tiến hành trên máng trượt có chiều rộng là 60 cm, lớn hơn rất nhiều so với kích thước hạt trung bình ($d_{50} = 0,5$ mm). Do đó, có thể khẳng định rằng hiệu ứng biên trong thí nghiệm này không ảnh hưởng đáng kể đến kết quả mô hình, theo khuyến nghị của Jiang và cs. [29].



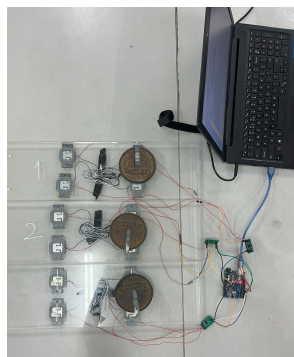
Hình 4. Đường cong thành phần hạt của hỗn hợp vật liệu sử dụng

3.2. Thiết bị đo đạc

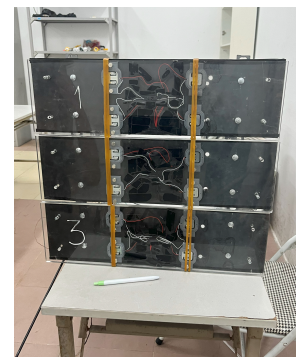
Để đo lường lực tác động của dòng chảy bùn đá lên tường chắn cứng, một hệ thống kết hợp gồm 4 cảm biến lực (load cells) loại 500 N đã được gắn chặt lên bề mặt tường chắn (Hình 5), cho phép đo lực tối đa lên đến khoảng 2000 N. Độ chính xác theo thông số kỹ thuật của các cảm biến là $\pm 1\%$ (tương đương 5 N) so với giá trị định mức tối đa. Sơ đồ bố trí các cảm biến lực trên mỗi tấm chắn cứng được mô tả như trong Hình 5. Trước khi lắp đặt vào tường chắn, các cảm biến lực đã được hiệu chuẩn trong phòng thí nghiệm. Quá trình hiệu chuẩn được thực hiện bằng cách sử dụng các quả cân để áp dụng các chu kỳ gia tải và dỡ tải lên tấm chắn. Dữ liệu từ các cảm biến lực được thu thập và ghi lại qua phần mềm thu thập dữ liệu mã nguồn mở Arduino.



(a) Kết nối các cảm biến lực



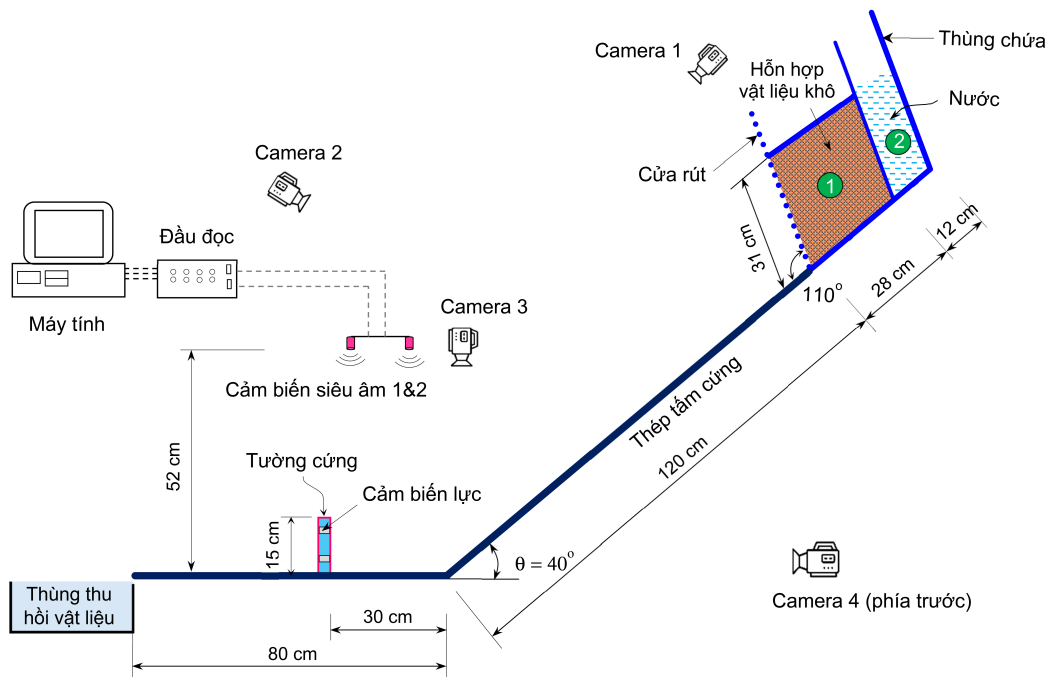
(b) Thử tải & hiệu chuẩn



(c) Lắp đặt trên tường chắn

Hình 5. Quá trình kết nối, thử nghiệm-hiệu chỉnh và lắp đặt hệ thống đo lực và đập trên tường chắn

Vận tốc của dòng chảy bùn đá ngay trước thời điểm va chạm với tường chắn được xác định thông qua sự chênh lệch thời gian phản hồi giữa hai cảm biến siêu âm loại HC-SR05 (ultrasonic distance sensor), được lắp đặt cách nhau 150 mm phía sau tường chắn trong mô hình. Thông qua tín hiệu sóng siêu âm phản xạ, chúng ta có thể đo được cao trình từ cảm biến đến bề mặt phía trên của dòng vật liệu, từ đó xác định độ sâu của dòng bùn đá ngay trước khi va chạm với tường chắn. Thêm vào đó, để ghi lại quá trình động học tác động của dòng chảy vật liệu lên tường chắn, bốn camera tốc độ cao được bố trí chiến lược xung quanh mô hình máng trượt. Hình 6 mô tả sơ đồ mô hình thực nghiệm cho thí nghiệm T2-300 cùng vị trí các thiết bị đo.



Hình 6. Phác họa sơ đồ của máng trượt (nhìn từ mặt bên) và vị trí các thiết bị đo

3.3. Các kích bản thử nghiệm

Đề nghiên cứu đặc điểm tác động của dòng chảy bùn đá lên tường chắn cứng, đặc biệt là ảnh hưởng của sự thay đổi khoảng cách tường chắn cứng tới chân mái dốc đến lực tác động, nhóm nghiên cứu đã thiết lập ba vị trí khác nhau của tường chắn. Chi tiết về tên các thử nghiệm và các thông tin liên quan đến tường chắn được trình bày trong Bảng 3. Lưu ý rằng trong mỗi thử nghiệm, tổng thể tích (hoặc trọng lượng) và trạng thái ban đầu của hỗn hợp vật liệu nguồn luôn được duy trì không thay đổi. Trong mỗi lần tiến hành thí nghiệm, máng trượt đều được vệ sinh sạch sẽ và kiểm tra kỹ lưỡng để đảm bảo độ chính xác trong các kết quả.

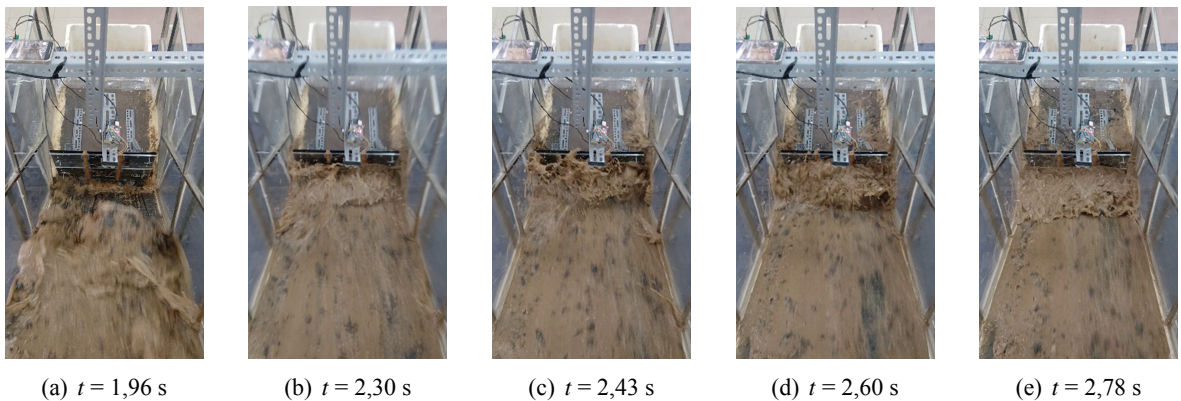
Bảng 3. Ký hiệu tên các mô hình thử nghiệm được xây dựng

Tên thử nghiệm	Chiều cao tường chắn (mm)	Khoảng cách từ tường chắn tới chân mái dốc (mm)
T1-50	300	50
T2-300	150	300
T3-600	150	600

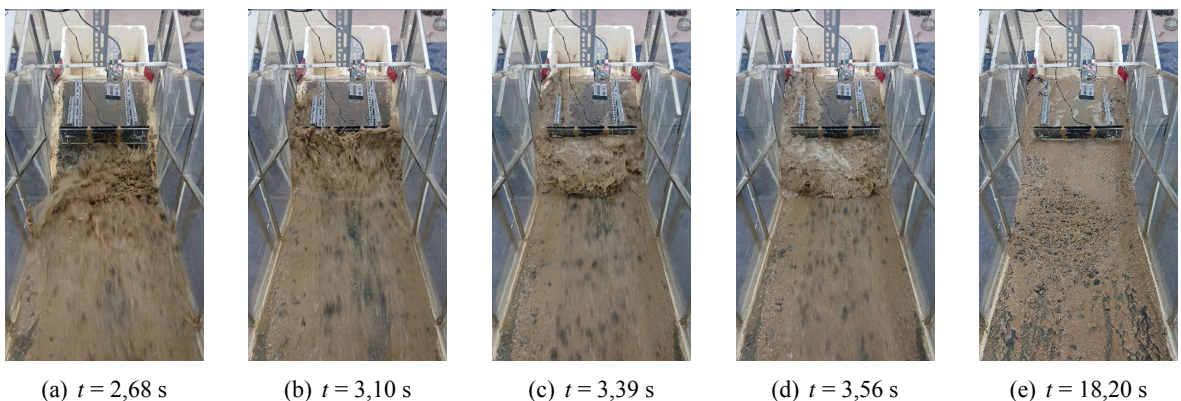
4. Kết quả và thảo luận

4.1. Động lực học của dòng chảy bùn đá khi tác động vào tường chắn

Trong thí nghiệm đầu tiên T1-50, tường chắn cứng có chiều cao 300 mm được thiết kế cách chân mái dốc 50 mm. Hình 7 mô tả hình ảnh chuyển động và tác động của dòng chảy bùn đá trong quá trình thử nghiệm được cắt ra từ các camera, với mốc thời gian t là được tính từ lúc khối hỗn hợp được giải phóng. Các hình ảnh cho thấy ba cơ chế tác động khác nhau được quan sát thấy trong quá trình thí nghiệm. Ngay khi dòng bùn đá va vào tường chắn cứng, do bị cản đột ngột, dòng bùn đá xảy ra cơ chế chất đông do chiều cao tường được thiết kế lớn hơn chiều cao dòng chảy vật liệu (Hình 7(a), 7(b) và 7(c)). Vật chất bắt đầu tích tụ và lắng xuống phía sau tường. Khi đạt đến chiều cao tích tụ tối đa, quá trình tác động nhanh chóng bị suy yếu. Cơ chế tiếp theo được đặc trưng sau tác động bằng sự hình thành dòng chảy phản xạ (Hình 7(d) và 7(e)). Các cơ chế quan sát được cho thấy sự tương đồng với các nghiên cứu của Armanini và cs. [30]. Kết quả đo đạc sau thí nghiệm cho thấy chiều sâu của vùng vật liệu tích tụ sau tường chắn dày khoảng 16,5 cm. Hình ảnh thí nghiệm cũng chỉ ra rằng dòng vật chất sau khi tác động vào tường chắn có sự dâng lên trước khi lắng đọng ngay phía sau tường chắn. Hình 8 ghi lại hình ảnh chuyển động và tác động của dòng chảy bùn đá trong quá trình thử nghiệm thứ hai T2-300 (tường chắn có chiều cao 150 mm được thiết kế cách chân mái dốc 300 mm). Hình ảnh ghi lại từ camera cho thấy các cơ chế tác động của dòng chảy bùn đá lên tường chắn là tương tự như trong thí

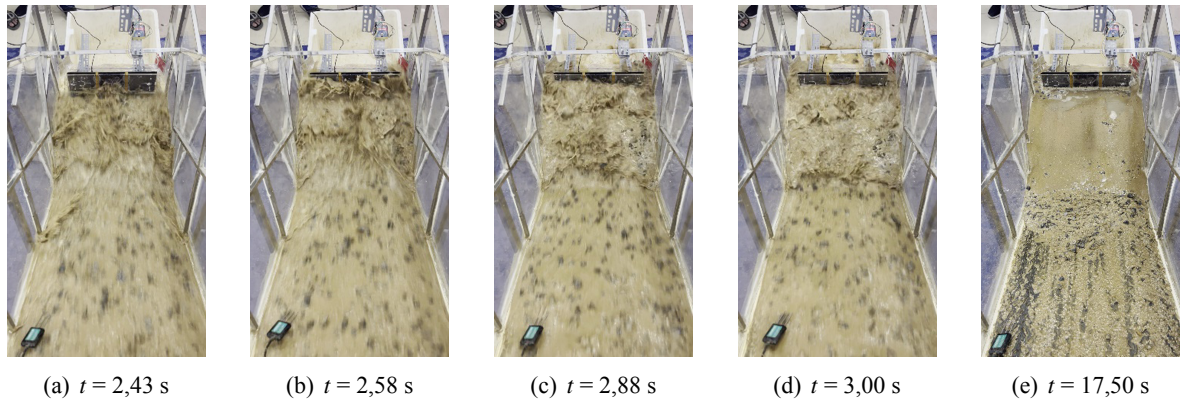


Hình 7. Hình ảnh camera trên cao chụp lại quá trình chuyển động của dòng chảy bùn đá khi va chạm với tường chắn trong thí nghiệm T1-50

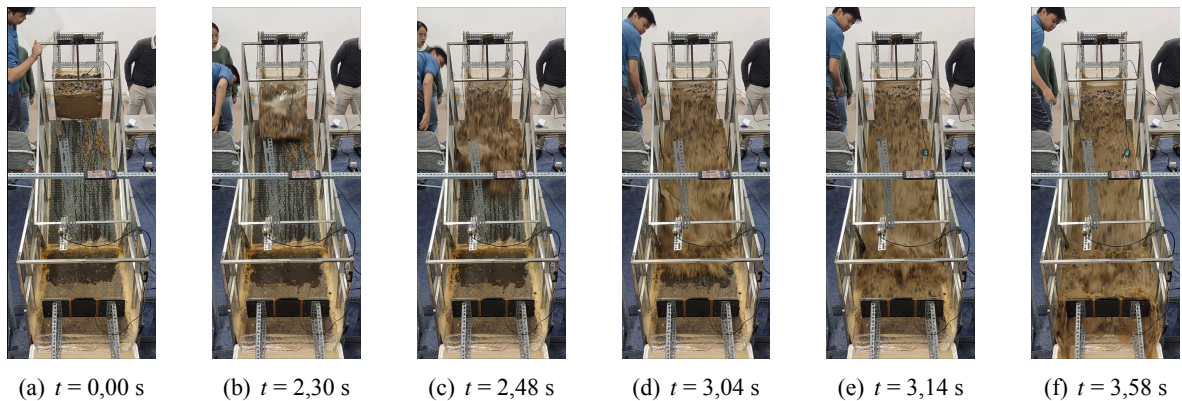


Hình 8. Hình ảnh camera trên cao chụp lại quá trình chuyển động của dòng chảy bùn đá khi va chạm với tường chắn trong thí nghiệm T2-300

nghiệm T1-50. Kết quả đo đạc sau thí nghiệm cho thấy chiều sâu của vùng vật liệu tích tụ ngay sau tường chắn có chiều cao 6,0 cm và chiều dài phần lắng đọng là 52 cm. Như vậy khối lắng đọng có xu hướng trải dài hơn dọc theo máng trượt, thay vì tập trung như trong các thí nghiệm T1-50. Trong thí nghiệm thứ ba, tường chắn cứng có chiều cao 150 mm được thiết kế cách chân dốc 600 mm. Hình 9 và Hình 10 là hình ảnh được ghi lại chuyển động và tác động của dòng chảy bùn đá trong quá trình thử nghiệm T3-600 trích xuất từ các camera. Ngay khi dòng chảy bùn đá va vào tường chắn cứng, do bị cản đột ngột, dòng vật chất xảy ra cơ chế dâng cao và chất đóng. Hình 9(e) cho thấy phía bề mặt vùng lắng đọng phía sau tường chắn chủ yếu là các vật liệu hạt mịn. Kết quả đo đạc sau thí nghiệm cho thấy chiều sâu của vùng vật liệu tích tụ ngay sau tường chắn có chiều cao 4,0 cm và chúng có xu hướng trải dài dọc theo máng trượt với chiều dài phần lắng đọng là 71 cm.



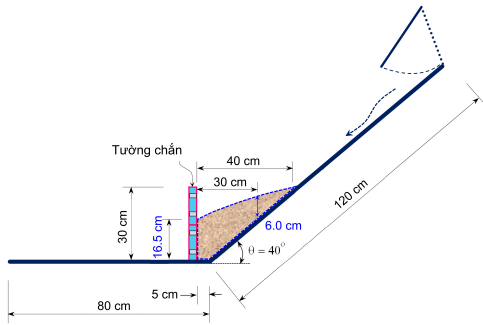
Hình 9. Hình ảnh camera trên cao chụp lại quá trình chuyển động của dòng chảy bùn đá khi va chạm với tường chắn trong thí nghiệm T3-600



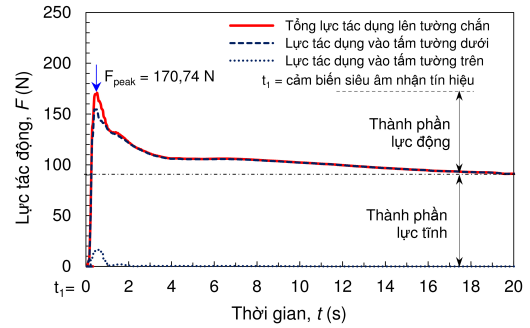
Hình 10. Hình ảnh camera phía trước ghi lại quá trình chuyển động của dòng chảy bùn đá khi va chạm với tường chắn trong thí nghiệm T3-600

Hình 11 biểu diễn vùng lắng đọng của dòng chảy bùn đá phía sau tường chắn trong ba thí nghiệm. Một điều dễ dàng nhận thấy rằng chiều sâu vùng lắng đọng ngay phía sau tường chắn có xu hướng giảm dần khi mà tường chắn càng được dịch ra xa chân mái dốc. Quan sát cả ba thử nghiệm cho thấy với chiều cao tường như thiết kế ban đầu, hiện tượng dòng chảy bùn đá trào qua đỉnh tường chắn đã không xảy ra. Hình 12 biểu diễn lực tác động lớn nhất lên tường chắn đo được ứng với các vị trí khác nhau của tường chắn theo thời gian. Thời gian ban đầu được tính là lúc cảm biến siêu âm nhận tín hiệu

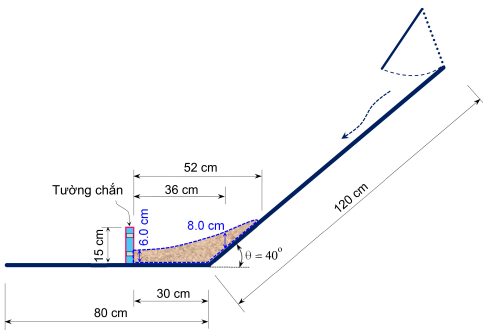
khi mặt phía trước dòng vật liệu lao tới. Kết quả cho thấy quá trình tác động của dòng bùn đá cũng có thể được chia thành ba giai đoạn như sau: Giai đoạn đầu tiên cho thấy thành phần lực động tác động nhanh và mạnh lên các cảm biến lực ngay sau khi nguồn vật liệu được giải phóng ra khỏi thùng chứa (lực tác động tăng nhanh đến giá trị cực đại). Giai đoạn thứ hai cho thấy dòng bùn đá vẫn tác động liên tục lên các cảm biến lực, nhưng với áp lực tác động giảm dần, và giai đoạn thứ ba-giai đoạn cuối cho thấy sự ổn định với áp lực tác động cân bằng với áp lực tĩnh của khối trầm tích lắng đọng phía sau tường.



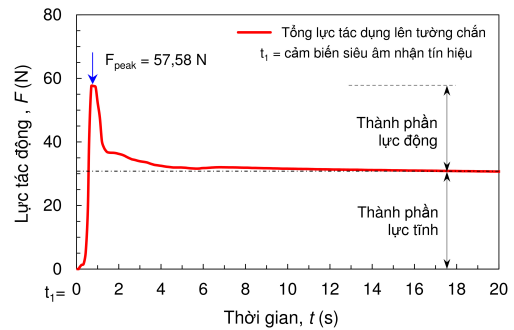
(a) Thí nghiệm T1-50



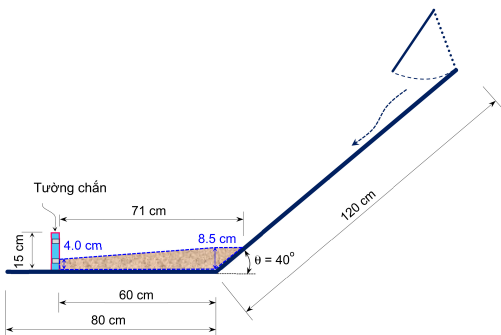
(a) Thí nghiệm T1-50



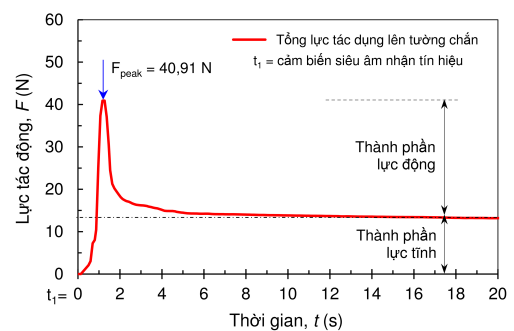
(b) Thí nghiệm T2-300



(b) Thí nghiệm T2-300



(c) Thí nghiệm T3-600



(c) Thí nghiệm T3-600

Hình 11. Kích thước khối vật liệu tích tụ phía sau tường chắn trong các thí nghiệm

Hình 12. Biểu đồ lực tác động của dòng chảy bùn đá lên tường chắn

Hình 12(a) biểu diễn kết quả tổng lực tác động của dòng chảy bùn đá lên tường chắn trong thí nghiệm T1-50 theo thời gian. Có thể quan sát thấy thời điểm cảm biến siêu âm bắt đầu nhận tín hiệu rất sớm do quãng đường di chuyển của dòng chảy bùn đá ngắn. Dữ liệu ghi nhận từ cảm biến lực cho

thấy lực tác động cực đại của dòng vật liệu chủ yếu được ghi nhận ở tấm tường chắn bên dưới. Điều này được giải thích là do sự giảm động lực học của các hạt phía trước khi chúng leo lên các lớp trầm tích đã lắng đọng trước đó ở phía sau tường chắn. Sau khi đạt giá trị cực đại $F_{\max} = 170,74$ N, lực tác động lên tường chắn có xu hướng giảm đều thay vì đột ngột do vùng chết của lớp trầm tích đã lắng đọng ngay lập tức khi va chạm với tường chắn. Kết quả thu được cho thấy tỷ số giữa lực tác động lớn nhất trên lực tĩnh tính toán được bằng $F_{\max}/F_t = 1,856$ (trong đó $F_{\max}$ là lực động lớn nhất tác dụng lên tường chắn, F_t là lực tĩnh sau khi dòng bùn đá lắng đọng ổn định sau tường chắn). Vận tốc dòng chảy bùn đá ngay trước thời điểm va chạm vào tường chắn được tính toán thông qua cảm biến siêu âm có giá trị bằng 2,2 m/s và chiều sâu của vùng vật liệu tích tụ phía sau tường chắn đo được xấp xỉ $h_f = 16,5$ cm. Đối với thí nghiệm T2-300 (Hình 12(b)), nó được quan sát thấy rằng khi tường chắn được dịch chuyển ra xa chân mái dốc, cả thành phần lực động và thành phần lực tĩnh đã giảm đi rõ rệt so với thí nghiệm T1-50. Điều này là bởi quãng đường di chuyển của dòng vật chất trước khi tác dụng vào tường chắn là xa hơn so với thí nghiệm ban đầu. Sau khi đạt giá trị cực đại $F_{\max} = 57,58$ N (Hình 12(b)), lực tác động lên tường chắn có xu hướng giảm đột ngột do động năng gây ra thành phần lực động mất đi nhanh. Vận tốc dòng chảy bùn đá đo được trước khi va chạm vào tường chắn là xấp xỉ 1,5 m/s. Tỷ số giữa lực tác động lớn nhất trên lực tĩnh tính toán được bằng $F_{\max}/F_t = 1,87$. Cuối cùng, đối với thí nghiệm T3-600 (Hình 12(c)), khi tường chắn dịch chuyển ra xa hơn chân mái dốc, cả thành phần lực động và thành phần lực tĩnh đã giảm đi rõ rệt so với hai thí nghiệm trước đó. Vận tốc dòng chảy bùn đá trước khi va chạm vào tường chắn xác định được xấp xỉ 1,13 m/s. Thành phần áp lực tĩnh suy giảm rõ rệt do động năng dòng bùn đá đến chân tường chắn chỉ còn chủ yếu là hỗn hợp nước và các hạt cốt liệu nhỏ như cát và thạch anh (Hình 9(e)) do quá trình lắng đọng vật liệu đã diễn ra dọc trên quãng đường di chuyển. Tỷ số giữa lực tác động lớn nhất trên lực tĩnh, $F_{\max}/F_t = 3,03$. Điều này được giải thích là khi dòng chảy bùn đá bắt đầu xuống tới chân dốc, từ đây dòng chảy sẽ đi theo phương ngang (không còn sự thay đổi thế năng), đồng thời do ảnh hưởng của ma sát với đáy máng và sự lắng đọng của vật liệu, vận tốc dòng chảy sẽ có xu hướng giảm nhanh khi chiều dài máng trượt ngang tăng lên. Kết quả so sánh lực tác động của dòng bùn đá lên tường chắn trong các thí nghiệm cho thấy, cường độ của lực tác động có xu hướng giảm nhanh khi khoảng cách từ tường chắn đến chân mái dốc tăng lên. Hiện tượng này phản ánh mối quan hệ tỉ lệ nghịch rõ rệt giữa lực tác động và khoảng cách, do động năng của dòng bùn đá bị tiêu hao dần trong quá trình di chuyển trên mặt bằng máng trượt, chủ yếu bởi ma sát đáy máng và quá trình lắng đọng vật liệu (Hình 12). Điều này cho thấy rằng vị trí đặt tường chắn có ảnh hưởng đáng kể đến tải trọng thiết kế và hiệu quả giảm thiểu rủi ro do lũ bùn đá gây ra trong thực tế.

4.2. Xây dựng công thức xác định lực tác động

Như đã trình bày trong mục 2, quy tắc tương đồng về tỷ lệ mô hình và vật liệu để tái tạo chính xác động lực học của dòng chảy quy mô dòng chảy vật liệu tự nhiên thường rất khó để đạt được trong quy mô phòng thí nghiệm [31]. Trên thực tế, các kết quả quy mô phòng thí nghiệm vẫn mang lại những hiểu biết nhất định, giúp chúng ta hiểu sâu hơn về đặc tính dòng chảy bùn đá, miễn là các kết quả được diễn giải đầy đủ, rõ ràng trong phạm vi giới hạn của động lực có thể đạt được. Trong nghiên cứu này, quy tắc tương đồng dựa trên thang đo Froude [3] đã được áp dụng để đánh giá tính tương thích trong kết quả thu được từ mô hình của nhóm nghiên cứu. Trong thực tế thiết kế các kết cấu bảo vệ, phương pháp thủy động lực học thường được sử dụng do chúng có khả năng ước lượng khá tốt lực tác động của dòng chảy bùn đá. Hübl và cs. [10] khuyến nghị rằng mối quan hệ giữa số Fr và hệ số thực nghiệm α trong mô hình thủy động lực học có thể được biểu diễn bằng hàm mũ như sau:

$$\alpha = \frac{P_{peak}}{\rho g h_f} = a \times Fr^b \quad (3)$$

trong đó p_{peak} là áp lực lớn nhất tác động lên tường chắn; h_f là chiều sâu của vùng vật liệu tích tụ phía sau tường chắn; $Fr = v / \sqrt{gh \cos \theta}$ là số Froude; a và b là các hệ số thực nghiệm. Các giá trị của a và b được xác định từ mô hình hàm mũ dựa trên các kết quả thực nghiệm. Bảng 4 tổng hợp giá trị của số Froude dựa trên ba kết quả thử nghiệm trong nghiên cứu này. Kết quả phân tích cho thấy số Froude (Fr) nằm trong khoảng từ 1,68 đến 2,01. Số Froude thu được từ nghiên cứu này nằm trong phạm vi giá trị số Fr được đo đạc từ các dòng lũ bùn đá tự nhiên là 0,5 đến 7,6 [32]. Số Froude được ghi nhận ở giá trị thấp có thể là do việc đo đạc được thực hiện bên dưới chân máng trượt, nơi vận tốc dòng chảy bùn đá đã giảm đi đáng kể, như được chỉ ra trong nghiên cứu của Hubl và cs. [10].

Bảng 4. Các thông số thu được sau thí nghiệm

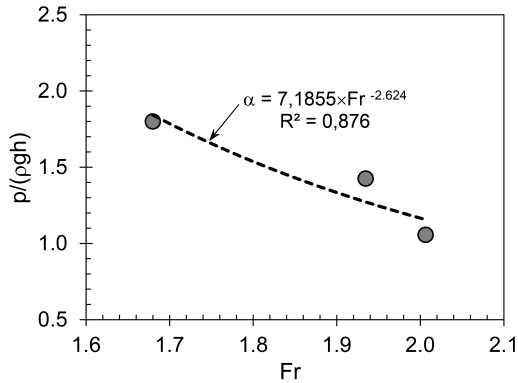
Tên thử nghiệm	Áp lực tác động lên tường chắn, (N/m ²)	Chiều cao dòng bùn đá, (mm)	Vận tốc dòng bùn đá, (m/s)	Số Froude, Fr
T1-50	2134,2	160	2,2	2,006
T2-300	1439,5	80	1,5	1,935
T3-600	1363,7	60	1,13	1,680

Kết quả quan sát trên Hình 7, 8 và 9 cho thấy khi dòng chảy tác động lên tường chắn hiện tượng sóng phản xạ được hình thành chủ yếu thay vì hiện tượng dòng chảy phản lực hướng lên tường khi va chạm. Phát hiện này là tương tự với những kết luận của Armanini và cs. [33] khi chỉ ra rằng hiện tượng sóng phản xạ hình thành khi số $Fr < 3$. Sự phù hợp của số Froude trong kết quả nghiên cứu này chỉ ra rằng mô hình máng trượt thu nhỏ trong phòng hoàn toàn có thể tái tạo động lực học dòng lũ bùn đá như trong thực tế. Để xác định mối quan hệ giữa áp lực tác động lớn nhất của dòng bùn đá lên tường chắn cứng với số Froude, nhóm nghiên cứu đã sử dụng phương pháp phân tích hồi quy. Hình 13 biểu diễn mối tương quan giữa giá trị áp lực không thứ nguyên cực đại và số Froude. Kết quả trên Hình 13 cho thấy, hệ số tương quan đạt độ chính xác tương đối cao $R^2 = 0,876$, cho phép sử dụng công thức (4) để dự báo áp lực tác động cực đại lên tường chắn cứng thiết kế dưới chân mái dốc:

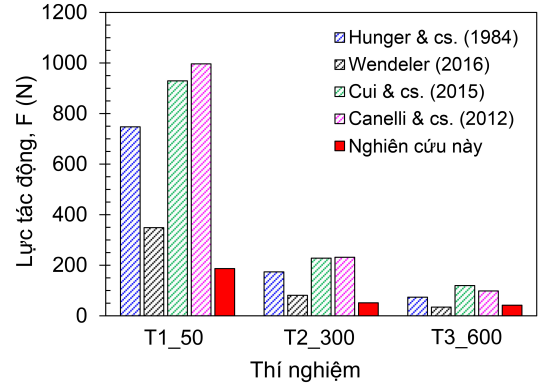
$$p_{peak} = (7,186 \times Fr^{-2,624}) \rho g h_f \quad (4)$$

Để đánh giá khách quan hiệu quả của công thức (4) trong việc dự báo lực tác động cực đại của dòng bùn đá lên tường chắn cứng, các kết quả tính toán từ công thức này đã được so sánh với các công thức đề xuất bởi một số tác giả khác, như trình bày trong Bảng 2.

Hình 14 thể hiện kết quả so sánh lực tác động cực đại lên tường chắn theo công thức đề xuất và các công thức từ tài liệu tham khảo. Để nhận thấy, các kết quả tính toán theo công thức của Cui và cs. [2] và Canelli và cs. [23] có xu hướng khá tương đồng và cho giá trị lực tác động cao hơn đáng kể so với công thức đề xuất. Trong sự hiểu biết của các tác giả, sự sai khác này có thể bắt nguồn từ sự khác biệt rõ rệt về đặc tính thành phần vật liệu nguồn được sử dụng trong các thí nghiệm, vị trí bố trí kết cấu chắn giữ trong mô hình cũng như chiều dài máng trượt. Trong các thí nghiệm của Cui và cs. [2], Canelli và cs. [23], kết cấu chắn được đặt vuông góc với hướng chuyển động của dòng bùn đá và nằm ngay trên quỹ đạo dòng chảy chính. Trong khi đó, các thí nghiệm trong nghiên cứu này, tường chắn được bố trí dưới chân mái dốc và chiều dài máng trượt tương đối ngắn. Điều này có thể ảnh hưởng đến sự phát triển khác nhau của đặc tính động lực học dòng chảy bùn đá. Những quan sát này cho thấy một nhận định quan trọng rằng việc áp dụng các công thức trong Bảng 2 để dự báo lực tác động cực đại trong trường hợp tường chắn được đặt gần hoặc cách xa chân mái dốc có thể dẫn đến đánh giá quá mức, mang tính thận trọng cao, và cần được cân nhắc trong thực tiễn thiết kế.



Hình 13. Mối tương quan giữa giá trị áp lực không thứ nguyên cực đại và số Froude



Hình 14. So sánh lực tác động cực đại theo công thức (4) với các nghiên cứu khác

5. Kết luận

Việc hiểu và dự báo lực tác động của dòng lũ bùn đá lên các công trình bảo vệ bên dưới chân mái dốc là một yêu cầu quan trọng trong việc thiết kế các biện pháp ứng phó kỹ thuật. Trong nghiên cứu này, các thử nghiệm máng trượt quy mô nhỏ đã được nhóm thực hiện để khám phá cơ chế động lực học tác động của dòng chảy bùn đá lên tường chắn cứng. Dưới đây là một số kết luận được rút ra:

- Quá trình tác động của dòng chảy bùn đá lên tường chắn cứng có thể chia thành ba giai đoạn. Giai đoạn đầu tiên đặc trưng bởi sự tăng đột ngột và mạnh của lực tác động lên các cảm biến lực. Giai đoạn thứ hai cho thấy sự giảm dần của lực tác động, trong khi giai đoạn cuối cùng là giai đoạn ổn định, khi lực tác động cân bằng với áp lực tĩnh của vật chất tích tụ phía sau tường chắn. Khi tường chắn được bố trí cách xa chân mái dốc, áp lực của dòng bùn đá tác dụng vào tường chắn giảm đi rõ rệt. Lực tác động lớn nhất giảm tới 4 lần khi khoảng cách giữa tường chắn và chân mái dốc thay đổi từ 5 cm lên 60 cm. Vận tốc dòng chảy bùn đá trước khi tác động lên tường chắn trong các thử nghiệm dao động từ 1,13 đến 2,20 m/s.

- Số Froude được xác định là thông số thủy động lực học có vai trò chi phối đối với động lực dòng chảy và mức độ gia tăng áp lực tác động của dòng bùn đá. Kết quả thí nghiệm cho thấy số Froude dao động trong khoảng từ 1,68 đến 2,01, tương ứng với giá trị được ghi nhận trong các sự kiện lũ bùn đá tự nhiên. Điều này cho thấy mô hình máng trượt thu nhỏ được sử dụng trong nghiên cứu có khả năng tái hiện tốt các đặc trưng động lực học của dòng chảy bùn đá trong tự nhiên. Trong trường hợp số Froude nhỏ hơn 2, áp lực tác động của dòng chảy bùn đá lên tường chắn cứng dưới chân mái dốc có thể được ước lượng theo công thức (4). Công thức đề xuất này đóng vai trò như một công cụ dự báo hiệu quả, có giá trị thực tiễn cao trong việc ước lượng tải trọng động dòng bùn đá lên các công trình bảo vệ dưới chân mái dốc, từ đó hỗ trợ công tác thiết kế và đề xuất các giải pháp kỹ thuật giảm thiểu rủi ro do dòng chảy bùn đá gây ra.

Mặc dù mô hình thực nghiệm trong nghiên cứu này đã cung cấp một cơ sở phương pháp luận đáng tin cậy, hỗ trợ cho việc thiết kế các giải pháp bảo vệ hạ tầng và giảm thiểu thiệt hại do lũ bùn đá gây ra, vẫn còn tồn tại một số hạn chế ảnh hưởng đến độ chính xác và khả năng ứng dụng rộng rãi của kết quả vào thực tiễn. Trước hết, vật liệu sử dụng trong thí nghiệm được lựa chọn mới chỉ dừng ở sự tương đồng về đặc tính cơ học và vật lý với vật liệu tại thực địa, song chưa thể hiện được đầy đủ các đặc trưng động học phức tạp của dòng lũ bùn đá tự nhiên. Cụ thể, trong điều kiện thực tế, dòng lũ bùn đá thường có sự thay đổi liên tục về nồng độ chất rắn theo thể tích, cùng với hiện tượng xói mòn vật liệu trong suốt quá trình di chuyển, làm biến đổi đáng kể thể tích và động lượng của khối lũ bùn đá. Những yếu tố này chưa được xem xét đầy đủ trong điều kiện phòng thí nghiệm. Thứ hai, mô hình

thực nghiệm chưa kể đến sự biến đổi của địa hình và độ nhám bề mặt tiếp xúc, vốn ảnh hưởng đáng kể đến sự phân tán năng lượng và áp lực lên kết cấu chắn giữ. Việc giả định mặt tiếp xúc đồng nhất trong thí nghiệm có thể dẫn đến sai lệch khi áp dụng kết quả cho các khu vực địa hình phức tạp ngoài thực địa. Thứ ba là do kích thước máng thí nghiệm còn nhỏ so với quy mô thực tế của các sự kiện lũ bùn đá, quá trình nội suy hoặc mở rộng kết quả nghiên cứu từ mô hình thực nghiệm sang thực tế có thể tiềm ẩn sai số lớn. Cuối cùng, số lượng thí nghiệm được thực hiện trong nghiên cứu này còn hạn chế, điều này làm giảm khả năng khái quát hóa cũng như phân loại rõ ràng phạm vi áp dụng của mô hình dự báo đề xuất. Tất cả những yếu tố trên cho thấy cần thận trọng khi sử dụng kết quả từ mô hình thực nghiệm để dự báo và thiết kế công trình bảo vệ trong điều kiện tự nhiên. Do đó, các nghiên cứu trong tương lai cần hướng tới việc kết hợp giữa nghiên cứu thực nghiệm quy mô lớn, mô phỏng số, và khảo sát thực địa có dữ liệu quan trắc đầy đủ, nhằm nâng cao độ tin cậy và khả năng áp dụng vào thực tiễn của mô hình dự báo tác động của lũ bùn đá lên kết cấu chắn giữ bảo vệ.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này là một phần nằm trong đề tài “Khoa học và Công nghệ Sinh viên”, mã số CĐ-2024-01 được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội. Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn.

Tài liệu tham khảo

- [1] Froude, M. J., Petley, D. N. (2018). [Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016](#). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8):2161–2181.
- [2] Cui, P., Zeng, C., Lei, Y. (2015). [Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow](#). *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12):1644–1655.
- [3] Iverson, R. M. (2015). [Scaling and design of landslide and debris-flow experiments](#). *Geomorphology*, 244:9–20.
- [4] Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., Hutchinson, J. N. (2001). [A review of the classification of landslides of the flow type](#). *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3):221–238.
- [5] Thao, V. B., Hương, N. T. T., Hải, N. V. (2022). Đánh giá đặc trưng hình thái lưu vực suối đến sự hình thành lũ bùn đá khu vực miền núi phía Bắc. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, 70:1–16.
- [6] Vietnamnet. [Mù Căng Chải hoang tàn nhìn từ trên cao](#).
- [7] Kiên, N. T., Hiếu, N. T., Nghĩa, H. T. (2019). [Nghiên cứu khả năng áp dụng giải pháp đập hở khung thép ngăn lũ bùn đá tại khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD*, 13(5V):28–37.
- [8] Ng, C. W. W., Wang, C., Choi, C. E., De Silva, W. A. R. K., Poudyal, S. (2020). [Effects of barrier deformability on load reduction and energy dissipation of granular flow impact](#). *Computers and Geotechnics*, 121:103445.
- [9] Huang, Y., Zhang, B. (2020). [Challenges and perspectives in designing engineering structures against debris-flow disaster](#). *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(10):4476–4497.
- [10] Hübl, J., Suda, J., Proske, D., Kaitna, R., Scheidl, C. (2009). Debris flow impact estimation. *Proceedings of the 11th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ohrid, Macedonia, University of St Cyril and Methodius*, 1:1–5.
- [11] Fang, J., Cui, Y., Li, X., Nie, J. (2022). [A new insight into the dynamic impact between geophysical flow and rigid barrier](#). *Computers and Geotechnics*, 148:104790.
- [12] Nguyen, T.-K., Nguyen, N. H. T., Vo, T.-T., Chen, L. (2025). [Dissipative effects of baffles on the dynamics of debris flow and its impact on downstream structure](#). *Computers and Geotechnics*, 184:107246.
- [13] Iverson, R. M., Logan, M., LaHusen, R. G., Berti, M. (2010). [The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments](#). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F3):F03005.
- [14] Scheidl, C., Chiari, M., Kaitna, R., Müllegger, M., Krawtschuk, A., Zimmermann, T., Proske, D. (2012). [Analysing debris-flow impact models, based on a small scale modelling approach](#). *Surveys in Geophysics*, 34(1):121–140.
- [15] Song, D., Chen, X., Zhou, G. G. D., Lu, X., Cheng, G., Chen, Q. (2021). [Impact dynamics of debris flow against rigid obstacle in laboratory experiments](#). *Engineering Geology*, 291:106211.

- [16] Moriguchi, S., Borja, R. I., Yashima, A., Sawada, K. (2009). [Estimating the impact force generated by granular flow on a rigid obstruction](#). *Acta Geotechnica*, 4(1):57–71.
- [17] Scheidl, C., Friedl, C., Reider, L., Wernhart, S., Fuchs, A.-L., Dankwerth, A. L., Nagl, G., Kaitna, R., Proske, D. (2023). [Impact dynamics of granular debris flows based on a small-scale physical model](#). *Acta Geotechnica*, 19(6):3979–3997.
- [18] Hungr, O., Morgan, G. C., Kellerhals, R. (1984). [Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures](#). *Canadian Geotechnical Journal*, 21(4):663–677.
- [19] Armanini, A. (1997). On the dynamic impact of debris flows, recent developments on debris flows. *Lecture notes in Earth Sciences*.
- [20] Vagnon, F. (2019). [Design of active debris flow mitigation measures: a comprehensive analysis of existing impact models](#). *Landslides*, 17(2):313–333.
- [21] Watanabe, M., Ikeya, H. (1981). Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima, Japan. *Erosion sediment transport measurement In: Int Assoc Hydrol Sei Publ, 133, Florence*, 245–256.
- [22] GEO (2020). *Enhanced technical guidance on design of rigid debris-resisting barriers*. Technical Guidance Note No. 52 (TGN 52). Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department of CEDD, HKSAR.
- [23] Canelli, L., Ferrero, A., Migliazza, M., Segalini, A. (2012). [Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers – experimental tests and impact analysis](#). *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 12(5): 1693–1699.
- [24] Lichtenhahn, C. (1973). Die Berechnung von Sperren in Beton und Eisenbeton. *Kolloquium on Torrent Dams, Heft, Mitteilungender Forstlichen Bundesanstalt Wien*, 91–127. (in German).
- [25] Scotton, P., Deganutti, A. M. (1997). Phreatic line and dynamic impact in laboratory debris flow experiments. *Debris-flow Hazards Mitigation Mechanics, Prediction, and Assessment, San Francisco, USA*, 777–786.
- [26] Tan, D.-Y., Yin, J.-H., Feng, W.-Q., Zhu, Z.-H., Qin, J.-Q., Chen, W.-B. (2019). [New simple method for calculating impact force on flexible barrier considering partial muddy debris flow passing through](#). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(9):04019051.
- [27] Wendeler, C. (2016). Debris-flow protection systems for mountain torrents. Basic principles for planning and calculation of flexible barriers. *Berichte, 44 Birmensdorf: Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL*.
- [28] Iverson, R. M. (1997). [The physics of debris flows](#). *Reviews of Geophysics*, 35(3):245–296.
- [29] Jiang, Y.-J., Fan, X.-Y., Su, L.-J., Xiao, S.-y., Sui, J., Zhang, R.-X., Song, Y., Shen, Z.-W. (2020). [Experimental validation of a new semi-empirical impact force model of the dry granular flow impact against a rigid barrier](#). *Landslides*, 18(4):1387–1402.
- [30] Armanini, A., Larcher, M., Odorizzi, M. (2011). Dynamic impact of a debris flow front against a vertical wall. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1041–1049.
- [31] Choi, C. E., Ng, C. W. W., Liu, H. (2024). [Flume modeling of debris flows](#). Jakob, M., McDougall, S., Santi, P., editors, *Advances in Debris-flow Science and Practice*, Cham, Springer International Publishing, 93–125.
- [32] Zhou, G. G. D., Hu, H. S., Song, D., Zhao, T., Chen, X. Q. (2018). [Experimental study on the regulation function of slit dam against debris flows](#). *Landslides*, 16(1):75–90.
- [33] Armanini, A., Rossi, G., Larcher, M. (2019). [Dynamic impact of a water and sediments surge against a rigid wall](#). *Journal of Hydraulic Research*, 58(2):314–325.