

GIẢI PHÁP KẾT CẤU HẦM BẢO VỆ Ở CÁC TUYẾN ĐƯỜNG VÙNG NÚI CÓ NGUY CƠ CAO SỤT LỞ VÀ ĐÁ RƠI

Phùng Bá Thăng^{a,*}, Lại Văn Anh^a, Nguyễn Văn Quang^a

^a*Khoa Công trình, Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải,
54 đường Triều Khúc, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 21/9/2021, Sửa xong 18/11/2021, Chấp nhận đăng 19/11/2021

Tóm tắt

Các tuyến đường ở Việt Nam có nhiều tuyến đi qua các sườn núi thường có mặt cắt ngang dạng thung đầu, chữ L, nửa đào nửa đắp. Với các điều kiện địa hình vùng núi dốc cao, cùng với biến đổi khí hậu dẫn đến tình trạng thiên tai mưa lũ đã gây ra hiện tượng sụt trượt mái dốc, đá rơi gây hư hỏng công trình, ách tắc giao thông, nguy hiểm cho người và phương tiện giao thông. Những giải pháp với công trình đường bộ chống sụt trượt, đá rơi như thay đổi hình dạng mái dốc, giảm độ cao, độ dốc, phản áp ở chân dốc, kiểm soát nước mặt, nước ngầm, hoặc dùng các công trình chống giữ như neo cáp, lưới phủ, phun bê tông, tường chắn... Dù vậy trong thực tế vẫn tồn tại các vấn đề sụt trượt, đá rơi. Bài báo trình bày một giải pháp kết cấu công trình hầm bảo vệ thay cho mặt cắt nền đào của đường sẽ giải quyết được vấn đề sụt trượt, đá rơi. Kết cấu sử dụng là hầm bê tông cốt thép lắp ghép thi công đơn giản, hiệu quả tránh được các rủi ro trong khai thác. Với đề xuất giải pháp kết cấu, thi công cho công trình cụ thể và phân tích tương tác đất đá - kết cấu của kết cấu hầm với tải trọng áp lực đất và tải trọng đá rơi cho thấy khả năng ứng dụng trong điều kiện Việt Nam đáp ứng yêu cầu xây dựng bền vững.

Từ khóa: đá rơi; tương tác đất đá - kết cấu; áp lực đất đá; hầm bảo vệ.

STRUCTURE SOLUTION OF PROTECTION TUNNEL FOR MOUNTAIN ROADS WITH HIGH RISK OF LANDSLIDE AND ROCKFALLS

Abstract

Many roads in Vietnam pass through mountain slopes with cross-sections such as in cutting, L-shaped, half-filled and half-dug. The topographic conditions in the high sloping region and climate change lead to natural disasters such as floods, landslides, and falling rocks, causing damage to works, traffic jams, and danger for people and vehicles. Solutions to prevent slipping and falling rocks are changing the shape of the slope such as reducing the height, slope, loading at the toe of the slope, controlling surface water, groundwater, or using anti-retention structures such as cable anchors, mesh covers, concrete spraying, retaining walls... But in reality, there are still problems of landslide and falling rocks. In this study, a structural solution for protection tunnel instead of the excavated section of the road is presented. That will solve the problem of landslides and falling rocks. The using structure is a precast concrete tunnel, which is simple and effective to avoid risks in exploitation. The proposal of structural, construction solutions for a specific project and analysis of soil-structure interaction of the tunnel structure with soil pressure and falling rock load are presented. The result of the study shows the applicability for Vietnamese conditions and meets the requirements of sustainable construction.

Keywords: rock fall; soil-structure interaction; earth pressure; protection tunnel.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(7V\)-03](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(7V)-03) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: thangpb@utt.edu.vn (Thắng, P. B.)

1. Giới thiệu chung

Trong số các mối nguy hiểm tự nhiên, sụt lở đất đá rất thường xuyên diễn ra ở các vùng núi và thường gây ra những hậu quả nghiêm trọng. Hiện tượng sụt lở đất đá thường vào mùa mưa lũ và luôn diễn ra rất nhanh, các hiện tượng này thường khó đoán trước dù với các thiết bị hiện đại [1]. Nguyên nhân gây trượt có thể hoặc là do độ bền của đất đá bị giảm đi, hoặc là do trạng thái ứng suất ở sườn dốc bị thay đổi, hoặc do cả hai nguyên nhân trên làm mất cân bằng của khối đất đá ở sườn dốc. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiện tượng sụt trượt, đá rơi là toàn bộ những yếu tố tự nhiên và nhân tạo làm cho quá trình phá hoại sự cân bằng của khối đất đá dễ xảy ra [2, 3]. Việt Nam có nhiều tuyến đi qua các sườn núi với các điều kiện địa hình vùng núi dốc cao, cùng với biến đổi khí hậu dẫn đến tình trạng thiên tai mưa lũ đã gây ra hiện tượng sụt trượt mái dốc, đá rơi gây hư hỏng công trình, ách tắc giao thông, nguy hiểm cho người và phương tiện giao thông.

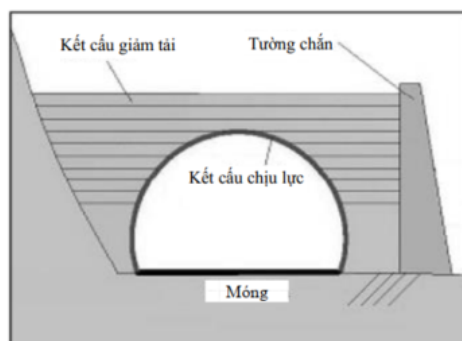
Hiện nay đã có nhiều giải pháp chống trượt lở đất, giúp giữ ổn định mái sườn dốc như các biện pháp thay đổi hình dạng của mái dốc: giảm độ cao, giảm độ nghiêng, thêm phản áp ở chân dốc; các biện pháp kiểm soát nước mặt, nước ngầm hoặc các biện pháp sử dụng các công trình chống giữ; neo cáp, lưới phủ, phun bê tông, tường chắn... [4–6]. Bài báo này đề cập đến một giải pháp còn mới và có khả năng áp dụng ở Việt Nam đó là sử dụng kết cấu chống đỡ dạng hầm bê tông cốt thép đúc sẵn. Phương pháp này đã được áp dụng ở nhiều nước trên thế giới như Hàn Quốc, Thụy Sĩ, Colombia, Nhật Bản. . .

Ưu điểm lớn nhất của phương pháp là ổn định tuyến. Các phương pháp giữ ổn định mái dốc thông thường có tác dụng phòng ngừa và xử lý ở một mức độ hạn chế, điều này có nghĩa là một khi các hiện tượng trượt lở đất đá xảy ra thì các biện pháp kể trên không hoàn toàn giúp cho tuyến đường được thông suốt liên tục và an toàn. Ngược lại với giải pháp dùng hầm bảo vệ, vì có các kết cấu tiêu năng lượng và kết cấu chịu lực nên trong phạm vi dự đoán và tính toán cho trước thì công trình đảm bảo cho tuyến đường vẫn vận hành bình thường, và đảm bảo an toàn cho các phương tiện giao thông qua lại. Một ưu điểm nữa là giải pháp hầm thi công hoàn toàn lộ thiên nên thi công nhanh và đơn giản, chất lượng thi công được đảm bảo thông qua hình thức chế tạo sẵn lắp ghép, có thể thay đổi kích thước cấu trúc trong trường hợp cần thiết. . .

2. Giải pháp kết cấu và công nghệ thi công

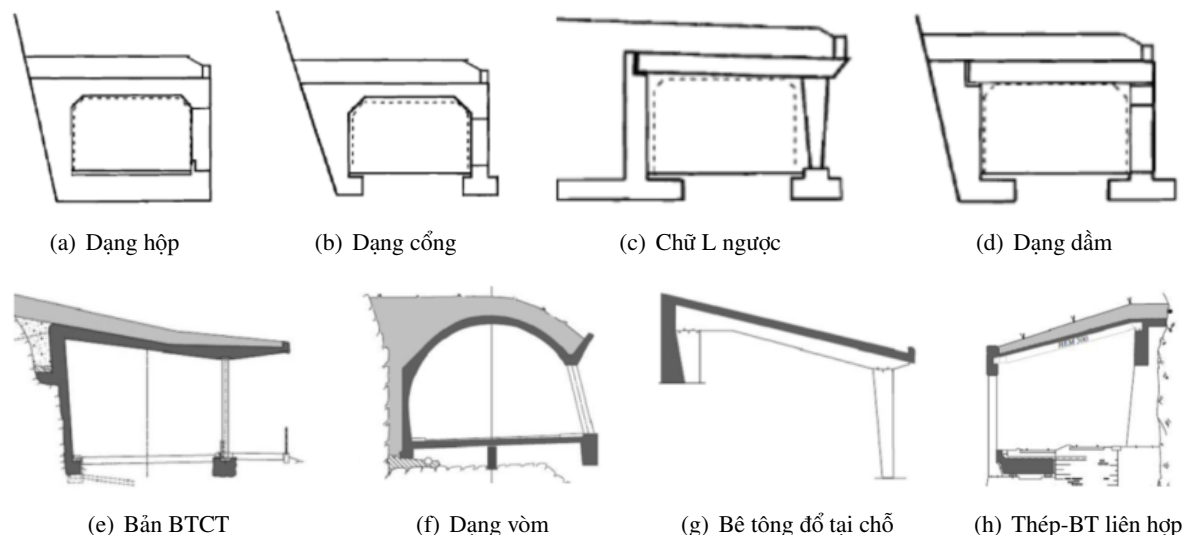
2.1. Đặc điểm cấu tạo của giải pháp kết cấu hầm bảo vệ

Hầm bảo vệ có thể được xây dựng bằng bê tông cốt thép, bê tông dự ứng lực hoặc bằng kết cấu thép. Về nguyên tắc cơ bản, hầm bảo vệ bao gồm bốn phần: một phần của công trình có tác dụng hấp thụ, tiêu tán bớt năng lượng (absorber structure) từ đất đá rơi xuống, phần này được cấu tạo từ vật liệu cốt liệu lớn nén, gia cố bằng vải địa kỹ thuật hoặc các vật liệu khác như polystyren hoặc lớp cũ. Hầm bảo vệ còn bao gồm một kết cấu móng (foundation) (có thể được làm bằng thép hoặc bê tông cốt thép), một kết cấu chịu lực (support) và một kết cấu dạng tường chắn (retainment) (có thể là tự nhiên hoặc nhân tạo) (Hình 1) [7].



Hình 1. Cấu tạo cơ bản của hầm bảo vệ [7]

Có nhiều loại kết cấu bảo vệ khác nhau, Hình 2 là một số dạng kết cấu ở Thụy Sĩ, với các dạng bản bê tông cốt thép, dạng vòm, dạng bản bê tông cốt thép đỡ tại chỗ hay dạng thép-bê tông cốt thép liên hợp [3], theo [8] kết cấu bảo vệ có các dạng hộp, dạng cổng, chữ L ngược hay dạng dầm.



Hình 2. Các dạng kết cấu bảo vệ [3, 8]

Trên thực tế cấu tạo của hầm bảo vệ có thể có sự thay đổi sao cho phù hợp với các điều kiện tự nhiên và thi công cho hợp lí. Hầm bảo vệ có thể gồm một mái vòm bằng thép, kết cấu chống bằng bê tông cốt thép và được gia cố neo vào đá gốc. Khoảng trống giữa kết cấu chống và vòm thép, giữa hầm với đá gốc được lấp đầy bằng những vật liệu được lựa chọn là một hỗn hợp giữa đất, thép và bê tông. Một hầm bảo vệ khác tại vùng Bogota-Colombia có kết cấu dạng khung bê tông cốt thép, tấm bản chịu lực. Kết cấu hầm này không có kết cấu hấp thụ sóc vì thế tấm bản có tác dụng chịu toàn bộ năng lượng tác động từ đất đá rơi xuống. Một công trình hầm bảo vệ khác có cấu tạo trung gian giữa 2 loại trên có thể kể đến ở vùng Bucaramanra-Colombia cấu tạo từ một khung chịu lực, có thêm phần kết cấu mái hấp thụ năng lượng từ đất đá rơi [7].

2.2. Công nghệ thi công

Trên các tuyến đường đang khai thác, quá trình thi công được triển khai mà vẫn có thể đảm bảo giao thông ít bị gián đoạn. Muốn vậy, chia bề rộng đường làm hai phần. Một phần móng bên dưới cùng với tường chắn bên ngoài được thi công trước tiên. Phần tường chắn có thể phát huy vai trò đảm bảo an toàn ngay khi vừa thi công xong.

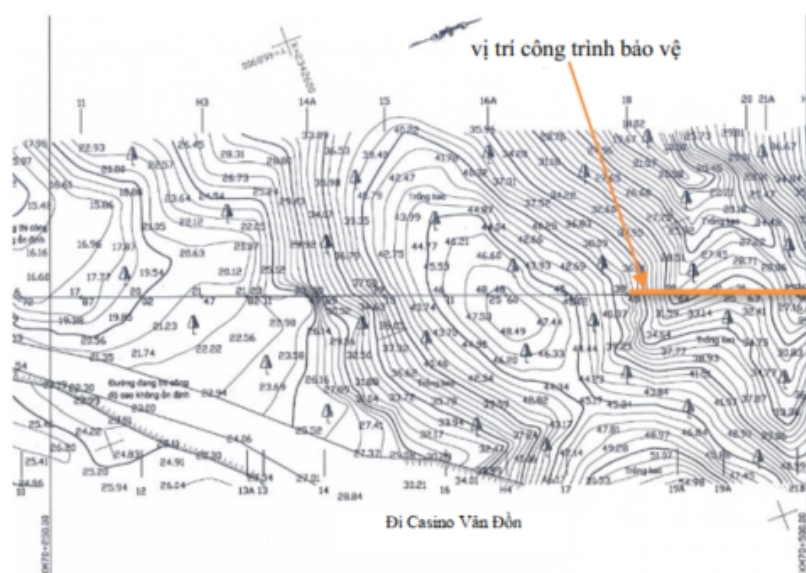
Bước tiếp theo của quá trình thi công là hoàn thiện phần nền móng còn lại nằm ở phía trong. Lúc này các phương tiện giao thông có thể sử dụng ngay phần đường đã thi công trước đó có tường chắn bảo đảm an toàn. Toàn bộ phần nền móng, mặt đường cũng như tường chắn được thi công đổ tại chỗ.

Phần mái vòm chịu lực có thể được thi công bằng phương pháp lắp ghép. Mái vòm đã được thi công sẵn trong công xưởng, sau đó được vận chuyển, cẩu và lắp tại công trường. Biện pháp này vừa đảm bảo chất lượng thi công mái vòm chịu lực, lại vừa rút ngắn được thời gian thi công, đảm bảo giao thông ít bị ảnh hưởng, giảm thiệt hại về kinh tế. Tại mỗi mảnh ghép của vòm đều có cốt thép chừa sẵn tại vị trí mối nối giữa 2 cánh vòm. Công đoạn tiếp theo của quá trình thi công là thực hiện việc đổ bê tông tạo thành mối nối cứng giữa 2 bên cánh vòm tạo sự liên khối cho cả vòm chịu lực.

Sau khi đã hoàn thành phần vòm chịu lực, nếu hầm có cấu trúc tiêu năng phía bên trên thì bước sau đó là tiến hành thi công phần này, làm phần tường phòng hộ, đất đắp nếu có. Bước cuối cùng là hoàn thiện công trình đưa vào sử dụng. Công trình có tác dụng có ý nghĩa rất lớn đối với các vùng có nguy cơ sụt lở đất, đảm bảo được giao thông vẫn thông suốt, tránh được các thiệt hại do sụt lở đất gây ra [9].

3. Đề xuất giải pháp kết cấu hầm chống sụt lở tại một tuyến đường vùng núi

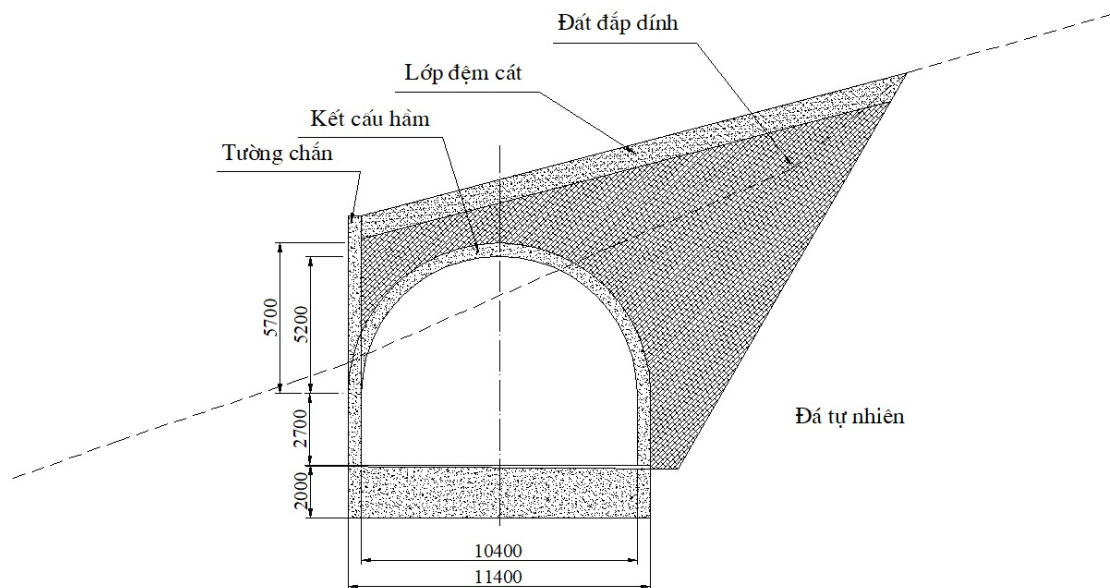
Bài báo trình bày một trường hợp nghiên cứu cho một dự án cụ thể là dự án cao tốc Vân Đồn – Móng Cái. Hình 3 thể hiện bình đồ của một đoạn tuyến của dự án [10]. Đoạn tuyến này có đặc điểm dốc cao, đất đá phong hóa, nứt nẻ nên tiềm ẩn nguy cơ cao sụt lở, đá rơi.



Hình 3. Vị trí công trình trên bình đồ tuyến, đoạn km 70+250 - km70+500 [10]

Đề xuất ở đây là một giải pháp hầm lấp ghép tại một vị trí điển hình có mái dốc ngang lớn trên tuyến đường bắt đầu từ cọc 18 với chiều dài 100m. Trong đó hầm có cấu tạo đầy đủ các bộ phận: vỏ hầm, tường chắn đất và lớp đệm cát phía trên cùng có tác dụng tiêu năng lượng các khối đất đá rơi giảm thiểu thiệt hại đến kết cấu hầm và phương tiện giao thông. Như đã phân tích ở trên, hầm được thiết kế thi công theo phương pháp lấp ghép nên thời gian thi công nhanh chóng, thậm chí có thể tiến hành mà không ảnh hưởng nhiều đến việc lưu thông giao thông. Kích thước hầm được thể hiện như trong hình, vỏ hầm và tường chắn được xem xét tính toán trong ví dụ này là 0,5 m, chiều dày lớp sàn hầm là 2,0 m (Hình 4).

Ứng xử của mô hình kết cấu vỏ hầm được xét với phần mềm Plaxis [11]. Có 3 loại đất đá được xem xét. Lớp đá tự nhiên mà công trình hầm đi qua, lớp đất đắp xung quanh hầm là loại đất đắp dính, lớp đệm cát tiêu năng nằm phía trên cùng là lớp cát có độ đầm chặt K95. Các phân tích ứng suất có hiệu sử dụng mô hình Mohr-Coulomb được sử dụng để mô phỏng ứng xử của đất nền xung quanh đường hầm. Đất nền được mô phỏng thoát nước (Drained) cho đất rời (đá nền, lớp đệm cát) và không thoát nước với bộ thông số có hiệu c', φ' (Undrained A) [11] cho đất dính (lớp đất đắp dính). Thông số địa chất của 3 lớp đất đá được trình bày trong Bảng 1.



Hình 4. Sơ họa phương án đề xuất

Bảng 1. Thông số địa chất đầu vào

Lớp đất/thông số	Đơn vị	Đá	Đất đắp dính	Cát đắp
Mô hình	-	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Ứng xử	-	Drained	Undrained A	Drained
Trọng lượng riêng	(kN/m ³)	22	18,5	19,0
Lực dính hữu hiệu	c' (kPa)	1000	15	2
Góc nội ma sát	φ (độ)	45	25	30
Hệ số Poisson	ν (-)	0,2	0,3	0,3
Modul đàn hồi	kPa	6,00E+05	2,50E+04	3,00E+04

Kết cấu hầm và tường chắn được mô phỏng bằng phần tử tấm (plate) với ứng xử đàn hồi tuyến tính (linear elastic). Modul đàn hồi của bê tông kết cấu B35 là $E = 34,5 \times 10^3$ Mpa, hệ số Poisson $\mu = 0,18$. Thông số đầu vào của kết cấu vỏ hầm và tường chắn được thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 2. Thông số kết cấu vỏ hầm và tường chắn

STT	Cấu kiện	Chiều dày(m)	EA (kN/m)	EI (kN m ² /m)
1	Vòm hầm	0,5	1,73E+07	3,59E+05
2	Nền hầm	2,0	6,90E+07	2,30E+07
3	Tường chắn	0,5	1,73E+07	3,59E+05

Trong khuôn khổ của bài báo, hầm được thiết kế có mục đích giảm thiểu thiệt hại và vẫn đảm bảo giao thông trong trường hợp có đất đá sụt lở nên nghiên cứu ảnh hưởng của khối đất đá rơi xuống hầm đã được xem xét. Trong tính toán, tải trọng động đá rơi có thể thay thế bằng tải trọng tĩnh. Theo số

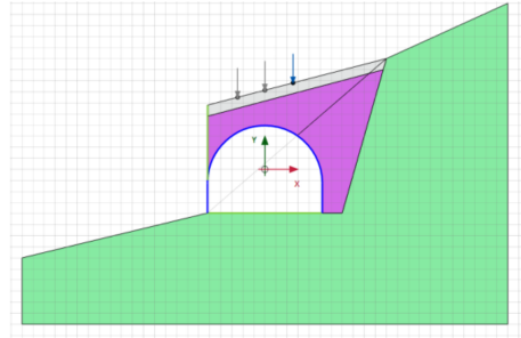
tay của hiệp hội đường bộ Nhật Bản, tải trọng đá rơi được tính dựa trên lý thuyết Hertzian theo công thức [9, 12, 13]:

$$P = 2,455 \cdot \lambda^{\frac{2}{3}} \cdot w^{\frac{2}{3}} \cdot H^{\frac{3}{5}} \cdot i \quad (1)$$

$$i = \frac{P_{\max}}{P_{\max(\lambda=100)}} = \left(\frac{h}{D}\right)^{-0,5} \quad (2)$$

trong đó P là lực tác động, λ là hằng số Lamé bằng $100 \text{ tf/m}^2 = 980,665 \text{ kN/m}^2$; w là trọng lượng khối rơi; H là chiều cao rơi; i là hệ số chiều dày lớp đệm; h là chiều dày lớp đệm; D là đường kính khối rơi.

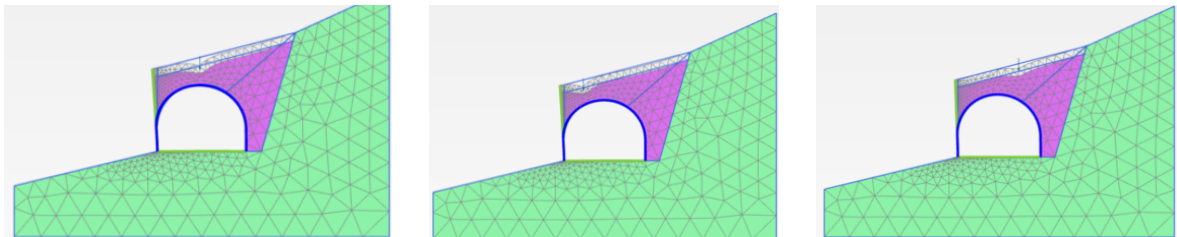
Công thức tính lực tác động của khối đất đá rơi được lấy theo (1) với trọng lượng khối đất đá rơi là 0,338 tấn, chiều cao rơi là 45 m, từ đó tính ra lực tác động quy đổi là 859,3 kN. Trong phạm vi bài báo có 3 vị trí rơi khác nhau của khối đất đá được xem xét để nghiên cứu ứng xử của kết cấu vỏ hầm: vị trí nằm giữa đỉnh hầm, vị trí bên trái và phải cách vị trí giữa mỗi bên 2 m theo phương nằm ngang. Các bước tiến hành mô phỏng được thực hiện tuần tự với các bước thi công thực tế được trình bày ở trên. Hình 5 thể hiện mô hình trên phần mềm Plaxis 2D với chiều dày lớp đệm cát ban đầu xem xét là 1,0 m.



Hình 5. Mô hình Plaxis

Các kết quả phân tích từ mô hình Plaxis bao gồm: lưới chuyển vị, chuyển vị của vòm, mô men vòm, lực cắt vòm và lực dọc vòm. Các kết quả này lại tương ứng với 3 vị trí rơi khác nhau của khối rơi.

Lưới chuyển vị của toàn bộ công trình được trình bày trong Hình 6, Hình 7 thể hiện chuyển vị của

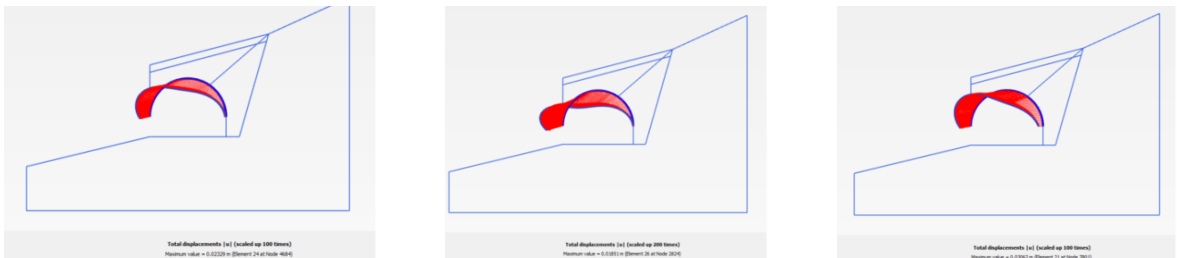


(a) Đá rơi ở giữa

(b) Đá rơi bên trái

(c) Đá rơi bên phải

Hình 6. Lưới chuyển vị tại các vị trí đá rơi



(a) Đá rơi ở giữa

(b) Đá rơi bên trái

(c) Đá rơi bên phải

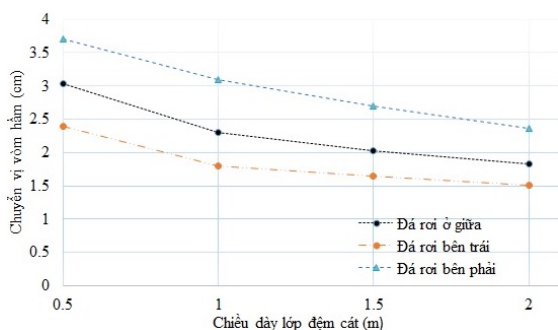
Hình 7. Chuyển vị vòm hầm tại các vị trí đá rơi

kết cấu vòm dưới tác động của đất đắp xung quanh và khối đất đá rơi. Theo kết quả thu được có thể thấy tại 3 vị trí đá rơi, vị trí đá rơi bên phải cho chuyển vị vòm max là lớn nhất (3,62 cm), tại vị trí giữa giá trị là 2,33 cm và giá trị này tại vị trí đá rơi bên trái cho kết quả nhỏ nhất 1,85 cm. Tuy nhiên nội lực trong vỏ hầm gồm mô men, lực cắt và lực dọc lại được ghi nhận lớn nhất tại vị trí đá rơi bên trái (Bảng 3). Như vậy việc tính toán thiết kế vỏ hầm cần phải quan tâm đến tất cả các vị trí đá rơi bất lợi.

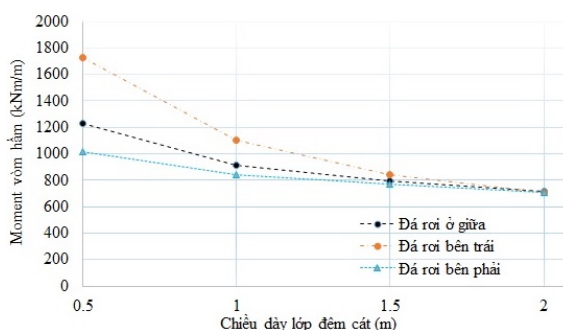
Bảng 3. Nội lực vào vòm hầm trong các trường hợp đá rơi

Nội lực	Đá rơi ở giữa	Đá rơi bên trái	Đá rơi bên phải
Mô men (kN m/m)	-916,1	-1100	-839,6
Lực cắt (kN/m)	-398,6	-399,7	-356,3
Lực dọc (kN/m)	-907,6	-1075	-795,8

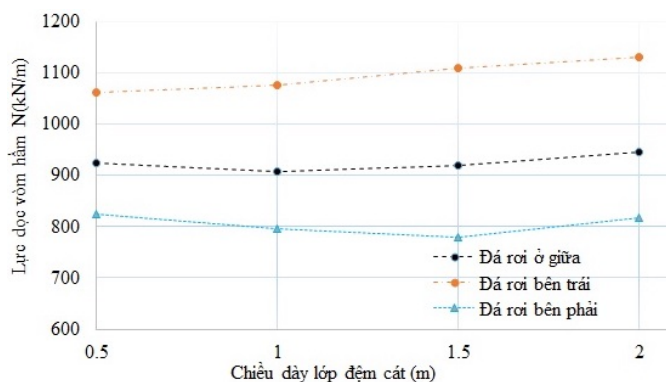
Chiều dày lớp đệm cát là một thông số quan trọng ảnh hưởng đến chuyển vị và nội lực vào vòm hầm trong trường hợp có đá rơi. Trong bài báo này, để khảo sát khả năng tiêu tán lực của lớp đệm cát, chiều dày lớp đệm cát được thay đổi với các giá trị khác nhau: 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m và 2,0 m. Kết quả chuyển vị, nội lực vào vòm hầm trong các trường hợp đã được thể hiện trong các hình vẽ.



Hình 8. Chuyển vị vòm hầm với chiều dày lớp đệm cát khác nhau



Hình 9. Mô men uốn tại vòm với chiều dày lớp đệm cát khác nhau



Hình 10. Lực dọc vào vòm với chiều dày lớp đệm cát khác nhau

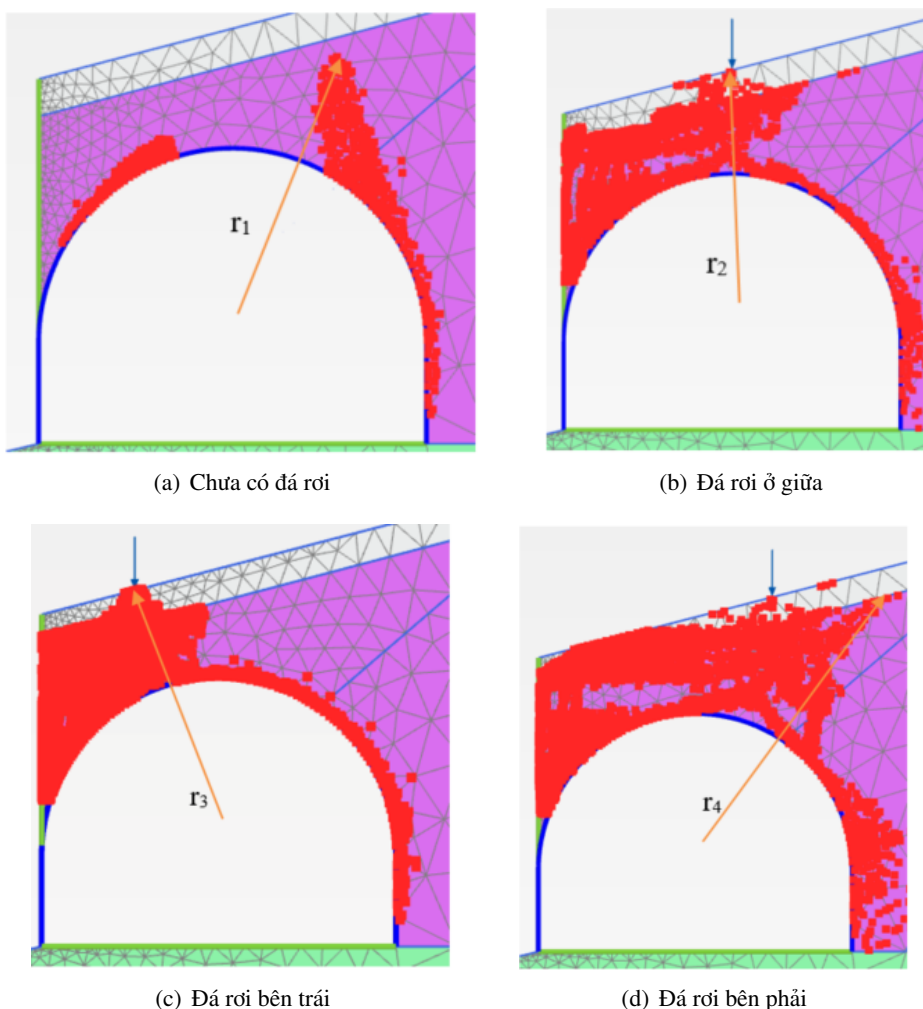
Từ Hình 8 và Hình 9 có thể thấy rằng chiều dày lớp đệm cát ảnh hưởng rất lớn đến chuyển vị và mô men tại vòm hầm. Lớp đệm cát càng dày thì khả năng tiêu tán lực do đá rơi càng tốt, nên giảm chuyển vị và mô men tại vòm hầm, khi chiều dày lớp đệm lớn hơn 1,5 m thì chuyển vị và mô men giảm không đáng kể. Trong khi đó ở Hình 10 chiều dày lớp đệm cát không ảnh hưởng nhiều đến lực dọc trong vỏ hầm. Việc lựa chọn chiều dày lớp đệm cát cần cân đối giữa yếu tố về chi phí thi công và khả năng tiêu tán lực của lớp này.

Trong tính toán kết hầm, biến dạng dẻo của đất nền xung quanh đường hầm là thông số quan trọng ảnh hưởng đến tải trọng lên kết cấu vỏ hầm. Các lớp đất đá trong mô hình được mô phỏng theo mô hình đàn dẻo lý tưởng, biến dạng dẻo được tuân theo điều kiện phá hủy Mohr-Coulomb theo công thức sau [11]:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

trong đó τ là ứng suất tiếp tuyến; σ là ứng suất pháp tuyến; c là lực dính; φ là góc nội ma sát.

Sự phát triển biến dạng dẻo của đất nền xung quanh hầm trước và sau khi có tải đá rơi được thể hiện tại Hình 11.



Hình 11. Vùng biến dạng dẻo xung quanh hầm

Từ Hình 11 có thể thấy khi có đá rơi vùng phá hoại của đất nền xung quanh hầm được phát triển rộng ra khi có tải trọng đá rơi. Bán kính vùng dẻo lớn nhất của đất nền xung quanh hầm trước khi có đá rơi $r_1 = 9,5$ m. Bán kính vùng dẻo trong các trường hợp đá rơi ở giữa, bên trái, bên phải có giá trị lần lượt là $r_2 = 10,4$ m, $r_3 = 10,2$ m và $r_4 = 12,6$ m. Ở đây có thể thấy rằng vùng đất chịu tác động của năng lượng đá rơi lớn dần tương ứng các trường hợp đá rơi bên trái (c), rơi ở giữa (b) và rơi bên phải (d), chính vì vậy bán kính vùng dẻo tăng dần theo thứ tự trên. Ngược lại, do sự hấp thụ năng lượng của đất đắp xung quanh hầm lớn hơn, nên nội lực vào vỏ hầm (Bảng 3) và tường chắn (Bảng 4) sẽ nhỏ dần tương ứng các trường hợp đá rơi bên trái, rơi ở giữa và rơi bên phải.

Bảng 4. Nội lực vào tường chắn trong các trường hợp đá rơi

Nội lực	Đá rơi ở giữa	Đá rơi bên trái	Đá rơi bên phải
Mô men (kN m/m)	-2580	-2932	-2115
Lực cắt (kN/m)	477,8	629,3	384

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày một giải pháp kết cấu hầm bảo vệ ở vùng có nguy cơ cao sụt lở và đá rơi. Giải pháp kết cấu bê tông lắp ghép thi công hoàn toàn lộ thiên đơn giản, thi công nhanh trong quá trình thi công có thể không cần ngừng giao thông. Kết cấu này có thể áp dụng cho đoạn tuyến mới hoặc cải tạo các đoạn tuyến cũ. Tính toán kết cấu với ảnh hưởng đá rơi có thể xét đơn giản qua tác dụng của tải trọng tĩnh. Việc tính toán tải trọng đá rơi, khảo sát các vị trí đá rơi có thể kiểm soát được tác dụng bất lợi của tải trọng. Khảo sát ảnh hưởng của chiều dày lớp đệm phía trên cho thấy với việc tăng chiều dày lớp đệm cát thì khả năng tiêu tán năng lượng từ đá khối đá rơi cũng tăng theo. Chiều dày lớp đệm cát cần cân đối giữa yếu tố về chi phí thi công và khả năng tiêu tán lực của lớp này. Kết quả tính toán cũng cho thấy các vị trí đá rơi khác nhau gây bất lợi khác nhau đến vỏ hầm và kết cấu tường chắn (nội lực và chuyển vị). Chính vì vậy trong tính toán thiết kế kết cấu hầm bảo vệ cần xem xét đầy đủ các vị trí đá rơi khác nhau. Từ những phân tích trên cho thấy kết cấu tỏ ra là hiệu quả trong việc tiêu tán năng lượng của khối đất đá rơi và giảm thiểu thiệt hại về công trình giao thông.

Tài liệu tham khảo

- [1] Erismann, T. H., Abele, G. (2001). *Dynamics of Rockslides and Rockfalls*. Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Lomtadze, V. D. (1982). *Địa chất động lực công trình*. Nhà xuất bản Đại học và Trung học chuyên nghiệp, Hà Nội.
- [3] Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., Jaboyedoff, M. (2011). [Rockfall characterisation and structural protection – a review](#). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9):2617–2651.
- [4] Mạnh, N. Đ., Hà, N. H. (2018). Giải pháp giảm thiểu sụt trượt trên các tuyến đường giao thông xây dựng mới và nâng cấp mở rộng ở vùng núi. *Tạp Chí Khoa Học Và Công Nghệ Việt Nam*, 6.
- [5] Ngọc, N. S. (2006). Các yếu tố ảnh hưởng tới ổn định bờ dốc ở Việt Nam. *Tuyển tập công trình Hội nghị khoa học toàn quốc lần thứ 5, Hội Cơ học đá Việt Nam, Hà Nội*.
- [6] Doanh, B. P. (2013). Nghiên cứu ứng dụng kiểu tường chắn có bệ giảm tải, sàn giảm tải trong ổn định mái taluy đường miền núi tại Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 15.

- [7] Henao-Vergara, D., Arenas-Rios, M., Suarez-Burgoa, L. (2011). False tunnels as prevention measures against impact from rock falling on mountainous roads. *Rock Mechanics: Achievements and Ambitions*, CRC Press, 937–940.
- [8] Ministry of Transport and Roads Of Kyrgyz Republic. *Countermeasures manual for disaster prevention*.
- [9] Lim, C. W., Plantier, D. (2019). An introduction on the increasing usage of precast concrete arch tunnel in Korea. *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Singapore, 257–263.
- [10] Tổng Công ty tư vấn thiết kế GTVT TEDI (2018). *Dự án đường cao tốc Vân Đồn - Móng Cái theo hình thức đối tác công tư (PPP) - Hồ sơ khảo sát, tập III*.
- [11] *Plaxis 2D Reference Manual Connect Edition V20*. p. 523.
- [12] Schellenberg, K. (2009). [On the design of rockfall protection galleries](#). Technical report, ETH Zurich.
- [13] Japan Road Association (1983). *Manual for anti-impact structures against falling rocks*. (in Japanese).