

Article info

Type of article:

Review paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2024.vn.4.1.1-10>

***Corresponding author:**

E-mail address:

Anhlv@utt.edu.vn

Received: 4/10/2023

Accepted: 15/1/2024

Published: 19/1/2024

Overview of structural tunnel protection solution against rockfall with cast-in-place construction

Lại Văn Anh*, Phùng Bá Thắng, Nguyễn Văn Quang

University of Transport Technology, 54 Trieu Khuc, Ha Noi 100000, Viet Nam

Abstract: Economic and human losses due to slope instability and annual slippage activities are huge. There are many causes mentioned and many solutions have been proposed and applied in traffic in Vietnam. Male. In this article, the author mentions a solution that has not been applied in Vietnam but has the ability to effectively and permanently prevent falling rocks, reducing the risk of road congestion when rockfall occurs. Prefabricated tunnels are a solution that needs to be researched and applied on roads with a high risk of slipping and falling rocks. Structural and construction solutions are presented in the article. The structure is diverse in types, materials, and assembly technology suitable to the situation on mountainous roads where slipping and rockfall occur.

Keywords: Protection tunnel against rockfall; structure against rockfall; Cast in place tunnel; Cast-in-place protection tunnel; Rock shed.

Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo tổng quan

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2024.vn.4.1.1-10>

***Tác giả liên hệ:**
Địa chỉ E-mail:
Anhlv@utt.edu.vn

Ngày nộp bài: 4/10/2023
Ngày chấp nhận: 15/1/2024
Ngày đăng bài: 19/1/2024

Giải pháp kết cấu hầm bảo vệ chống đá rơi thi công lắp ghép

Lại Văn Anh*, Phùng Bá Thắng, Nguyễn Văn Quang
Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, 54 Triều Khúc, Hà Nội 10000, Việt Nam

Tóm tắt: Thiệt hại về kinh tế và người do các hoạt động mất ổn định mái dốc, sụt trượt hàng năm là rất lớn, có nhiều nguyên nhân được đề cập và cũng đã có nhiều giải pháp được đưa ra và áp dụng trong giao thông ở Việt Nam. Trong nội dung bài báo này, tác giả đề cập đến một giải pháp chưa được áp dụng tại Việt Nam nhưng có khả năng chống lại hiện tượng đá rơi một cách hiệu quả và lâu dài, giảm nguy cơ ách tắc trì trệ tuyến đường khi xảy ra hiện tượng đá rơi. Hầm lắp ghép là một giải pháp cần có nghiên cứu cũng như áp dụng tại các tuyến đường có nguy cơ cao về sụt trượt, đá rơi. Các giải pháp về kết cấu cũng như thi công được trình bày trong bài báo. Trong đó kết cấu đa dạng về loại hình, vật liệu, công nghệ thi công lắp ghép phù hợp với tình hình tại các tuyến đường miền núi nơi xảy ra hiện tượng sụt trượt, đá rơi.

Từ khóa: Hầm chống đá rơi; Kết cấu chống đá rơi; Hầm lắp ghép; Hầm lắp ghép chống đá rơi; Hầm bê tông cốt thép.

1. Khái quát chung

Hàng năm thiệt hại về người do thiên tai là rất lớn, trong đó thiệt hại do trượt đất theo Tổ chức hợp tác Quốc tế về chống trượt đất của Nhật Bản (International Consortium on Landslides – ICL) là 130 người/năm tại Nhật Bản, 150 người/năm tại Trung Quốc, 60 người/năm tại Italy và số người thiệt hại hàng năm tại Mỹ là 50 người. Việt Nam là một nước có nhiều địa hình đồi núi trải dài từ bắc vào nam ước tính số người thiệt hại do đất trượt trung bình khoảng 30 người/năm [1]. Theo Tổng cục Phòng chống thiên tai từ đầu năm 2022 đến 15/7/2022 có 31 cầu tạm bị hư hỏng, sạt lở 31.268km đường giao thông, 640538 m³ đất đá sạt lở ảnh hưởng đến các tuyến đường và dân sinh [2].

Theo Hội Chữ thập đỏ thế giới thống kê, thiệt hại do trượt đất đứng thứ ba (17%) trong số các tai biến thiên tai gây ra hàng năm trên thế giới. Ngập lụt gây ra thiệt hại cao nhất (39%), động đất đứng

thứ hai (36%), tiếp đó do khí xoáy lốc (7%) và cuối cùng là do hiện tượng nhiệt độ thay đổi đột biến (1%).

Viện Khoa học địa chất và khoáng sản (Bộ Tài nguyên và Môi trường) khi thực hiện đề án phân vùng cảnh báo nguy cơ sạt lở đất đá các vùng miền núi đã ghi nhận các điểm đang có nguy cơ sạt lở đất tại 10 tỉnh miền núi phía bắc; trong đó số điểm nguy cơ có khối lượng trượt lớn, rất lớn và đặc biệt lớn là 2.110. Các điểm này cần phải có biện pháp kịp thời và hiệu quả đảm bảo an toàn cho mạng lưới giao thông và con người.

Theo thống kê năm 2017 của Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn thiệt hại người và tài sản do các hiện tượng sạt lở đất là 71 người chết và mất tích, hơn 4000 nhà bị đất đá cuốn trôi, hơn 13 000 hộ gia đình ảnh hưởng bởi hiện tượng sạt lở đất. Trong hơn nửa đầu năm 2018, có 12 đợt lũ ống, sạt lở đất. Các đợt thiên tai gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến dân cư, thiệt hại nặng nề ước

tính đến 1000 tỉ đồng. Đặc biệt nghiêm trọng từ 23-26/6 một loạt trận sạt lở đất diễn ra trên các tỉnh miền núi phía bắc làm thiệt hại về người và thiệt hại về kinh tế ước tính là 762 tỉ đồng [3].

Việt Nam là nước nằm trong khu vực có lượng mưa nhiều, lượng mưa trung bình năm lớn, bão lũ xảy ra thường xuyên ảnh hưởng nhiều đến sự ổn định của đất đá. Địa hình chủ yếu là dạng đồi núi theo hướng tây bắc - đông nam. Từ nghiên cứu của Viện Khoa học công nghệ (KH-CN) giao thông vận tải - ITST, Bộ Giao thông Vận tải - cho thấy hiện tượng sụt trượt của nước ta thuộc mức trung bình cao trên thế giới.

Theo nghiên cứu của Phó Giáo sư - tiến sỹ (PGS-TS) Nguyễn Bá Kế, sạt – trượt có nguyên nhân đến từ hoạt động của con người, chính những tác động của con người từ hoạt động giao thông, hoạt động lao động sản xuất làm thay đổi dòng chảy, độ ẩm, sự tích nước của đất, phá rừng, khai thác quá mức. Các hoạt động đó làm phá vỡ sự cân bằng, ổn định của đất cộng với các yếu tố khách quan như biến đổi khí hậu, khí hậu cực đoan dẫn đến tình trạng sạt- trượt.

1.1. Các hiện tượng sụt lở đất đá

Sụt lở đất đá gây ra do địa chất thay đổi, phong hóa đất đá, do đứt gãy, do nước, do khí hậu, hoạt động của con người... Varnes D.J, [4] chia làm 6 nhóm chính theo dạng chuyển động:

- Sụt lở (fall)
- Lật (topples)
- Trượt (slides): khối đất đá trượt xoay theo mặt cong hoặc khối đất đá dịch chuyển theo một hay vài mặt yếu có sẵn.
- Trượt ép trời (lateral spreads).
- Trượt dòng (flows).
- Trượt phức hợp (complex).

Mỗi nhóm được phân loại theo 3 loại vật liệu khác nhau: đá, vụn đất đá và đất. Từ đó có tổng cộng 29 dạng dịch chuyển vật liệu theo sườn dốc. Một cách phân loại khác của hội trượt đất quốc tế (ICL) phân chia các dạng mất ổn định thành 34 dạng khác nhau. [5]

1.2. Các biện pháp chống sụt lở đất đá

Theo [6] các biện pháp chống sụt lở đất đá có thể kể đến như sau:

- Thay đổi hình dạng của mái dốc: giảm độ cao, giảm độ nghiêng, thêm trọng lượng ở chân dốc (phản áp)
- Kiểm soát nước mặt: phủ thảm thực vật, bít các nứt nẻ, thiết kế các hệ thống thoát nước.
- Kiểm soát sự thấm/xói ngầm: giếng thu nước sâu, đường thoát nước, đùng trọng lực, đường thoát nước ngang nhiều tầng, hầm hào thoát nước, giếng giảm áp hoặc rãnh ở chân dốc, đường hào thu nước, đệm tiêu nước, điện thấm, biện pháp hóa học.
- Chống giữ: bê tông cốt thép, chốt đá, đai bê tông và chốt đá, neo bằng cáp, lưới phủ, phun phủ bằng bê tông, trụ/tường ốp đá, tường bằng rọ đá, tường cũi, tường chắn bằng bê tông cốt thép, tường chắn bằng bê tông có neo, tường trọng lực bằng đá hoặc bê tông, cọc khoan nhồi hoặc cọc rễ cây.

Trong đó một số biện pháp được dùng phổ biến như: biện pháp thoát nước, bảo vệ mái dốc, giảm tải trọng và biện pháp chắn đỡ.

1.3. Các biện pháp chống sụt lở do đá rơi không làm thay đổi kết cấu mái dốc

Đá rơi có thể bao gồm từ một vài tảng đá có kích thước bằng nắm tay đến các phần vách đá và tảng đá lớn, có thể lăn, nảy và lao xuống dốc, rơi xuống các khu vực cách đường rơi rất xa

Hiện nay có nhiều biện pháp chống phòng tránh giảm thiểu thiệt hại do đá rơi có thể kể đến như sau:

Lưới thép cường độ cao (Steelgrid HR)

Lưới thép có cấu tạo làm bằng lưới diện rộng có tác dụng giữ lại toàn bộ đá lăn, đá rơi, mảnh vụn, đất đá sụt lở... làm giảm năng lượng rơi của đất đá, điều chỉnh hướng rơi đất đá theo ý muốn giảm thiệt hại. Hệ thống lưới được neo xuống đất bằng các đỉnh neo thông qua hệ thống các sợi cáp đường độ cao phía trên đỉnh. Lưới thép cường độ cao phù hợp với các trường hợp đất đá rơi với

trọng lượng và chiều cao rơi không quá lớn. (Hình 1, 2).



(a)



(b)

Hình 1. Chống sạt lở bằng lưới thép cường độ cao (a, b) (nguồn: Geobrugg)



Hình 2. Lưới thép được sử dụng chống sạt lở, đá rơi ở thung lũng Gap- Canada (nguồn TranBC)

Dạng lưới thép này đã được ứng dụng trên nhiều quốc gia trên thế giới như Thụy Sĩ, Pháp... tuy nhiên nhà nước cũng chưa đưa ra một văn bản nào quy định về tiêu chuẩn thiết kế cũng như các trang thiết bị, phần mềm tính toán, tiêu chuẩn nghiệm thu... khi sử dụng kết cấu thép nhằm phòng chống sạt lở.

Hàng rào chống đá rơi (Rockfall Barrier)

Khi hệ thống lưới thép phủ không thể lắp đặt vì các lý do liên quan đến việc khu vực thi công khó khăn khi tiếp cận, lý do địa hình, địa mạo hay cân nhắc về tính kinh tế của giải pháp, thì hàng rào mềm chắn đá Rockfall Barrier [Hình 3] là một biện pháp được xem xét để ngăn chặn các tảng đá ở mọi kích cỡ, cũng như các vật thể khác rơi xuống nhằm bảo vệ các công trình cơ sở hạ tầng hay đường xá ở phía dưới [7,8].

Trong một số trường hợp nguy cơ do lở đá nhất định, do các vấn đề kỹ thuật, điều kiện địa hình, khả năng tiếp cận hoặc về yếu tố kinh tế, giải pháp lắp đặt lưới bảo vệ hoặc lưới ổn định bề mặt sẽ không hiệu quả. Trong những trường hợp này, giải pháp hiệu quả về chi phí thường được sử dụng là lắp đặt các hàng rào chống đá lở đá rơi trên bề mặt mái dốc. Những hàng rào này được định vị để can thiệp và ngăn chặn các viên đá, tảng đá rơi xuống. Các hàng rào được cung cấp ở dạng giải pháp hoàn thiện với chiều cao, chiều dài và khả năng hấp thụ năng lượng cụ thể.

Hệ thống hàng rào bao gồm 4 kết cấu liên kết với nhau: kết cấu cố định (cột thép, đế móng, neo ghim giữ), các kết cấu hỗ trợ và kết cấu linh hoạt tự điều chỉnh nhằm tiêu năng khi đá rơi vào lưới và các kết cấu kết nối, nên được gọi là hệ thống kết cấu linh hoạt [9,10].



Hình 3. Hàng rào Rockfall Barrier tại một số khu vực ở Ý và Tây Ban Nha

Hầm chống đá rơi

Ở nhiều khu vực miền núi, đá lở đã trở thành tai biến địa chất nghiêm trọng và thường xuyên nhất ngoại trừ sạt lở đất. Do tốc độ cao, đột ngột, ngẫu nhiên và động năng, đá rơi gây ra mối đe dọa nghiêm trọng đối với nhiều cơ sở hạ tầng và tòa nhà thậm chí gây thương vong. Trên thực tế, một cấu trúc bảo vệ đá rơi được thiết kế để giảm thiểu các thảm họa do đá rơi gây ra là hầm chống đá rơi (Hình 4,5,6) [11,12,13]. Trong số đó, kết cấu được xây dựng bằng bê tông cốt thép, bằng thép có đệm đất sỏi lấp trên đỉnh [14]. Vai trò của lớp đệm là hấp thụ năng lượng tác động của đá rơi để giảm lực tác động lên kết cấu bê tông cốt thép chịu lực bên dưới [15]. Hầm có khả năng chống tảng đá rơi lớn, đảm bảo an toàn cho tuyến đường. Các nghiên cứu được thiết kế và thử nghiệm mô hình nguyên mẫu đánh giá ứng xử kết cấu dưới tác động của đá rơi đã được thực hiện [16].



Hình 4. Hầm mái dốc làm chệnh hướng đá rơi bảo vệ đường sắt (nguồn Duncan)



Hình 5. Hầm chống đá rơi tại Newzealand (nguồn Mattinbgn)



Hình 6. Hầm với mái bằng (nguồn Larimit)

2. Nghiên cứu giải pháp kết cấu hầm lắp ghép chống đá rơi tại Việt Nam

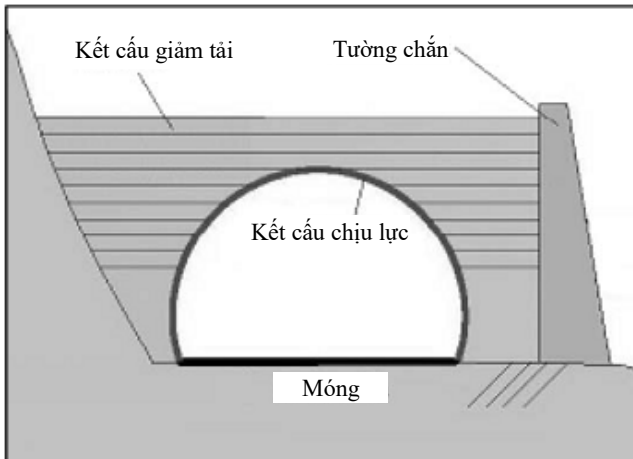
2.1. Giải pháp kết cấu

Kết cấu hầm chống đá rơi được thiết kế phụ thuộc vào khối lượng tác động của đá rơi và chiều cao rơi vào vật liệu đệm [17]. Công trình hầm bảo vệ là một trong những biện pháp phòng chống lại tác động của trượt lở đất đá. Hầm bảo vệ là một dạng công trình được xây dựng trên tuyến đường nơi có chiều dày tầng phủ mỏng và có thể lựa chọn cả hai giải pháp xẻ taluy đi lộ thiên hay đi bằng hầm trong đó hầm có thể đào kín hay đào hở trên bề mặt. Hầm chống lại các loại vật liệu rơi vào đường, đặc biệt trong trường hợp trượt lở của đất đá, cho phép việc thông xe vẫn diễn ra liên tục không gián đoạn. Hầm bảo vệ chống đá rơi có thể được xây dựng bằng phương pháp đúc trước hay đúc tại chỗ, bê tông dự ứng lực căng trước hay căng sau hoặc làm bằng kết cấu thép [18].

Loại hầm này, tùy theo vị trí cụ thể, điều kiện địa hình và địa chất, địa chất thủy văn và giải pháp tuyến đường chọn có thể thiết kế có tính đến ổn định của bờ dốc khu vực đầu hầm cũng như ta luy dọc hầm. Hầm phải được ổn định khi chịu tác dụng của môi trường đất đá xung quanh và đặc biệt khi có đá lở rơi do nổ đá hay các tai biến địa chất khác.

Với mục đích như trên, cấu tạo cơ bản của hầm sẽ gồm 4 phần: bộ phận thứ nhất có tác dụng hấp thụ năng lượng rơi của đất đá (absorber structure), giảm tác động xuống các kết cấu chịu tải bên dưới. Bộ phận này có thể được làm từ đa dạng các loại vật liệu như cát, đất, polystyren hoặc lớp cũ... Bộ phận thứ 2 ngay bên dưới là bộ phận

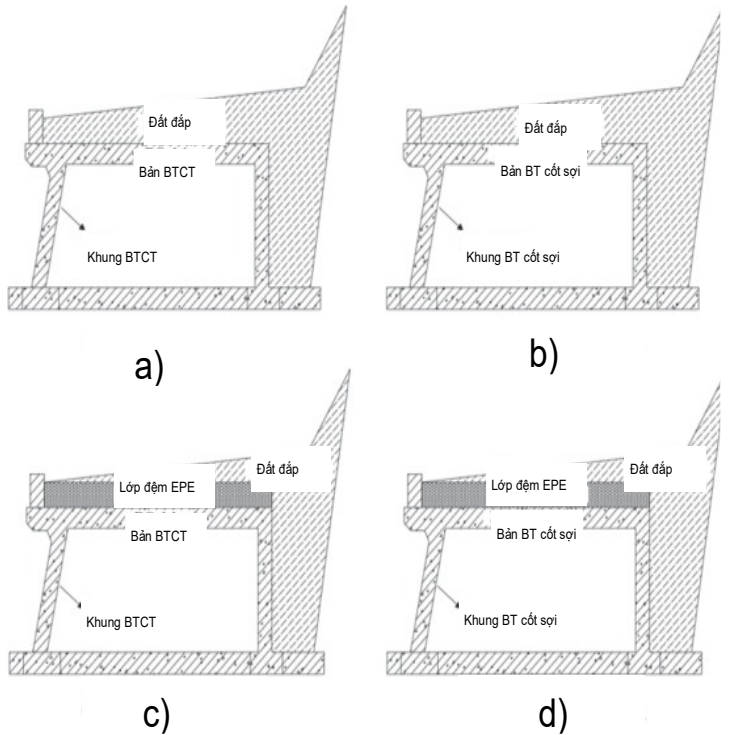
chịu lực chính (support) có tác dụng truyền toàn bộ năng lượng đá rơi xuống bộ phận thứ 3 là kết cấu móng (foundation) có thể làm bằng thép hoặc bê tông cốt thép. Bộ phận thứ 4 cần phải kể đến của hầm bảo vệ là kết cấu dạng tường chắn (retainment) có thể là tự nhiên hoặc nhân tạo để ngăn đất đá rơi trong phạm vi hầm không làm ảnh hưởng đến các khu vực khác bảo vệ giao thông và dân sinh (Hình 7).



Hình 7. Cấu tạo cơ bản của hầm bảo vệ [19]

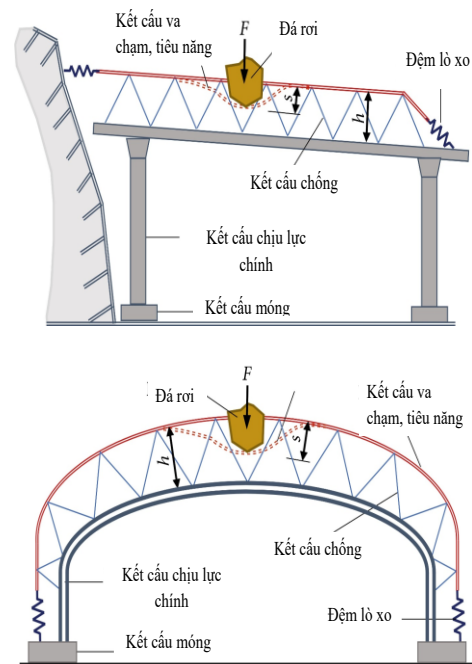
- 1-Kết cấu giảm tải (Absorber structure), 2- Kết cấu chịu lực (Support), 3- Móng (Foundation), 4- Tường chắn (Retainment)

Hầm bảo vệ có thể có nhiều dạng cấu tạo từ hình dạng kết cấu đến vật liệu phù hợp với điều kiện thi công, mục đích tiêu năng và cảnh quan địa hình khu vực. Vật liệu làm kết cấu hầm bảo vệ rất đa dạng. Để cải thiện tính hấp thụ năng lượng, vật liệu polyetylen (PE) và xốp polyetylen (EPE) đã được sử dụng (Hình 8). Với sự tham gia của vật liệu PE, độ dẻo và khả năng chống va đập của kết cấu chịu lực được tăng cường. Ngoài ra, để giảm tính tải và tải trọng va đập, EPE được sử dụng thay thế một số lớp cát, tạo thành lớp đệm composite. Theo [20] dưới năng lượng tác động thấp và trung bình, so với đệm cát truyền thống, đệm composite được ưa chuộng hơn để giảm tác động của tải trọng đá rơi. Bê tông sợi có khả năng tiêu tán năng lượng tốt hơn so với bê tông thường. Khi chịu lực lớn, mô hình bê tông cốt thép bị hư hỏng biến dạng lớn, trong khi đó biến dạng tối đa của mô hình bê tông cốt sợi PE là rất nhỏ.



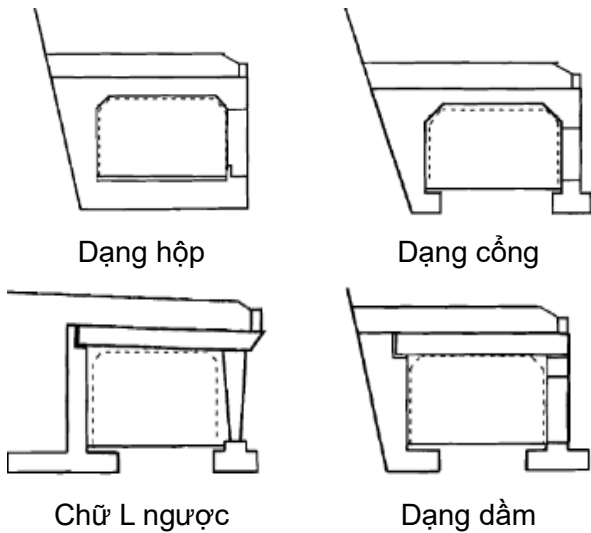
Hình 8. Cấu tạo hầm bảo vệ với các vật liệu khác nhau [20]

Một nghiên cứu khác [21] đề xuất cấu trúc giảm tải chủ yếu bao gồm lò xo, lưới vòng, thanh lò xo và dây hỗ trợ, có thể được sử dụng để thay thế lớp đệm truyền thống trên hầm để bảo vệ đá rơi (Hình 9).



Hình 9. Cấu tạo hầm bảo vệ sử dụng kết cấu giảm tải khác nhau [21]

Hầm chống đá rơi có nhiều loại hình dạng kết cấu khác nhau phụ thuộc vào điều kiện địa hình, địa chất, tuyến đường cũng như công nghệ thi công. Một số hình dáng điển hình của hầm có thể thấy trong thực tế như dạng cột kết hợp với mái bằng, mái vòm (Hình 10, 11), hầm dạng khung (Hình 12)



Dạng hộp

Dạng vòm

Chữ L ngược

Dạng dầm

Hình 10. Các dạng kết cấu hầm [22]

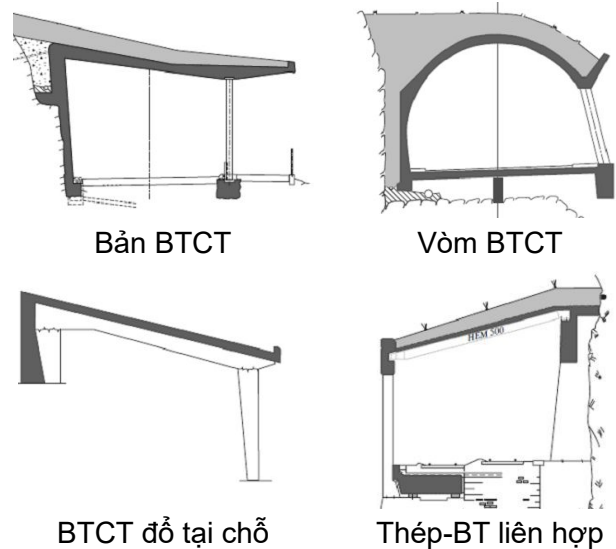


Hình 11. Cấu tạo hầm dạng cột kết hợp với mái bằng, mái vòm [23]



Hình 12. Cấu tạo hầm dạng khung trên đường Nagano Prefectural, Nhật [24]

Vật liệu làm hầm chống đá rơi có thể làm bằng nhiều loại vật liệu khác nhau (Hình 13) như đá (Hình 14), bê tông cốt thép, bê tông cốt thép dự ứng lực, thép (Hình 15) có thể kết hợp với cáp (Hình 16) để tăng cường khả năng chịu tải của hầm.



Bản BTCT

Vòm BTCT

BTCT đỡ tại chỗ

Thép-BT liên hợp

Hình 13. Các dạng hầm chống đá rơi bằng BTCT và thép-BTCT liên hợp [25]



Hình 14. Hầm chống đá rơi bằng đá (Hầm Rain Rock) [26]



Hình 15. Hầm chống đá rơi trên đường Niigata Prefectural, Nhật Bản [27]



Hình 16. Hầm chống đá rơi gia cố bằng cáp neo [28]

2.2. Giải pháp thi công

Thi công kết cấu hầm chống đá rơi bằng phương pháp lắp ghép có một ưu điểm hơn so với các giải pháp khác là không ảnh hưởng đến quá trình giao thông [29]. Kết cấu được thi công phân đoạn, đảm bảo luôn có một phần đường dành lại cho giao thông qua lại. Đầu tiên, chỉ một phần móng và tường chắn được thi công trước.

Khi một phần móng và tường chắn được thi công xong, phần này được sử dụng làm đường giao thông luôn. Phần nền móng phía trong được thi công tiếp theo cũng bằng phương pháp đổ tại chỗ. Trong lúc này phần tường chắn đã thi công trước đó đóng vai trò như một tường chắn bảo vệ giữ cho giao thông được an toàn.

Hình 17 thể hiện công đoạn thi công mái vòm, bước này được thực hiện bằng phương pháp lắp ghép. Mái được chia làm nhiều đốt, phụ thuộc vào kích thước và khối lượng các đốt còn được chia làm thành 2 mảnh và được thi công trong công xưởng. Việc thi công hàng loạt và điều kiện thi công trong công xưởng giúp rút ngắn thời gian thi công, chất lượng tốt đồng đều, khả năng cơ giới hóa cao. Các mảnh vòm có chừa sẵn cốt thép để sau đó tiến hành tạo mối nối tại công trường đảm bảo tính liên kết và chịu lực của cả kết cấu.

Sau khi phần vòm chịu lực đã được lắp ghép xong, tùy thuộc vào cấu tạo của hầm mà ta còn các công đoạn tiếp theo hay không. Đối với các loại kết cấu Hầm có chức năng tiêu năng do các khối đất đá rơi, hầm có thêm cấu trúc bằng các loại vật liệu

tiêu năng đa dạng và là bước thi công tiếp theo của Hầm bảo vệ. Hình 18 thể hiện bước hoàn thiện cuối cùng đưa công trình vào sử dụng.



Hình 17. Lắp ghép mái vòm chịu lực và hoàn thiện mối nối [29]





Hình 18. Công trình được hoàn thiện đưa vào sử dụng [22]

3. Kết luận

Một giải pháp kết cấu hầm bảo vệ có tác dụng chống đá rơi có khả năng áp dụng ở vùng có nguy cơ cao sạt lở. Dạng kết cấu hầm này được sử dụng bảo vệ tuyến đường chống lại đá rơi khi các biện pháp giữ ổn định và bảo vệ khác không hiệu quả. Kết cấu này có chi phí cao nhưng có thể giải quyết hiệu quả ở những vùng có nguy cơ nghiêm trọng về sạt lở và đá rơi. Chi phí bảo trì đối với dạng kết cấu này là không đáng kể, mặt khác lại có thể giảm thiểu thiệt hại nhiều nhất so với các phương án khác. Việc lựa chọn và tính toán kết cấu hầm, kết cấu vật liệu hấp thụ năng lượng phụ thuộc vào địa hình, địa chất và khối đất đá rơi nên cần có khảo sát tại mỗi khu vực cụ thể.

Trong bài báo kết cấu hầm bảo vệ có giải pháp thi công theo dạng lắp ghép lộ thiên đơn giản. Thời gian thi công nhanh, giao thông vẫn được đảm bảo ngay trong quá trình thi công hầm. Điều đó cho phép giải pháp có thể áp dụng được với các tuyến đường mới và cải tạo tuyến đường cũ.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải (ĐHCNGTVT) trong đề tài mã số ĐTTĐ2022-10.

Tài liệu tham khảo

[1] Đ.L. Nguyen. (2011). Nghiên cứu các quá trình dịch chuyển trọng lực đất đá trên sườn dốc, mái dốc của các tuyến đường giao thông Tây Quảng Bình và đề xuất các giải pháp phòng chống. Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng, Hà Nội.

- [2] Thiệt hại do thiên tai từ đầu năm hơn 4 nghìn tỷ đồng. <https://dangcongsan.vn/xay-dung-xa-hoi-an-toan-truoc-thien-tai/thiet-hai-do-thien-tai-tu-dau-nam-hon-4-nghin-ty-dong-615331.html>, 2022.
- [3] Lũ quét, sạt lở đất làm 49 người chết, thiệt hại khoảng 1.000 tỷ đồng kể từ đầu năm. <https://kinhdothi.vn/lu-quet-sat-lo-dat-lam-49-nguoi-chet-thiet-hai-khoang-1-000-ty-dong-ke-tu-dau-nam.html>, 2018.
- [4] D.J. Varnes. (1978). Landslides-analysis and control. Slope movement types and processes. National academy of sciences. Washington, D.C.
- [5] O. Hunggr, S. Leroueil, S. and L. Picarelli. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslide*, 11(2), 167-194.
- [6] R.E. Hunt. (2005). *Geotechnical Engineering Investigation Handbook*. Second Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [7] J.J. Yang, S.L. Duan, Q.F. Li, C.Q. Liu. (2019). A review of flexible protection in rockfall protection. *Nat Hazards*, 99(1), 71-89.
- [8] L. Zhao, Z.X. Yu, Y.P. Liu, J.W. He, S.L. Chan, S.C. Zhao. (2020). Numerical simulation of responses of flexible rockfall barriers under impact loading at different positions. *Journal of Constructional Steel Research*, 167.
- [9] Đ.M. Nguyen, A.Đ. Le. (2019). Hệ thống rào chắn linh hoạt giảm thiểu rủi ro đá rơi, đá lăn trên các tuyến đường giao thông vùng núi Việt Nam. *Tạp chí Địa kỹ thuật*, 1+2/2019.
- [10] Geobrugg. (2008). GBE rockfall protection barriers: The most economic barrier from high-tensile steel wire. Switzerland.
- [11] C.J. Ouyang, Y. Liu, D.P. Wang, S.M. He. (2019). Dynamic analysis of rockfall impacts on geogrid reinforced soil and EPS absorption cushions. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 23(1), 37-45.
- [12] P. Zhao, L.Z. Xie, L.P. Li, Q. Liu, S. Yuan. (2018). Large-scale rockfall impact experiments on a RC rock-shed with a newly proposed cushion layer composed of sand and

- EPE. *Engineering Structures*, 175, 386-398.
- [13] B.-T. Phung, V.-Q. Nguyen, V.A. Lai. (2023). Phân tích kết cấu bảo vệ chống tác động của sạt lở và đá rơi. *Tạp chí Giao thông Vận tải*, 1+2/2023.
- [14] S. Kawahara, T. Muro. (2006). Effects of dry density and thickness of sandy soil on impact response due to rockfall. *Journal of Terramechanics*, 43(3), 329-340.
- [15] P. Zhao, L. Xie, L. Li, Q. Liu, S. Yuan. (2018). Large-scale rockfall impact experiments on a RC rock-shed with a newly proposed cushion layer composed of sand and EPE. *Engineering Structures*, 175, 386-398.
- [16] M. Wang, Y. Liu, L. Cui & W. Yao. (2023). A Flexible Three-Module Rock Shed for Rockfall Protection: Design and Full-Scale Experimental Investigation. *International Journal of Civil Engineering*, 21, 51–66.
- [17] J. Jacquemoud. (1999). Swiss guideline for the design of protection galleries: background, safety concept and case histories - Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures, Kanazawa, Japan.
- [18] N. Kishi, H. Konno, K. Ikeda, and K. G. Matsuoka. (2022). Prototype impact tests on ultimate impact resistance of PC rock-sheds. *International Journal of Impact Engineering*, 27(9), 969–985.
- [19] D.H. Vergara, M.A. Ríos, and L.S. Burgoa. (2011). False tunnels as prevention measures against impact from rock falling on mountainous roads. *Rock Mechanics: Achievements and Ambitions*, 937–940.
- [20] P. Zhao, L. Xie, B. He, Y. Zhang. (2018). Experimental study of rock-sheds constructed with PE fibres and composite cushion againsts rockfall impacts. *Engineering Structures*, 177, 175-189.
- [21] Z.X. Yu, L. Zhao, L.P. Guo, Y.P. Liu, C. Yang, S.C. Zhao. (2019). Full-Scale Impact Test and Numerical Simulation of a New-Type Resilient Rock-Shed Flexible Buffer Structure. *Shock and Vibration*, 2019.
- [22] B.-T. Phung, V.A. Lai, V.-Q. Nguyen. (2021). Giải pháp kết cấu hầm bảo vệ ở các tuyến đường vùng núi có nguy cơ cao sạt lở và đá rơi. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 15 (7V).
- [23] S. Q. Shi, M. Wang, X. Q. Peng, and Y. K. Yang. (2013). A new-type flexible rock-shed under the impact of rock block: Initial experimental insights. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(12), 3329–3338.
- [24] Nagano Prefectural Road Route 45 [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nagano_Prefectural_Road_Route_45_\(Rock_shed\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nagano_Prefectural_Road_Route_45_(Rock_shed).JPG)
- [25] T. Vogel, V. Labiouse, and H. Masuya. (2009). Rockfall Protection as an Integral Task, *Structural Engineering International*, 19(3), 321-326.
- [26] Rain Rocks Rock Shed & Pitkins Curve Bridge <https://www.discover-central-california.com/rain-rocks-rock-shed/>
- [27] Rock shed - Niigata Prefectural Road Route 24 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rock_shed_-_Niigata_Prefectural_Road_Route_24.jpg
- [28] Landslide Protection in B.C. <https://www.canadianconsultingengineer.com/features/landslide-fell-cn-rail-line-steep-mountains-b-c-klohn-crippen-berger-asked-analyze-risks-potential-rock-falls-design-new-protective-structures/>
- [29] C. W. Lim and D. Plantier. (2020). An introduction on the increasing usage of precast concrete arch tunnel in Korea. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*, 62, 257–263.