

Phân tích số mức độ ổn định đường hầm đào qua phay, được gia cố bằng khoan phụt trước

Nguyễn Quang Phích^{1,*}, Nguyễn Văn Mạnh², Nguyễn Quang Minh²,
Bùi Văn Đức², Nguyễn Thành Luân³, Nguyễn Ngọc Huệ⁴

¹Trường Đại học Văn Lang

²Trường Đại học Mỏ - Địa chất

³Công ty Boley Geotechnik, Munich, CHLB Đức

⁴Trường Đại học Thủ Dầu Một

TÓM TẮT

Các sự cố sập hầm thường xảy ra khi đào hầm qua các phay (đứt gãy), các đới phá hủy, hoặc khối đá nứt nẻ. Khoan phụt trước khi đào để gia cố khối đá là một giải pháp được áp dụng rộng rãi trên thế giới. Tuy nhiên, để có thể có phương án khoan phụt thành công, cần tiến hành phân tích, đánh giá khả năng ổn định của khối đá sau khi đã khoan phụt, theo các phương án khác nhau do người thiết kế đề xuất. Công cụ mô phỏng số, đặc biệt là phương pháp phần tử rời rạc chú ý được các cấu trúc địa chất thực của khối đá, nên được sử dụng phục vụ phân tích ổn định của khối đá. Bài viết giới thiệu kết quả phân tích số mức độ ổn định khối đá đào qua phay được gia cố bằng khoan phụt trước một vùng của phay. Kết quả phân tích số, được triển khai cho hai phương án khoan phụt, cho thấy rõ hiệu quả của từng phương án. Từ đó cho thấy có thể áp dụng phân tích số để có được phương xử lý tùy theo điều kiện thực tế.

Từ khóa: đường hầm; phay; sập sạt lở; khoan phụt trước; phân tích ổn định

1. Đặt vấn đề

Sạt trượt đá, sập lở hay trượt lở đá đã xảy ra ở nhiều công trình ngầm ở nước ta trong quá trình thi công xây dựng (Q.P. Nguyễn 2014, 2015) và ngay cả khi tiến hành cải tạo hầm cũ (Đoàn Loan 2024; Nguyễn Hoàng 2024). Các biện pháp xử lý sau sự cố thường là củng cố gương đào, khoan phun lấp đầy và khoan phụt gia cố, neo chốt, phun bê tông (D.G. Nguyễn và nnk, 2014; Q.N. Phạm, 2014).

Để phòng, tránh sập lở trong khi thi công đào các đường hầm, nhằm đảm bảo an toàn lao động, hạn chế hoặc ngăn chặn thiệt hại, đã có nhiều giải pháp kỹ thuật xử lý trước khi đào được đề xuất và áp dụng. Các phương pháp đều dựa trên nguyên lý là gia cố vùng khối đá có khả năng sập lở; tạo vùng có khả năng chịu được áp lực, gây ra từ phần khối đá rời rạc trong đới phá hủy, đới long rời hay nứt nẻ, tạo các kết cấu chống trước khi đào. Một trong các phương pháp điển hình là khoan phun trước khi đào (pre-excavation grouting) qua vùng có phay, đới phá hủy, khối đá nứt nẻ để cải thiện các tính chất cơ học của khối đá, đủ khả năng chịu các tác động cơ học do quá trình tạo không gian ngầm gây ra (Орлов 1970, Knut F. Gashol 2003, BASF 2011, Norwegian Tunnelling Society 2014). Người thiết kế, thi công có thể lập các phương án khoan phụt trước, gia cố trước theo kinh nghiệm, theo các chỉ dẫn, hướng dẫn trong các tài liệu đó. Ngoài ra, cũng có nhiều công trình nghiên cứu đã được công bố, liên quan công tác khoan phụt trước, ví dụ như: xác định các tính chất cơ học của khối đá sau khi khoan phụt (Bin Liu và nnk 2020); nghiên cứu hiệu ứng khoan phụt đến khả năng chống trượt của khối đá nứt nẻ (Wang C. và nnk 2019); xây dựng mô hình vật liệu cho khối đá ở phạm vi vĩ mô và phạm vi trung bình (Liu, Y. và nnk 2023); Du, J và nnk. 2022, đã tiến hành nghiên cứu quy luật gia cố khối đá xung quanh một trạm ngầm bằng phương pháp giải tích [16]. Tuy nhiên, phân tích số để đánh giá mức độ ổn định của khối đá sau khi đào trong trường hợp hầm đào qua phay còn ít được chú ý.

Phương pháp phần tử rời rạc DEM (Discrete Element Method) với phần mềm UDEC (Universal Distinct Element Code) (Q.P. Nguyễn và nnk 2007), P.A. Cudall and R.D. Hart. 1992) là phương pháp số cho phép có thể mô phỏng khối đá với sự có mặt của các hệ khe nứt, đứt gãy khác nhau. Trong bài viết này giới thiệu một số kết quả sử dụng UDEC phân tích mức độ ổn định của khối đá đào qua phay, sau khi đã khoan phụt

* Tác giả liên hệ

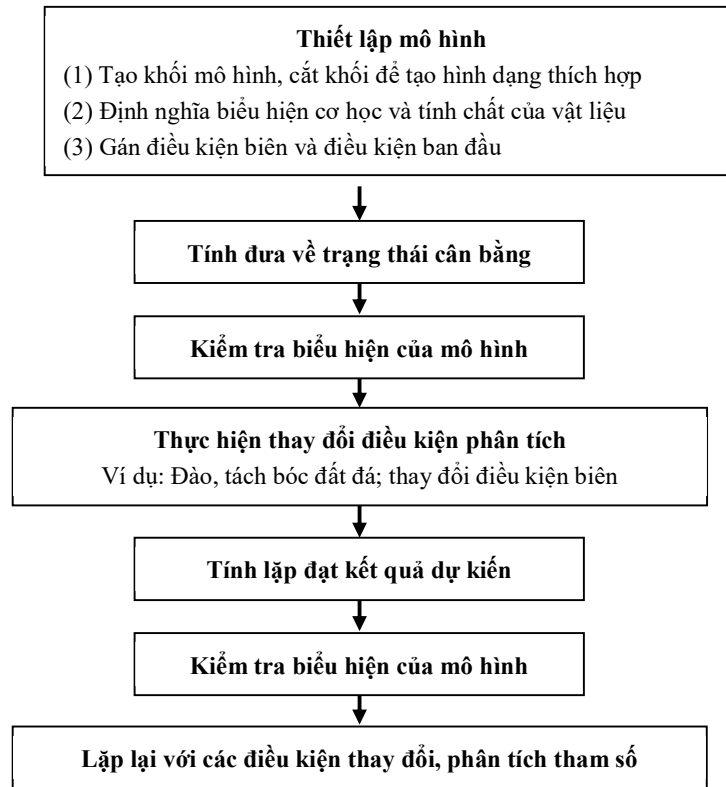
Email: nqphichhum@gmail.com

trước, nhằm giới thiệu một khả năng dự báo, lựa chọn giải pháp khoan phụt trước hợp lý, hạn chế sự cố khi đào hầm.

2. Phân tích số mức độ ổn định đường hầm khi khoan phụt trước

Tiến hành phân tích hay dự báo khả năng khối đá có ổn định hay không trong khi đào, sau khi đã khoan phụt trước, được thực hiện theo trình tự trên Hình 1. Các đặc điểm địa chất và các tham số cơ học cho vùng được khoan phụt được xác định từ các tài liệu khảo sát trước và sau khoan phụt.

Ví dụ sau đây được thực hiện cho trường hợp khối đá nứt nẻ, cắt qua một phay. Các đặc điểm địa chất và các tham số cơ học đặt trung cho các vùng được liệt kê trong Bảng 1.



Hình 1. Trình tự mô phỏng số bằng UDEC

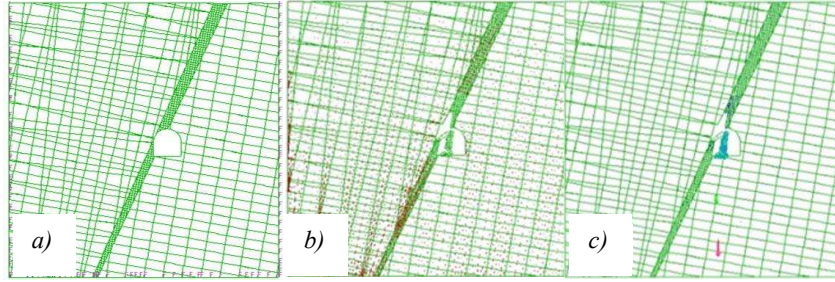
Bảng 1. Các tham số hình học và cơ học của các hệ khe nứt

Tham số	Vùng trái	Đứt gãy/phay	Vùng phải
Góc cắm (độ)	$-10^0 \pm 5^0$ và $80^0 \pm 5^0$	-10^0 và 80^0	-10^0 và 80^0
Khoảng cách khe nứt (m)	1,5 và 2,5	0,5 và 0,5	2,0 và 4,0
Khối lượng thể tích (g/cm ³)	2,5	2,4	2,65
Mô đun nén thể tích K (GPa)	16,667	0,116	16,667
Mô đun trượt G (GPa)	10	0,111	10
Góc ma sát trong (độ)	30	20	25
Lực dính đơn vị (MPa)	1,0	0	0,6
Hệ số độ cứng pháp tuyến k_n (GPa/m)	2,0	$5 \cdot 10^{-2}$	2,2
Hệ số độ cứng tiếp tuyến k_s (GPa/m)	1,0	$4 \cdot 10^{-2}$	1,5
Góc ma sát trên mặt khe nứt (độ)	40	20	25

Trên Hình 2 là một vài kết quả của bài toán phân tích ổn định khi chưa tiến hành khoan phụt gia cố, cụ thể là: sơ đồ bài toán a); các véc tơ ứng suất chính với vùng sập lở b) và các véc tơ dịch chuyển với vùng sập lở c) (Q.P. Nguyễn, 2023)

Giải pháp khoan phụt trước khi đào được lựa chọn để gia cố vùng có thể sập lở. Các thông đầu vào được đề xuất và thiết kế theo các tài liệu chuyên môn gồm: kích thước vùng khoan phụt; các thông số kỹ thuật như áp lực, chiều sâu, vật liệu khoan phụt, trình tự phụt vật liệu. Thông số về kết quả khoan phụt gia cố

khối đá có thể lựa chọn theo kinh nghiệm vốn có của đơn vị thi công, theo kết quả thí nghiệm, cũng như từ các tài liệu tham khảo cho điều kiện tương đương



Hình 2. Phân tích ổn định khối đá khi đào hầm đào qua đứt gãy (Q.P. Nguyễn, 2023)

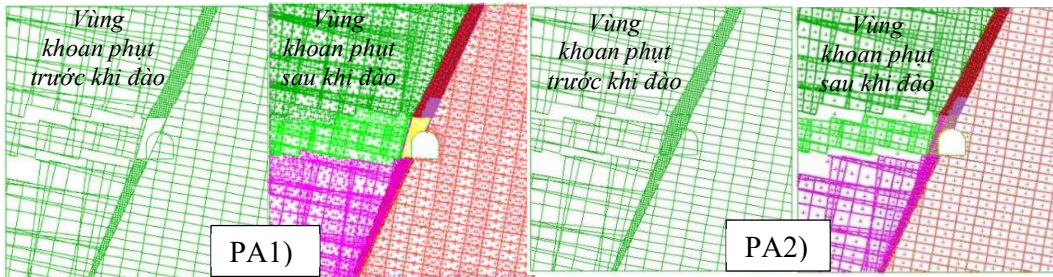
3. Kết quả mô phỏng số và thảo luận

Hai phương án về chất lượng khoan phụt được sử dụng để cho thấy khả năng phân tích mức độ ổn định khi áp dụng UDEC: a) Phương án 1 (PA1) coi vùng gia cố là đồng nhất; b) phương án 2 (PA2) vùng gia cố là vùng có các khe nứt được lấp đầy với các tham số cơ học của khe nứt được cải thiện. Các tham số cấu trúc địa chất và cơ học của vùng được khoan phụt trước theo hai phương án, thể hiện trong Bảng 2.

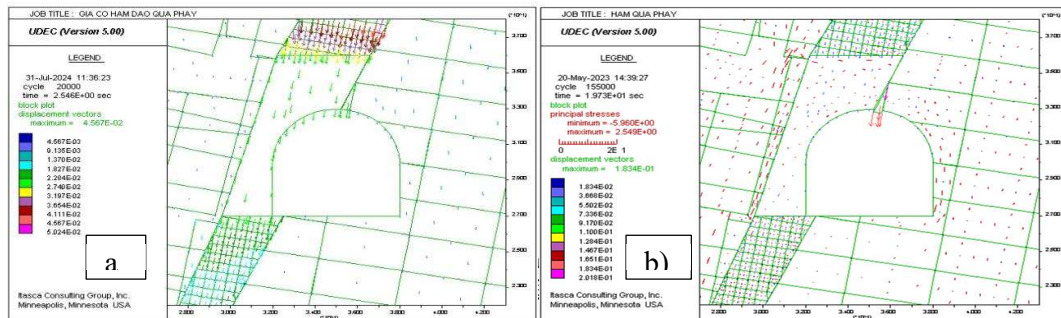
Bảng 2. Các tham số cơ học của vùng phay sau khoan phụt

Các tham số cơ học	PA1	PA2
Khối lượng thể tích (g/cm^3)	2,4	2,4
Mô đun nén thể tích K (GPa)	16,667	16,667
Mô đun trượt G (GPa)	10	10
Góc ma sát trong (độ)	30	30
Lực dính đơn vị (MPa)	1,0	1,0
Hệ số độ cứng pháp tuyến k_n (GPa/m)	-	2,0
Hệ số độ cứng tiếp tuyến k_s (GPa/m)	-	1,0
Góc ma sát trên mặt khe nứt (độ)	-	30

Trên Hình 3 minh họa sơ đồ mô phỏng số tương ứng cho hai phương án đã nêu. Hình 4 là kết quả phân tích cho PA1 ở vùng lân cận xung quanh đường hầm, bao gồm a) các véc tơ dịch chuyển và b) quy luật phân bố các ứng suất chính cùng với véc tơ dịch chuyển. Trên Hình 5 thể hiện các kết quả mô phỏng nhận được cho PA2.

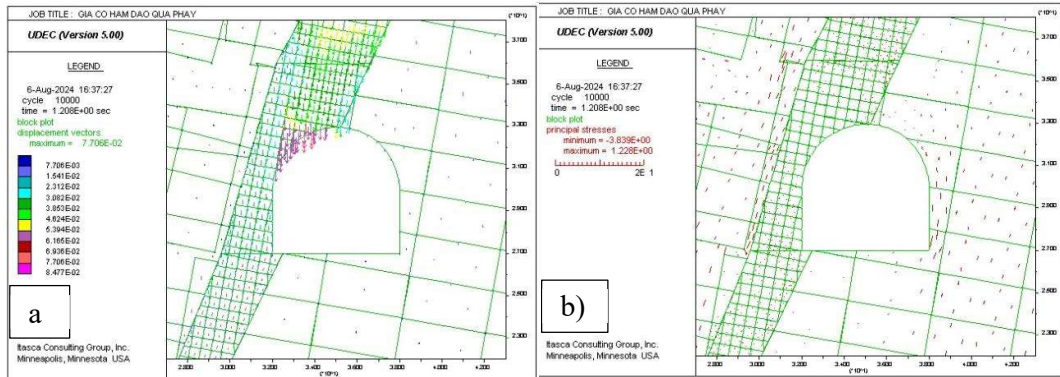


Hình 3. Sơ đồ bài toán gia cố bằng khoan phụt trước khi đào: a) PA 1; b) PA 2



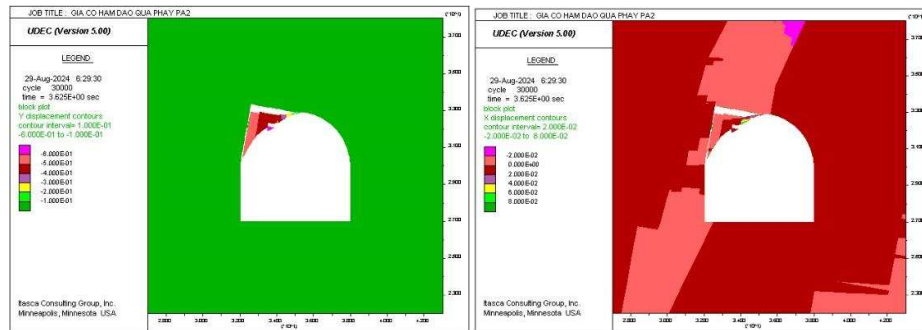
Hình 4. Biến đổi cơ học sau khi một vùng của phay được gia cố bằng khoan phụt PA1

nêm, nằm cạnh biên vùng gia cố và vùng khối đá tại vị trí nóc hầm có khả năng dịch chuyển mạnh xuống phía dưới, với véc tơ dịch chuyển lớn nhất là 1,65cm và như vậy chưa làm khối nêm tách, rơi vào khoảng trống.



Hình 5. Biến đổi cơ học sau khi một vùng của phay được gia cố bằng khoan phụt PA2

PA2 cho thấy: a) các véc tơ dịch chuyển trong vùng gia cố có giá trị lớn hơn so với trường hợp vùng gia cố là vùng đồng nhất, đạt giá trị lớn nhất bằng 8,5 cm, phân bố đều và không có hiện tượng dịch chuyển tập trung vào một khối nêm trên nóc hầm như trên Hình 4 và b) quy luật phân bố ứng suất được dàn đều trong các miền vây quanh vùng gia cố. Hình ảnh rõ nét về hiện tượng sập lở của một “tầng đá” cấu thành từ các khối nứt của phay sau khoan phụt thể hiện rất rõ nét trên Hình 6, nghĩa là sau khi khoan phụt, mất ổn định không còn ở dạng sập lở từng khối nứt như trên Hình 2.



Hình 6. Dịch chuyển theo phương y (bên trái) và theo phương x (bên phải) của khối đá xung quanh đường hầm sau khi đã khoan phụt theo PA2

Như vậy, ở PA 2, kết quả dự báo có thể vẫn hình thành vùng sập lở phía nóc hầm. Điều đó có nghĩa là với các thông số đầu vào (tương ứng với chất lượng khoan phụt) thực sự đảm bảo ổn định cho khối đá phía nóc nếu thi công đào. Để đảm bảo khối đá ổn định cần mở rộng vùng khoan phụt thêm lên phía nóc và vào vùng vòm của đường hầm. Sau đó tiến hành mô phỏng với các tham số cơ học, hình học tương ứng, cho đến khi có được kết quả khả quan. Điều đó cũng có nghĩa là bằng cách này sẽ xác định được kích thước vùng cần gia cố phù hợp.

4. Kết luận và kiến nghị

Từ các kết quả nhận được có thể rút ra các kết luận sau:

Phân tích số bằng UDEC cho phép chú ý được các đặc điểm cấu trúc và cơ học phức tạp và đa dạng của khối đá; cho phép đánh giá định tính và định lượng về mức độ ổn định của khối đá, trước và sau khi đào, trước và sau khi khoan phụt. Như vậy, có thể phân tích số các phương án gia cố khác nhau, để từ đó chọn được phương án khả dĩ, phù hợp với công nghệ thi công trong điều kiện cụ thể.

Cũng từ các kết quả đã nhận được ở đây có vài kiến nghị sau cho việc áp dụng trong thực tế:

1) Đến nay, công cụ mô phỏng số thực sự hữu ích trong việc dự báo tại biên địa chất, phân tích mức độ ổn định của khối đá vây quanh đường hầm, do vậy cần có quy định bắt buộc áp dụng trong giai đoạn thiết kế. Và trong giải trình thiết kế cần thể hiện đầy đủ các kết quả tính toán, mô phỏng số.

2) Khi tiến hành cải tạo các đường hầm cũ, cần thiết phải triển khai khảo sát, thăm dò thận trọng trạng thái khối đá xung quanh hầm, đặc biệt là tại các hầm được thi công đã lâu. Xung quanh các hầm cũ có thể tồn tại các vùng tơi ròi, do trước đây chưa được khoan phụt lấp đầy, thậm chí còn có các kết cấu gỗ đã sử dụng để chèn khoảng trống sập lở cũ, gây dịch chuyển lâu năm trong khối đá về phía không gian hầm. Xác định được vùng cần khoan phụt, hoặc cắm neo gia cố, sau đó mới có thể tiến hành cải tạo, tránh tình trạng sập sạt lở như ở các hầm Bãi Gió và Chí Thạnh. Tuy nhiên, để đảm bảo không có sự cố xảy ra, cần thiết phải thực hiện các tính toán, đặc biệt là sử dụng các phương pháp số để phân tích, dự báo khả năng có còn xảy ra sập, sạt lở có hay không theo phương án gia cố. Chỉ có như vậy mới có thể có được giải pháp an toàn khi cải tạo.

Tài liệu tham khảo

- BASF. *Pre-Excavation Grouting in Tunneling*. Copyright © BASF Construction Chemicals Europe Ltd., 2011 4th edition, December 2011.
- Bin Liu, Haomin Sang, Zhiqiang Wang, and Yongshui Kang, 2020. Experimental Study on the Mechanical Properties of Rock Fracture after Grouting Reinforcement. *Energies* 2020, 13, 4814; doi:10.3390/en13184814.
- Cudall, P.A., and R.D. Hart, 1992. *Numerical Modeling of Discontinua*. Engr. Comp. (2), 1992. Tr. 101-113.
- Du, J. et al, 2022. Analytical Solution of the Grouting Reinforcement Response of a Circular Cavern in Deeply Buried Fractured Surrounding Rock under a Nonuniform Stress Field. *ACS Omega* 2022, 7, 28016–2802. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01896>
- Đoàn Loan, 2024. Hầm đường sắt Bãi Gió sập lở do đá phong hóa lâu năm. <https://vnexpress.net/ham-duong-sat-bai-gio-sat-lo-do-da-phong-hoa-lau-nam-4734362.html>
- Knut F. Garshol, 2003. *Pre-Excavation Grouting in Rock Tunneling*. Copyright MBT International Underground Construction Group, Division of MBT (Switzerland) Ltd., 2003.
- Liu, Y.; Wang, Y.; Zhong, Z.; Li, Q.; Zuo, Y., 2023. Constitutive Model for Grouted Rock Mass by Macro-Meso Damage. *Materials* 2023, 16, 4859. <https://doi.org/10.3390/ma16134859>
- Nguyễn Duy Giang và nnk, 2014. Nghiên cứu, đề xuất kết cấu chống gia cố hợp lý khi thi công đường hầm ô tô Nam Cường trên tuyến đường cao tốc Nội Bài-Lào Cai. *Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học lần thứ 21, Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội*, 14/11/2014. Tr 45-52.
- Nguyễn Hoàng, 2024. Sập lở hầm đường sắt Chí Thạnh khi đang sửa chữa, cải tạo. <https://tuoitre.vn/sat-lo-ham-duong-sat-chi-thanh-khi-dang-sua-chua-cai-tao-20240521120155889.htm>
- Nguyễn Quang Phích và nnk. Sử dụng UDEC dự báo sập lở khi đào hầm qua phay. *TCXD* 062023.Tr. 30-33.
- Quang Phich Nguyen et al, 2023. Prediction of collapses when tunneling through faults. *VIETGEO2023 trang 479-486*.
- Nguyễn Quang Phích và nnk, 2015. Báo cáo tổng hợp kết quả khoa học công nghệ đề tài “Nghiên cứu ứng dụng và phát triển mô hình phân tích, dự báo tai biến địa chất-kỹ thuật đối với công trình ngầm, công trình khai thác mỏ ở Việt Nam”, mã số: *ĐT.NCCB-ĐHUD.2011-G/13*. Hà Nội - 2015.
- Nguyễn Quang Phích và nnk, 2014. Tai biến địa chất - kỹ thuật trong xây dựng công trình ngầm và khai thác mỏ. *Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học lần thứ 21, Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội*, 14/11/2014. Tr. 191-199
- Nguyễn Quang Phích, Nguyễn Văn Mạnh, Đỗ Ngọc Anh, 2007. *Phương pháp số-Chương trình Plaxis 3D và UDEC*. Nhà xuất bản Xây dựng. Hà Nội 2007.
- Norwegian Tunnelling Society, 2014. *Publication No. 23. 2014*
- Phạm Quang Nam và nnk, 2014. Nghiên cứu và đề xuất các biện pháp thi công hợp lý cho các đường lò tại khu vực Quảng Ninh có tiết diện 6-8 m² khi đào qua vùng đất đá yếu để đẩy nhanh tốc độ thi công các đường lò này. *Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học lần thứ 21, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội*, 14/11/2014. Tr 152-159.
- Орлов, В. В., А. К. Пономаренко, И. А. Филатов. 1970. Тампонаж в капитальных выработках. Издательство «ТЕХНИКА» КИЕВ -1970.
- Wang C, Li X, Xiong Z, Wang C, Su C, Zhang Y, 2019. Experimental study on the effect of grouting reinforcement on the shear strength of a fractured rock mass. *PLoS ONE* 14(8): e0220643. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220643>

ABSTRACT

Numerical analysis of stability of tunnels excavated through fault, reinforced by pre-excavation grouting

Quang Phich Nguyen¹, Van Manh Nguyen², Quang Minh Nguyen²,
Van Duc Bui², Thanh Luan Nguyen³, Ngoc Hue Nguyen⁴

¹*Van Lang University, Ho Chi Minh City,*

²*Hanoi University of Mining and Geology*

³*Boley Geotechnik, Munich, Germany,* ⁴*Thu Dau Mot University*

Tunnel collapses often occur when tunneling through faults, failure zones, or fractured rock masses. Pre-excavation grouting to reinforce the rock mass is a widely used solution in the world. However, in order to have a successful grouting plan, it is necessary to analyze and evaluate the stability of the rock mass after grouting, according to different plans proposed by the designer. Numerical simulation tools, especially the discrete element method that takes into account the real geological structures of the rock mass, should be used to analyze the stability of the rock mass. The article presents the numerical analysis results of the stability of a tunnel excavated through a fault, reinforced by pre-excavation grouting a section of the fault. The results of numerical analysis, implemented for two grouting schemes, clearly show the effectiveness of each scheme. The analysis results show that numerical analysis can be applied to obtain a treatment scheme depending on the actual conditions.

Keywords: tunnel; fault; collapse; pre-excavation grouting; stability analysis