

Nghiên cứu ảnh hưởng của các điều kiện biên và kích thước vùng nghiên cứu đến kết quả dự báo và phân tích tai biến địa chất trong xây dựng công trình ngầm khi sử dụng phương pháp số

Nguyễn Quang Phích^{1*}, Nguyễn Huy Vững¹, Ngô Doãn Hào², Nguyễn Trọng Tâm³

¹Trường Đại học Bình Dương

²Trường Đại học Mở - Địa chất

³Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh

Ngày nhận bài 10/8/2018; ngày chuyển phân biện 13/8/2018; ngày nhận phân biện 4/10/2018; ngày chấp nhận đăng 9/10/2018

Tóm tắt:

Trong xây dựng các công trình ngầm thường gặp các khối đất đá có cấu trúc phức tạp, như cấu trúc phân lớp với các lớp đất đá có các thông số hình học và cơ học khác nhau. Các sự cố phá hủy từng xảy ra trong khối đất đá, do các đặc điểm địa chất phức tạp (tai biến địa chất) rất đa dạng, gây thiệt hại nhiều về con người và cơ sở hạ tầng. Nhiều phương pháp đã được áp dụng để nghiên cứu dự báo các dạng và quy mô của tai biến địa chất, trong đó các phương pháp số góp phần đắc lực. Tuy nhiên, vì miền khảo sát là không đồng nhất, nên trong thực tế vẫn còn các tai biến địa chất chưa dự báo được hết, nếu không cẩn trọng khi xây dựng mô hình tính, như việc lựa chọn kích thước miền nghiên cứu, điều kiện biên. Bài viết giới thiệu một số kết quả nghiên cứu mô phỏng sử dụng phần mềm FLAC 2D, chú ý đến ảnh hưởng của sự phân bố các lớp đá, kích thước miền nghiên cứu, ảnh hưởng của việc lựa chọn, thay thế điều kiện biên và ảnh hưởng của khoảng cách giữa đường hầm và mặt ranh giới giữa khối đá rắn cứng với lớp phủ. Kết quả nghiên cứu cho thấy, các quy luật biến đổi cơ học phức tạp và đa dạng, khác xa so với các lời giải giải tích sử dụng các mô hình đơn giản. Đồng thời kết quả nhận được cũng cho thấy, khi giải quyết một vấn đề thực tế, với khối đất đá có cấu trúc phức tạp, cần thiết phải rất linh hoạt và thận trọng trong việc xây dựng bài toán với các dữ liệu thích hợp.

Từ khóa: điều kiện biên, FLAC 2D, khối đá phân lớp, kích thước vùng nghiên cứu, tai biến địa chất, xây dựng công trình ngầm.

Chỉ số phân loại: 2.1

Mở đầu

Trong xây dựng các công trình ngầm thường gặp các khối đất đá có cấu trúc phức tạp, ví dụ tính phân lớp với các lớp đất/đá có các thông số hình học và cơ học khác nhau. Nghiên cứu các quá trình biến đổi cơ học trong khối đất đá xung quanh các khoảng trống ngầm, các bờ dốc thường sử dụng phương pháp lý thuyết, bao gồm phương pháp giải tích và phương pháp số [1, 2]. Các lời giải giải tích thường nhận được ở dạng “nghiêm kín” cho các bài toán với sơ đồ giải và mô hình cơ học đơn giản về khối đất đá. Để có thể chú ý được các yếu tố về các biểu hiện cơ học, các đặc điểm địa chất, các điều kiện biên phức tạp, nhiều mô hình giải tích [3, 4] và phương pháp số đã được phát triển và áp dụng, là các phương pháp giải gần đúng hệ các phương trình cơ học bằng các phương pháp sai phân hữu hạn, phần tử hữu hạn hoặc phương pháp không lưới [5-7].

Tuy nhiên, việc giải các bài toán địa cơ học bằng phương pháp số thường gắn liền với một miền khảo sát hữu hạn và các điều kiện biên được lựa chọn tương xứng, nhưng ít nhiều mang tính chủ quan, không có phân tích về việc chọn kích thước miền nghiên cứu cũng như điều kiện biên tương ứng, ví dụ như trong các công trình [8-11]. Để làm rõ tác động của các yếu tố nêu trên đến kết quả nghiên cứu, mô phỏng, cần thiết phải triển khai xây dựng và phân tích mô hình với các điều kiện khác nhau. Một số kết quả nghiên cứu bước đầu cho thấy rõ ảnh hưởng của các yếu tố hình học và điều kiện biên cũng như biến động của chúng đến kết quả phân tích, dự báo tai biến địa chất rất rõ nét. Đồng thời các kết quả này cũng là gợi ý cho người sử dụng phương pháp số về các vấn đề cần đặc biệt chú ý khi lập mô hình tính trong trường hợp khối đất đá không đồng nhất, cũng như điều kiện biên phức tạp.

*Tác giả liên hệ: Email: nqphichhung@gmail.com

Influences of selected boundary conditions and size of the study area on the forecast and analysis results of geological hazards in underground construction when using numerical methods

Quang Phich Nguyen^{1*}, Huy Vung Nguyen¹,
Doan Hao Ngo², Trong Tam Nguyen³

¹Binh Duong University

²Hanoi University of Mining and Geology

³Ho Chi Minh City University of Transport

Received 10 August 2018; accepted 9 October 2018

Abstract:

In the construction of underground structures, we often face complex rock masses, such as stratigraphy with layers of rock and soil of different geometrical and mechanical parameters. The geological variations are often diverse and complex and cause huge losses of human and infrastructure during the construction works. In order to reasonably predict the types and sizes of geo-risks, attention should be paid to the use of numerical methods. Since the rock mass to be examined is heterogeneous, rational schemes and sequences must be developed so that the results best reflect the realities possible. The article presents some simulation results using the FLAC 2D software, taking into account the influence of the distribution of the rock strata, the size of the simulated area, the selection of the boundary conditions, and the distance from the tunnel to the boundary between the solid rock mass and the coat. The results showed that the geomechanical processes are complex and diverse, much more different than the analytical solutions with simple models. At the same time, it also required to be flexible and careful for using the appropriate data when solving a practical problem.

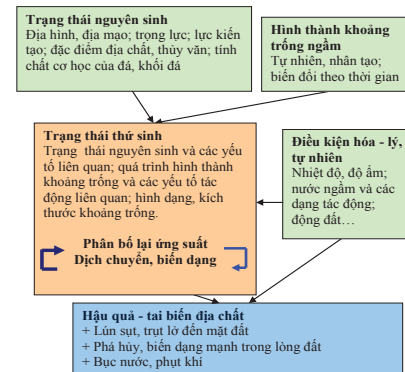
Keywords: boundary conditions, FLAC 2D, geological hazards, layered rock mass, size of the study area, underground construction.

Classification number: 2.1

Phương pháp và nội dung nghiên cứu

Cơ sở lý thuyết

Bài toán nghiên cứu, phân tích tai biến địa chất khi xây dựng các công trình ngầm và khai thác mỏ được xây dựng là bài toán cơ học, chú ý đến các đặc điểm địa chất và các yếu tố tác động chủ yếu, được thực hiện theo sơ đồ tổng quát như trên hình 1.



Hình 1. Sơ đồ phân tích dự báo tai biến địa chất - kỹ thuật trong xây dựng công trình ngầm và khai thác mỏ hầm lò.

Mô hình dự báo và nội dung nghiên cứu

Để nghiên cứu các quá trình biến đổi cơ học trong khối đất đá phân lớp xung quanh công trình ngầm, chúng tôi đã xây dựng các mô hình dự báo bằng phần mềm FLAC 2D. Nghiên cứu mô phỏng được thực hiện có chú ý đến các yếu tố gồm: sự có mặt của các lớp đá và trật tự phân bố của chúng trong khối đá; kích thước của miền nghiên cứu, do bài toán không có tính đối xứng; điều kiện biên, liên quan với việc thay thế các lớp đá phía trên, khi công trình nằm sâu; khoảng cách giữa công trình ngầm trong khối đá rắn cứng với lớp phủ là khối đá bờ rời.

Kết quả và thảo luận

Ảnh hưởng của sự phân bố các lớp đá trong mô hình

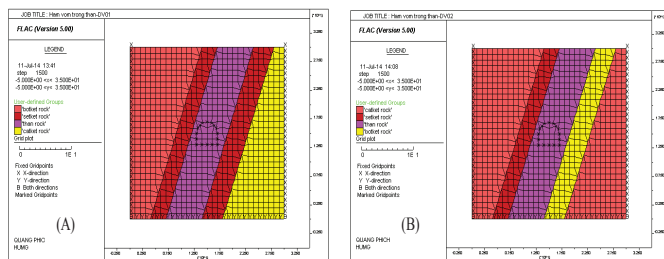
Trong khối đá trầm tích thường xuất hiện các lớp đá khác nhau, với trật tự phân bố đa dạng. Các lời giải giải tích thường cho các quy luật tổng quát với giả thiết khối đá là đồng nhất, đẳng hướng. Một số lời giải cho môi trường đồng nhất dị hướng cũng đã được chú ý, song do tính phức tạp nên còn chưa được áp dụng nhiều vào thực tế. Trong khi đó, bằng các phương pháp số, như phần mềm FLAC 2D đã có thể giải được các bài toán biên, chú ý được tính phân lớp của khối đá.

Mô hình khảo sát được xây dựng cho trường hợp khối đá, bao gồm các lớp đá cát kết, bột kết, sét kết và than nằm dốc nghiêng với các tham số cơ học như trong bảng 1. Kết quả nghiên cứu sẽ cho thấy ảnh hưởng của trật tự phân bố các lớp đến các hiện tượng biến đổi cơ học.

Bảng 1. Dữ liệu về tính chất cơ học của các lớp đá trong khối đá phân lớp.

Loại đá	Mật độ ρ (g/cm ³)	Lực dính kết C (MPa)	Góc ma sát trong ϕ (độ)	Mô đun nén thể tích K (GPa)	Mô đun trượt G (GPa)
Cát kết	2,61	1,00	40	11,60	8,70
Than	1,30	0,01	35	2,60	1,30
Bột kết	2,50	1,00	25	10,00	7,00
Sét kết	2,60	0,10	30	9,60	2,70

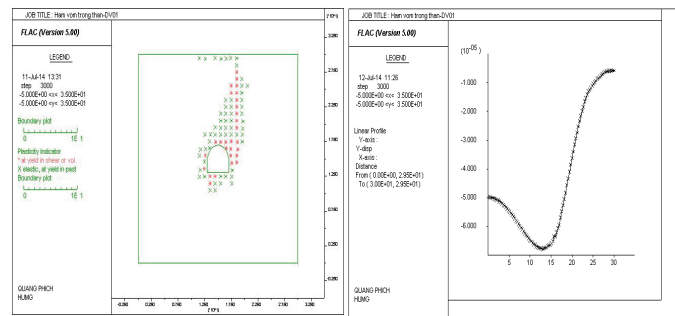
Hai chương trình tính được lập với trật tự các lớp trong khối đá khác nhau, cụ thể là: trường hợp 1, từ trên xuống (trái qua phải) là các lớp bột kết - sét kết - than - sét kết - cát kết; trường hợp 2, từ trên xuống (trái qua phải) là các lớp cát kết - sét kết - than - bột kết - cát kết. Đường hầm có dạng tường thẳng vòm bán nguyệt (cao 2 m và rộng 2 m), được đào trong than, đỉnh lò cách bề mặt trên của các lớp đá cứng là 12 m. Miền nghiên cứu có kích thước 30x30 m, đủ lớn so với kích thước của công trình ngầm. Các mô hình phân tích được thể hiện trên hình 2.



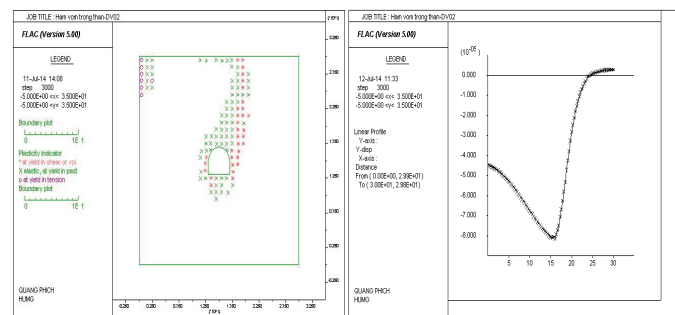
Hình 2. Hai mô hình mô phỏng khối đá phân lớp với trật tự các lớp đá khác nhau: (A) bột kết, sét kết, than, sét kết, cát kết; (B) cát kết, sét kết, than, bột kết, cát kết.

Kết quả phân tích, mô phỏng cho các thông tin đầy đủ về các quy luật biến đổi cơ học xảy ra trong khối đá xung quanh đường hầm, bao gồm các quy luật về phân bố ứng suất, dịch chuyển, biến dạng và sự hình thành các vùng phá hủy. Trên các hình 3 và 4 là các kết quả minh họa vùng phá hủy (vùng với các gạch chéo) và biểu đồ lún trên mặt khối đá cứng phía trên đường hầm. Biểu đồ lún biểu thị mối quan hệ giữa độ lún kể từ mặt đất, có giá trị âm (-) và tọa độ theo phương ngang của miền nghiên cứu, kể từ trái qua phải, với đơn vị đo bằng mét (m).

Các kết quả nhận được cho thấy, vùng phá hủy dịch chuyển trong khối đá xung quanh các đường hầm không có tính đối xứng. Vùng phá hủy đều phát triển chủ yếu trong lớp than và lan cho đến bề mặt của khối đá rắn cứng. So sánh cho thấy ở trường hợp 2 vùng phá hủy phát triển rộng hơn. Độ lún (đo bằng m) trên bề mặt trong trường hợp 2 cũng có biên độ lớn hơn, mặc dù quy luật định tính là như nhau.



Hình 3. Vùng phá hủy xung quanh đường lò và biểu đồ đường cong lún trên mặt đất, khi trật tự lớp là: bột kết, sét kết, than, sét kết, cát kết.



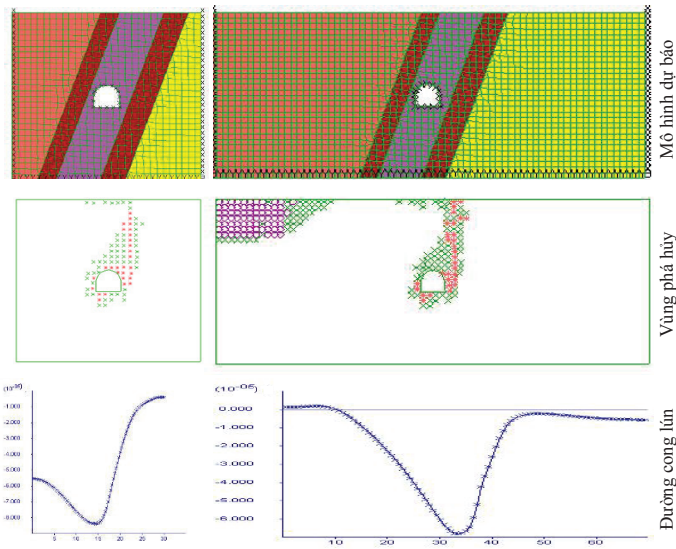
Hình 4. Vùng phá hủy xung quanh đường hầm và biểu đồ lún trên mặt đất, khi trật tự lớp là: cát kết, sét kết, than, bột kết, cát kết.

Từ các kết quả nhận được có thể rút ra các nhận xét sau: khi khối đá có cấu trúc phân lớp, mọi quy luật về phân bố ứng suất, dịch chuyển và sự hình thành các vùng phá hủy phụ thuộc vào sự phân bố của các lớp trong khối đá, vì vậy cần thận trọng khi áp dụng các quy luật nhận được bằng lời giải giải tích đơn giản. Qua hai mô hình khảo sát nhận thấy: ở mô hình thứ 2, các quá trình dịch chuyển, biến dạng đạt các giá trị tương đối lớn hơn, mặt dù ở mô hình 2 có cả hai lớp cát kết cứng vững trong đá trụ và đá vách; sự biến động về vị trí của các lớp rõ ràng ảnh hưởng đến các quá trình phân bố ứng suất, dịch chuyển trong khối đá; vùng phá hủy trong trường hợp sau phát triển mạnh hơn.

Ảnh hưởng của kích thước miền nghiên cứu

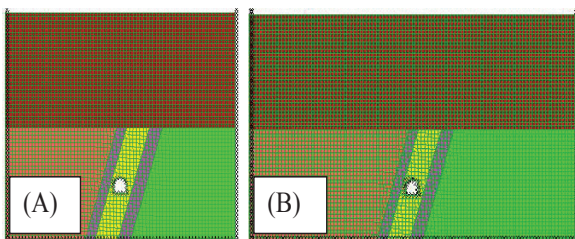
Xuất phát từ kết quả nhận được về đường cong lún trên hình 5 và 6 cho thấy cần thiết phải tăng kích thước ngang của miền nghiên cứu. Mô hình dự báo được khảo sát có cùng các điều kiện địa chất, địa cơ học như ở mô hình 1 (bột kết, sét kết, than, sét kết, cát kết) nhưng với miền nghiên cứu được nói rộng, cụ thể có kích thước 70x30 m (rộngxcao). Các kết quả nhận được, so sánh với trường hợp miền nghiên cứu có kích thước 30x30m, thể hiện trên hình 5.

Như vậy, khi kích thước vùng nghiên cứu được chọn khá nhỏ, sẽ không thể phân tích, dự báo được hết các vùng lún sụt và phá hủy trong khối đá.



Hình 5. Mô hình và kết quả dự báo phá hủy, lún sụt với kích thước miền nghiên cứu 30x30 m (bên trái) và 70x30 m (bên phải).

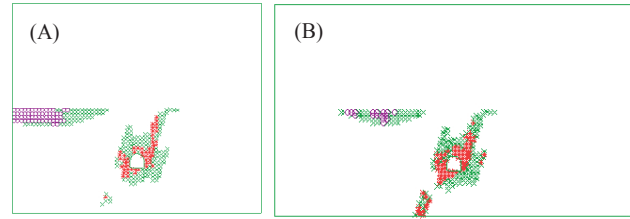
Trong thực tế, phía trên khối đá rắn cứng có thể tồn tại lớp đất đá phủ, gây thêm áp lực lên bề mặt khối đá rắn cứng. Để thấy được ảnh hưởng của lớp phủ, hai mô hình dự báo được khảo sát có lớp phủ dày 30 m như trên hình 6, với kích thước của miền nghiên cứu là (A) 70x60 m và (B) 100x60 m. Lớp phủ có các tham số vật lý, cơ học là mật độ 2.000 kg/m^3 ; mô đun nén thể tích $K=33.333.10^6 \text{ Pa}$; mô đun trượt $G=20.10^6 \text{ Pa}$; góc ma sát trong $\varphi=30^\circ$ và lực dính kết $c=50.10^3 \text{ Pa}$.



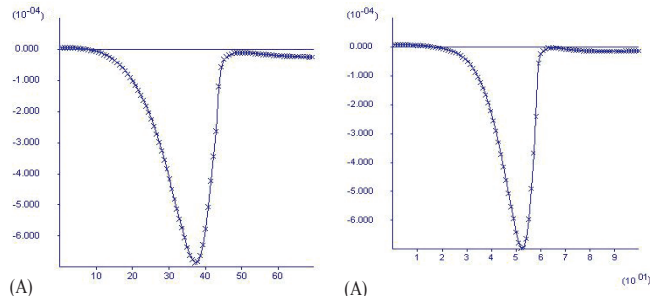
Hình 6. Mô hình đường hầm trong khối đá phân lớp có lớp phủ dày 30 m.

Kết quả mô phỏng cho thấy, quy mô các vùng phá hủy trên hình 7 và các đường cong lún sụt trên biên ranh giới giữa vùng đá rắn cứng và lớp phủ (A-phía trên) và trên mặt đất (B-phía dưới) trên hình 8.

Kết quả nhận được cho thấy rằng khi tăng chiều rộng miền nghiên cứu đến 100 m, mới nhận được thông tin về toàn bộ vùng phá hủy gần ranh giới giữa lớp đá rắn cứng và lớp phủ; đường cong lún sụt nhận được trên mặt đất cũng gần đầy đủ hơn.

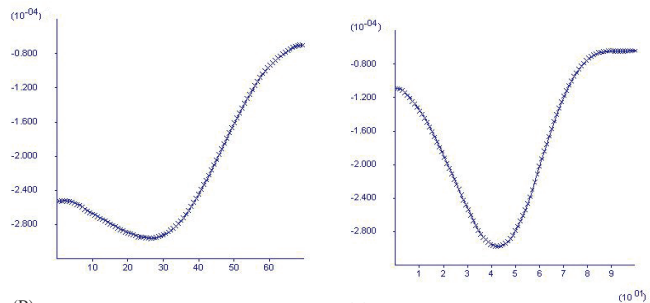


Hình 7. Vùng phá hủy trong khối đá, tương ứng với miền nghiên cứu rộng (A) 70 m và (B) 100 m.



(A) Biểu đồ lún trên mặt ranh giới vùng đá rắn cứng phân lớp với tầng phủ khi kích thước vùng khảo sát là 70x60 m.

(A) Biểu đồ lún trên mặt ranh giới vùng đá rắn cứng phân lớp với tầng phủ khi kích thước vùng khảo sát là 100x60 m.

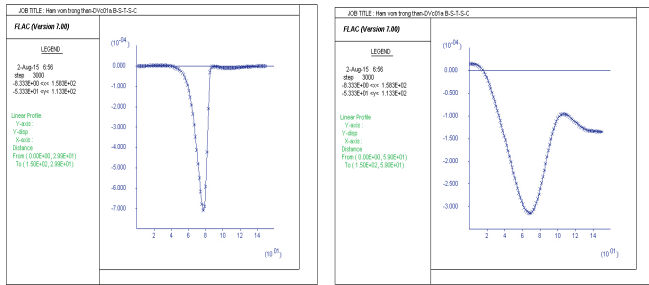


(B) Biểu đồ lún trên mặt đất khi kích thước vùng khảo sát là 70x60 m.

(B) Biểu đồ lún trên mặt đất khi kích thước vùng khảo sát là 100x60 m.

Hình 8. Hình dạng các biểu đồ lún sụt: (A) trên mặt ranh giới giữa khối đá rắn cứng với tầng phủ và (B) trên mặt đất với kích thước miền nghiên cứu khác nhau (các kích thước đo bằng m).

Tiếp tục mở rộng miền khảo sát đến kích thước 150x60 m nhận được các biểu đồ lún sụt như trên hình 9. Kết quả cho thấy, đường cong lún sụt trên ranh giới giữa khối đá rắn cứng và tầng phủ hầu như không có sự khác biệt so với trường hợp vùng khảo sát có kích thước là 100x60, tuy nhiên có được đường cong lún sụt trên mặt đất đầy đủ hơn. Hình 9 cho thấy, trong khi phía bên trái có vùng bị đẩy trôi tương đối, thì phía bên phải lún sụt xảy ra mạnh hơn. Nguyên nhân chính trong trường hợp này là có lớp bột kết mềm hơn nằm phía bên phải. Đương nhiên, khi cả hai phía trái và phải lại có các lớp đá rắn và mềm xen kẽ, chắc chắn lún sụt xảy ra sẽ còn phức tạp hơn.



Lún sụt trên mặt ranh giới khối đá rắn cứng và tầng phủ. Lún sụt trên mặt đất.

Hình 9. Biểu đồ lún sụt khi kích thước miền khảo sát là 150x60 m.

Ảnh hưởng của việc lựa chọn, thay thế điều kiện biên

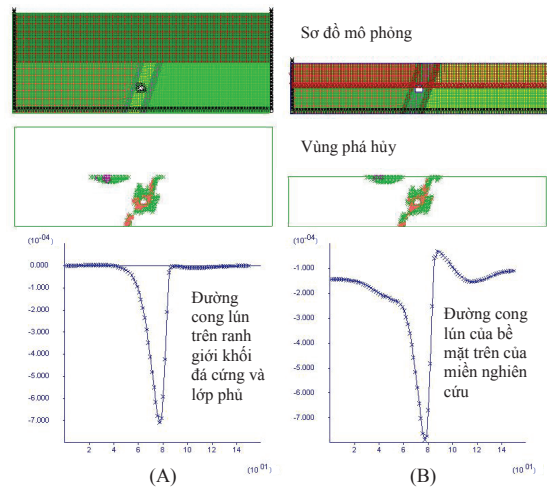
Thông thường, khi công trình ngầm nằm sâu, để nghiên cứu các quy luật biến đổi cơ học trong khối đá xung quanh khoảng trống ngầm, cũng như phân tích tại biến địa chất - kỹ thuật, có thể chỉ khảo sát một vùng với kích thước “đủ lớn”, đồng thời thay thế lớp đất đá phía trên bằng giá trị áp lực tác dụng tại mặt biên trên của miền nghiên cứu.

Để đánh giá ảnh hưởng của cách xây dựng mô hình với các điều kiện biên được chọn, mô hình được lập để khảo sát khối đá rắn cứng phân lớp, có lớp đất đá phủ dày 30 m, theo hai sơ đồ: khảo sát toàn bộ khối đá với kích thước vùng khảo sát 150x60 m, nghĩa là có cả lớp hay tầng phủ; khảo sát vùng khối đá đến biên ranh giới giữa khối đá cứng phân lớp và tầng phủ, tầng phủ với mật độ bằng 2.10^3 kg/m^3 được thay thế bằng áp lực thẳng đứng, giá trị bằng 0,6 MPa.

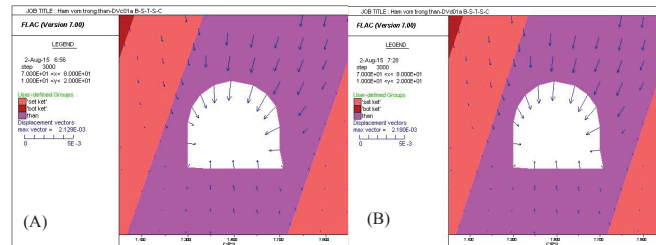
Sơ đồ tính và các kết quả so sánh vùng phá hủy và đường cong lún sụt trên ranh giới giữa lớp đá rắn cứng và lớp phủ được thể hiện trên hình 10.

Có thể nhận thấy, hai mô hình cho kết quả về vùng phá hủy hay biến dạng dẻo trong khối đá có thể xem là gần như nhau, trong khi đó, độ lún trên biên trên của vùng khối đá phân lớp theo sơ đồ có cả tầng phủ cho giá trị nhỏ hơn và phân bố trên mặt đều hơn so với trường hợp thay thế lớp phủ bằng áp lực ở biên trên. Điều này có thể giải thích là cách tính ở mô hình sau mang tính cường bức về tải trọng (cơ chế cứng), còn ở mô hình có cả vùng đất phủ thì trong quá trình lún sụt, cũng sẽ có sự phân bố lại ứng suất ngay trong tầng phủ và trên biên ranh giới giữa khối đá rắn cứng và lớp phủ, tạo nên phân bố biến dạng đều hơn.

Dịch chuyển lệch trên biên đường hầm (đường lò) có quy luật định tính như nhau, nhưng độ dịch chuyển tuyệt đối lớn nhất u_{max} có chênh lệch nhất định, cụ thể ở mô hình có cả lớp phủ $u_{max} = 2,12.10^{-3} \text{ m}$ và ở mô hình thay thế bằng áp lực theo phương thẳng đứng có $u_{max} = 2,180.10^{-3} \text{ m}$, thể hiện trên hình 11. Ngoài ra, kết quả nhận được cũng cho thấy ảnh hưởng rất rõ của tính phân lớp và góc cắm của lớp đến dịch chuyển lệch trên biên của đường hầm, cũng đồng thời



Hình 10. So sánh kết quả mô phỏng của mô hình có lớp phủ (A) với mô hình thay thế lớp phủ bằng áp lực thẳng đứng (B).



Hình 11. Quy luật dịch chuyển trên biên hầm của mô hình có lớp phủ (A) và mô hình thay thế bằng áp lực thẳng đứng (B).

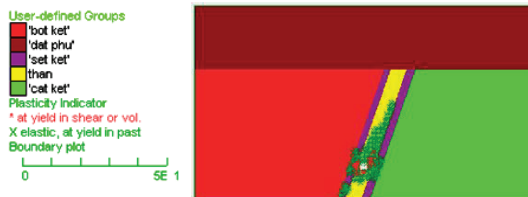
là nguyên nhân gây áp lực lệch lên kết cấu chống. Áp lực lệch thường là một trong những nguyên nhân chính gây phá hủy các kết cấu chống.

Ảnh hưởng của khoảng cách giữa đường hầm và mặt ranh giới giữa khối đá rắn cứng với lớp phủ

Trong các mô hình phân tích cho kết quả trên hình 5 và 6, đường hầm được bố trí cách bề mặt ranh giới giữa khối đá rắn cứng phân lớp và tầng phủ là 13 m, cho thấy vùng phá hủy xung quanh hầm phát triển cho đến ranh giới này, nghĩa là vùng phá hủy sẽ liên thông với tầng phủ. Khi tầng phủ là lớp đá rời (dất), thì với thời gian, nếu đường hầm không được chống giữ tốt, sẽ có thể xảy ra sụt lún đến mặt đất, đặc biệt là khi có mưa, một yếu tố tác động của thiên nhiên, gây hiện tượng xói mòn trong lớp đất phủ. Hiện tượng này có thể xảy ra chậm theo thời gian và dẫn đến các sự cố lún sụt bất ngờ, vẫn được gọi là các “hố tử thần”.

Rõ ràng, khi bố trí đường hầm sâu hơn, vùng phá hủy có thể phát triển lớn hơn, do các thành phần ứng suất có thể lớn hơn, nhưng nếu vùng phá hủy không phát triển đến ranh giới của lớp đá rắn cứng và lớp phủ, sụt lún đến mặt đất sẽ không bị xảy ra. Trên hình 12 cho thấy, vùng phá hủy, khi

đường hầm được bố trí cách ranh giới giữa khối đá cứng và lớp phủ mềm yếu là 43 m. Nghĩa là để phòng tránh sụt lở đến mặt đất cần phân tích với các bài toán biên khác nhau, để có thể lựa chọn khoảng cách hợp lý giữa đường hầm và lớp đất phủ.



Hình 12. Vùng phá hủy khi đường hầm cách mặt ranh giới giữa khối đá rắn cứng và lớp phủ 43 m.

Kết luận

Từ các kết quả mô phỏng với mô hình khối đá phân lớp, có các lớp được coi là đồng nhất liên khối cho thấy, thể nằm và trật tự sắp xếp của các lớp đá trong khối đá, việc lựa chọn điều kiện biên, lựa chọn kích thước của vùng hay miền nghiên cứu có ảnh hưởng lớn đến kết quả phân tích về sự hình thành và quy mô biến đổi của các hiện tượng cơ học.

Để có thể có được kết quả dự báo hợp lý, người xây dựng chương trình dự báo cần phải tiến hành công tác mô phỏng với các mô hình tính có các kích thước miền nghiên cứu khác nhau, các dạng điều kiện biên khác nhau, có nghĩa là phải tiến hành với các phép thử thận trọng. Trên cơ sở đó mới có thể cho phép có được nhận định tổng thể về dạng và quy mô của các vùng phá hủy trong khối đất đá, mức độ lún sụt trên mặt đất, cũng được gọi là các tai biến địa chất - kỹ thuật trong khối đá, khi khối đá có các cấu trúc phân lớp, nhận được từ các tài liệu khảo sát thăm dò địa chất.

Trong trường hợp khối đất đá có lớp phủ khá dày, công trình nằm sâu, bài toán được phân tích không thể cho kết quả định lượng chính xác nếu kích thước vùng nghiên cứu quá lớn. Khi đó, có thể khảo sát miền đủ lớn để có được kết quả định tính cần thiết ban đầu. Tiếp theo, cần dựa vào kết quả nhận được của bài toán định tính để giải, phân tích các bài toán biên với kích thước nhỏ hơn. Các điều kiện biên cho các biên của bài toán có miền nghiên cứu kích thước nhỏ được lấy từ kết quả phân tích trên các lát cắt tương

ứng từ bài toán biên có kích thước lớn. Đương nhiên, nếu có các máy tính cấu hình mạnh và bộ nhớ lớn có thể nhận được kết quả khá dĩ về định lượng cho các bài toán có miền nghiên cứu đủ lớn. Mặt khác, cũng có thể sử dụng mô hình kết hợp hay tích hợp (hybrid method) giữa phương pháp phần tử biên (BEM-Boundary Element Method) và phương pháp khác, như phương pháp sai phân hữu hạn (FDM-Finite Difference Method) ở phần mềm FLAC 2D, hoặc phương pháp phần tử hữu hạn (FEM-Finite Element Method).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Quang Phích (2007), *Cơ học đá*, Nxb Xây dựng, Hà Nội.

[2] Nguyễn Quang Phích, Nguyễn Văn Mạnh, Đỗ Ngọc Anh (2007), *Phương pháp số - chương trình Plaxis 3D và UDEC*, Nxb Xây dựng, Hà Nội.

[3] С.Г. Лехницкий (1950), *Теория упругости анизотропного тела*, М.Л.:ГИТЛ.

[4] К.В. Руппенеит (1975), *Деформируемость трещиноватых горных пород*, М.: Недра.

[5] A.N. Vlasov, V.V. Merzlyakov (1993), *Deformability parameters of stratified and jointed rock*, Safety and environmental issues in rock engineering, Eurorock 93, Lisboa, Portugal.

[6] Y. Hatzor, and R.E. Goodman (1992), *Application of block theory and the critical key block concept in tunneling; two case histories*, Lake Tahoe, California, pp.632-639.

[7] T. Belytschko, et al. (1996), *Meshless Methods-An Overview and Recent Developments*, Northwestern University.

[8] P. Jia, C.A. Tang (2008), "Numerical study on failure mechanism of tunnel in jointed rock mass", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, pp.500-507.

[9] T. Solak, W. Schubert (2005), *Evaluation of the influence of the rock mass structure on the deformation behavior of tunnels*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1537-4529.

[10] C.W. Boon (2013), *Distinct Element Modelling of Jointed Rock Masses: Algorithms and Their Verification*, A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the University of Oxford.

[11] B. Sainsbury, M. Pierce and D. Mas Ivars (2008), *Simulation of rock mass strength anisotropy and scale effects using a Ubiquitous Joint Rock Mass (UJRM) model*, Proceedings First International FLAC/DEM Symposium on Numerical Modelling, Itasca.