

Kỹ thuật mô phỏng số khối đá trong mỏ than hầm lò bằng mô hình nền tảng hạt

Lê Tiến Dũng*



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

TÓM TẮT

Sự ổn định khối đá xung quanh lò chợ hoặc công trình ngầm trong mỏ than hầm lò là điều kiện tiên quyết để hoạt động sản xuất than diễn ra bình thường và đảm bảo an toàn. Tuy nhiên, các lò chợ thực tế vẫn thường xảy ra các sự cố mất ổn định tại gương khai thác hoặc trên nóc gây tai nạn lao động nghiêm trọng, thậm chí chết người. Các nghiên cứu về sự mất ổn định này cho tới nay chưa làm rõ thỏa đáng sự hình thành và phát triển phá hủy khối đá trong biểu hiện, nguyên nhân phần lớn là bởi đặc trưng bất đẳng hướng, không liên tục, không đồng nhất và không đàn hồi của khối đá mỏ. Nhằm phục vụ nghiên cứu biểu hiện ổn định khối đá nêu trên, nội dung bài báo trình bày một nghiên cứu hoàn thiện kỹ thuật mô phỏng số khối đá xung quanh lò chợ bằng mô hình nền tảng hạt. Kỹ thuật mô phỏng sử dụng phương pháp phần tử rời rạc và cấu trúc hạt Voronoi. Một quy trình hiệu chỉnh tính chất vật liệu trong kỹ thuật mô phỏng được đề xuất và kiểm chứng tính đúng đắn thông qua áp dụng cho đất đá thực địa mỏ than Hà Lâm, tỉnh Quảng Ninh. Nội dung bài báo cũng trình bày một kỹ thuật lựa chọn kích thước khối hạt đa giác và giám sát mô phỏng hiệu quả. Quy trình đề xuất cùng với bộ mã lập trình mô phỏng tương ứng sẽ phục vụ đắc lực công tác nghiên cứu ổn định khối đá xung quanh công trình ngầm, từ đó đề xuất các giải pháp kỹ thuật đảm bảo an toàn và sản xuất theo kế hoạch.

Từ khóa: Lò chợ, Khối đá, Mô phỏng số, Phương pháp phần tử rời rạc, Mô hình nền tảng hạt

GIỚI THIỆU

Việc khai thác than trong mỏ hầm lò được thực hiện tại các không gian ngầm trong lòng đất, thường được gọi là các *lò chợ*. Sự ổn định của các khối đá (có thể cấu thành từ các vật liệu khác nhau như than, bột kết, sét kết, cát kết hoặc cuội kết) xung quanh lò chợ là điều kiện tiên quyết để hoạt động khai thác tại đây diễn ra bình thường và đảm bảo an toàn. Các lò chợ thực tế ở mỏ hầm lò vùng than Quảng Ninh vẫn thường xảy ra các sự cố mất ổn định tại gương (nơi trực tiếp lấy than) và trên nóc (vách) lò chợ, dẫn tới các vụ tai nạn lao động nghiêm trọng và chết người¹⁻³. Việc nghiên cứu làm rõ bản chất hình thành sự mất ổn định khối đá xung quanh lò chợ mỏ than hầm lò có ý nghĩa khoa học quan trọng để từ đó đề xuất các giải pháp kỹ thuật đảm bảo an toàn làm việc cho công nhân và sản xuất theo đúng kế hoạch.

Sự mất ổn định khối đá xung quanh lò chợ mỏ than hầm lò vùng than Quảng Ninh đã được nghiên cứu trong một số công bố trước đây⁴⁻⁶. Các nghiên cứu đã chỉ ra được hai điều kiện đặc trưng thường xảy ra sự mất ổn định, đó là (i) khối đá mềm yếu và/hoặc chứa nhiều khe nứt và (ii) khối đá bền vững và/hoặc đặc khối (Hình 1). Các nghiên cứu, tuy nhiên, chưa làm rõ được sự hình thành và phát triển phá hủy khối đá

dẫn tới sự mất ổn định. Mặc dù đã có nghiên cứu sử dụng phương pháp mô phỏng số tiên tiến, kỹ thuật mô phỏng tương ứng chỉ cho phép sự phá hủy khối đá xảy ra theo các khe nứt phân bố thường quy có sẵn mà không phát sinh khe nứt mới⁷. Thêm vào đó, việc mô phỏng các tính chất cơ học khối đá ở phạm vi lớn (ví dụ., xung quanh lò chợ theo tiến độ khai thác) luôn là việc khó khăn do các đặc trưng không liên tục, bất đẳng hướng, không đồng nhất và không đàn hồi của cấu trúc khối đá. Như vậy có thể thấy việc phát triển một kỹ thuật mô phỏng số có khả năng giải quyết những tồn tại nêu trên là hết sức cần thiết và là tiền đề quan trọng để nghiên cứu bản chất sự mất ổn định khối đá xung quanh lò chợ.

Trong các mô phỏng số khối đá nứt nẻ, các phương pháp phần tử rời rạc (Discrete Element Methods—DEM) như PFC, PFC3D, UDEC, 3DEC được áp dụng rộng rãi bởi cho phép mô phỏng các khe nứt tự nhiên và phá hủy đá liên khối⁸. Ưu điểm thứ nhất thể hiện qua việc mô phỏng xác định (deterministically) một số lượng lớn các khe nứt với các đặc tính như góc phương vị (hướng cắm, góc cắm), cường độ (chiều dài, khoảng cách), độ bền, và độ cứng. Các khe nứt này cũng có thể được mô phỏng xác suất (stochastically) với các đặc tính thay đổi nhờ kĩ thuật mạng khe nứt rời rạc (Discrete Fracture Network—DFN). Các

Bộ môn Khai thác Hầm lò, Khoa Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội 100000, Việt Nam

Liên hệ

Lê Tiến Dũng, Bộ môn Khai thác Hầm lò, Khoa Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội 100000, Việt Nam

Email: t.d.le@humg.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 04-11-2022
- Ngày chấp nhận: 22-02-2023
- Ngày đăng: 15-4-2023

DOI:

<https://doi.org/10.32508/stdjsee.v7i1.711>

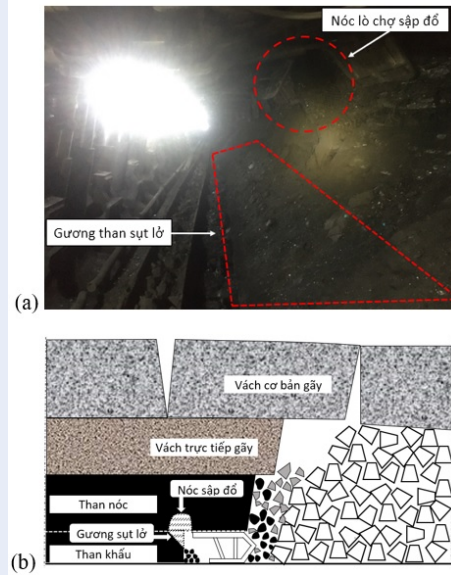


Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

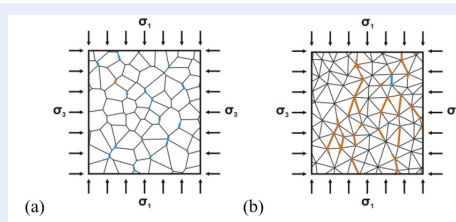


Trích dẫn bài báo này: Dũng L.T. Kỹ thuật mô phỏng số khối đá trong mỏ than hầm lò bằng mô hình nền tảng hạt. *Sci. Tech. Dev. J. - Sci. Earth Environ.*; 2023, 7(1):609-618.



Hình 1: Sự cố mất ổn định khối đá lò chợ do (a) khối đá mềm yếu, chứa nhiều khe nứt và (b) khối đá bền vững, đặc khối.

khe nứt có thể tương tác với nhau, dẫn đến các biểu hiện phá hủy tường minh như trượt hoặc tách. Ưu điểm thứ hai thể hiện qua mô phỏng truyền thống sự phá hủy đá liên khối thông qua các chỉ dấu biến dạng dẻo (plastic yielding). Ưu điểm này cũng thể hiện qua mô phỏng tường minh sự phá hủy khối nguyên (intact block) nhờ việc gán và phá hủy các mặt nội tiếp xúc (internal contacts) trong mô hình nền tảng hạt (Grain-Based Model—GBM). Một số cấu trúc hạt điển hình có thể kể tên như Voronoi⁹ hay Trigon¹⁰ (Hình 2).



Hình 2: Mô hình nền tảng hạt với cấu trúc (a) Voronoi và (b) Trigon¹¹

Một số nghiên cứu đã áp dụng thành công mô hình nền tảng hạt trong mô phỏng DEM để nghiên cứu sự ổn định khối đá ở phạm vi thực địa như bờ dốc mỏ¹², đường lò mỏ¹³⁻¹⁵, đá vách lò chợ^{16,17}, sụt lún bề mặt địa hình mỏ¹⁸, gương lò chợ¹⁹, và trụ than bảo vệ đường lò mỏ²⁰. Mặc dù các nghiên cứu trên đã góp

phần làm sáng tỏ cơ chế ổn định của khối đá trong các điều kiện khai thác mỏ khác nhau, việc áp dụng mở rộng các kỹ thuật mô phỏng tương ứng là khó khăn do chưa thống nhất: (i) cách thức lựa chọn kích thước khối hạt; (ii) quy trình hiệu chỉnh tính chất vật liệu (xem Mục 2); và (iii) trình tự mô phỏng thí nghiệm và giám sát. Ngoài ra, các mã lập trình nguồn trong các mô phỏng trên cũng được công bố hạn chế, khiến độ tin cậy các kết quả bị ảnh hưởng và tốn kém thời gian cho các nhà khoa học muốn tái lập nghiên cứu. Nội dung bài báo trình bày một nghiên cứu hoàn thiện kỹ thuật giúp mô phỏng số khối đá ở xung quanh lò chợ mỏ than hầm lò bằng mô hình nền tảng hạt. Kỹ thuật mô phỏng sử dụng phương pháp phần tử rời rạc với cấu trúc hạt Voronoi để mô tả cấu trúc và tính chất khối đá lò chợ thực địa. Một quy trình hiệu chỉnh tính chất vật liệu trong kỹ thuật mô phỏng được đề xuất. Quy trình được kiểm chứng thông qua phân tích sử dụng tính chất đất đá thực địa mỏ than Hà Lâm, tỉnh Quảng Ninh, Việt Nam. Các mã lập trình mô phỏng được công bố tương ứng. Các kết quả từ bài báo sẽ phục vụ đặc lực công tác nghiên cứu ổn định khối đá xung quanh công trình ngầm, từ đó đề xuất các giải pháp kỹ thuật đảm bảo an toàn và sản xuất theo kế hoạch.

PHƯƠNG PHÁP VÀ KHU VỰC NGHIÊN CỨU

Khái quát chung mô hình nền tảng hạt

Thuật ngữ mô hình nền tảng hạt (GBM) phản ánh việc sử dụng các cấu trúc hạt đa giác (Voronoi hoặc Trigon) để mô phỏng vật liệu có cấu trúc dạng hạt trong các chương trình mô phỏng số^{10,21,22}. Ví dụ áp dụng GBM trong UDEC (gọi là UDEC-GBM) xuất hiện lần đầu trong Lorig và Cundall⁹ để khắc phục nhược điểm của UDEC không thể mô phỏng tường minh phá hủy khối nguyên. Điều này được thực hiện thông qua việc phân chia một hay nhiều khối nguyên thành các khối đa giác (Voronoi) hoặc tam giác (Trigon) nhỏ hơn có kích thước ngẫu nhiên²³. Các mặt tiếp xúc (contacts) giữa các khối đa giác không diễn tả các khe nứt tự nhiên mà đóng vai trò là các hướng tiềm năng (potential paths) cho sự phát triển phá hủy khối nguyên. Như vậy đối tượng nghiên cứu (ví dụ, khối đá) được mô phỏng như là một tập hợp của nhiều khối đa giác (cứng hoặc biến dạng được) liên kết với nhau bởi các mặt tiếp xúc. Nếu các khối đa giác là biến dạng được, chúng sẽ được chia lưới thành các phần tử (vùng) tam giác sai phân hữu hạn phục vụ cho tính toán ứng suất, biến dạng. Cơ sở tính toán trong mô phỏng được thể hiện trong Hình 3. Biểu hiện cơ học của khối đá nghiên cứu lúc này được

điều khiển bởi các tính chất cơ học vi mô của các mặt tiếp xúc và đa giác, thay vì các tính chất của khe nứt tự nhiên và đá khối nguyên. Do các mặt tiếp xúc và đa giác được tạo ra bởi người mô phỏng, các tính chất cơ học của chúng phải được hiệu chỉnh để tính chất cơ học tổng thể khối đá phù hợp với thực tế.

Trước những năm 2010, việc hiệu chỉnh tính chất GBM là đơn giản thông qua điều chỉnh độ bền^{9,24} hoặc độ cứng¹² của mặt tiếp xúc. Sau những năm 2010, một số quy trình hiệu chỉnh đã được đề xuất cho phép tìm ra một bộ các tính chất mặt tiếp xúc để biểu hiện của khối đá mô phỏng phù hợp với thực tế. Nhờ các quy trình hiệu chỉnh này và ưu điểm trong mô phỏng phát triển phá hủy, các mô hình nền tảng hạt ngày càng được sử dụng rộng rãi²⁵. Các GBM khác nhau, tuy nhiên, có các ưu nhược điểm và đặc điểm bất định (uncertainties) khác nhau. Theo Gao và Stead¹⁰, các tính chất vi mô của mặt tiếp xúc trong mô hình nền tảng Voronoi dường như bị đánh giá quá mức sau hiệu chỉnh, trong khi thời gian chạy mô hình nền tảng Trigon lại tăng lên đáng kể. Mayer và Stead¹¹ và Zhang và Wong⁸ phát hiện rằng cấu trúc Voronoi giới hạn động năng tự do của đa giác. Điều này khiến phá hủy kéo phát triển hơn. Ngược lại, cấu trúc Trigon gia tăng động năng tự do của đa giác và khiến phá hủy cắt phát triển vượt trội. Trên tất cả, các cấu trúc GBM có thể phản ánh sai lệch cơ chế phá hủy thực tế nếu chúng không phản ánh đúng hình dạng cấu trúc và phân bố không gian khoáng vật cấu thành đá.

Đề xuất quy trình hiệu chỉnh

Dựa trên các ưu nhược điểm cũng như sự giống và khác nhau giữa các quy trình hiệu chỉnh trong các nghiên cứu đã công bố, nội dung bài báo đề xuất một quy trình hiệu chỉnh tính chất khối đa giác và mặt tiếp xúc của mô hình nền tảng hạt dựa trên phương pháp phân tích tham số thông qua các mô phỏng số thí nghiệm nén đơn trục và kéo gián tiếp (Brazilian). Quy trình được thể hiện trong Hình 4. Cụ thể, đối với khối đá ở phạm vi phòng thí nghiệm:

- Bước 1 là lựa chọn hình dạng và kích thước khối đa giác. Việc lựa chọn được dựa trên (i) cấu trúc khoáng vật đá, (ii) quy mô đối tượng mô phỏng, và (iii) cấu hình máy tính để đảm bảo hướng phát triển phá hủy khối đá ít bị ảnh hưởng nhất.
- Bước 2 là gán tính chất cơ học ban đầu cho khối đa giác và mặt tiếp xúc. Để giảm thiểu khối lượng công tác hiệu chỉnh về sau, khối đa giác có thể được giả định là đàn hồi. Để đơn giản, mô đun đàn hồi và hệ số Poisson khối đa giác cũng như độ cứng và độ bền mặt tiếp xúc được khuyến nghị lấy bằng chính các giá trị tương ứng

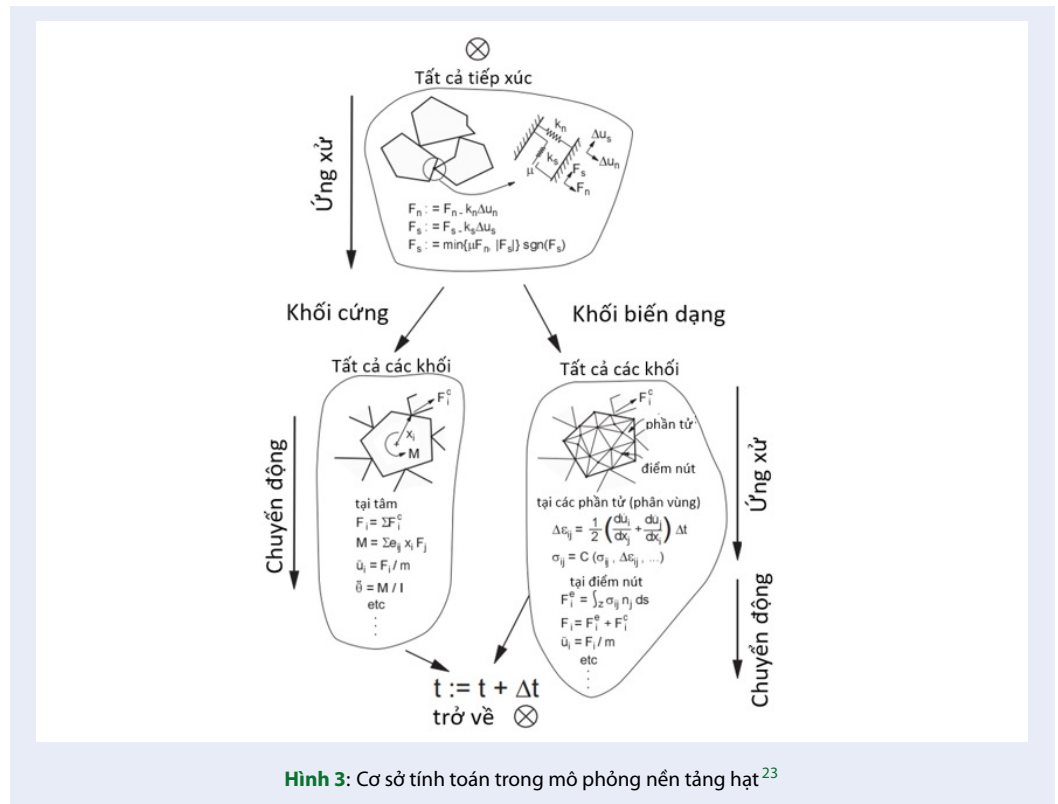
của mẫu đá thu được từ thí nghiệm trong phòng hoặc tài liệu tổng quan.

- Bước 3 là hiệu chỉnh hệ số Poisson khối đá (ν). Việc này được thực hiện thông qua điều chỉnh tỉ số độ cứng của mặt tiếp xúc (độ cứng tiếp tuyến trên độ cứng pháp tuyến, k_s/k_n). Tỉ số này được lấy trong khoảng 0.1–1 sao cho hệ số ν của khối đá trong mô phỏng nén đơn trục sát hệ số tương ứng trong thí nghiệm vật lý. Giá trị ν được tính qua tỉ số giữa biến dạng hông và biến dạng dọc trục tại điểm 50% ứng suất phá hủy.
- Bước 4 là hiệu chỉnh mô đun đàn hồi khối đá (E). Việc này được thực hiện thông qua điều chỉnh độ cứng pháp tuyến của mặt tiếp xúc (k_n , và theo đó k_s cũng thay đổi tương ứng) để E sát giá trị thí nghiệm vật lý. Giá trị E được tính qua tỉ số giữa ứng suất dọc trục và biến dạng dọc trục tại điểm 50% ứng suất phá hủy.
- Bước 5 là hiệu chỉnh độ bền nén đơn trục khối đá. Việc này được thực hiện thông qua điều chỉnh cường độ dính kết và góc nội ma sát mặt tiếp xúc để độ bền nén đơn trục khối đá mô phỏng (UCS) sát giá trị thí nghiệm vật lý. Giá trị UCS chính là ứng suất cực đại tại thời điểm khối đá mô phỏng phá hủy (ứng suất phá hủy).
- Bước 6 là hiệu chỉnh độ bền kéo khối đá. Việc này được thực hiện thông qua mô phỏng kéo gián tiếp để độ bền kéo khối đá mô phỏng sát giá trị thí nghiệm vật lý. Giá trị độ bền kéo được tính theo tải trọng lớn nhất khi khối đá mô phỏng phá hủy.



Hình 4: Quy trình hiệu chỉnh mô hình nền tảng hạt

Đối với khối đá ở phạm vi thực địa, quy trình hiệu chỉnh cũng được thực hiện tương tự. Tuy nhiên, các



tính chất khối đa giác và mặt tiếp xúc được hiệu chỉnh để phản ánh các tính chất khối đá ở phạm vi thực địa. Lưu ý rằng các tính chất khối đá ở phạm vi thực địa có thể được suy ra từ các phương pháp: (i) lấy tỉ lệ thực nghiệm từ các thông số thí nghiệm đá nguyên khối trong phòng; (ii) sử dụng tiêu chuẩn bền Hoek-Brown và chỉ tiêu độ bền địa chất (GSI) để giảm các tính chất đá nguyên khối; (iii) sử dụng phương pháp khối đá nhân tạo (SRM); và (iv) phân tích ngược các quan hệ ứng suất – biến dạng. Do việc mô phỏng khối đá ở phạm vi thực địa thường đòi hỏi kích thước khối hạt (đa giác) lớn hơn so với phạm vi phòng thí nghiệm, việc chọn kích thước khối đa giác trong mô phỏng thí nghiệm nén và kéo phải ít ảnh hưởng nhất tới sự phát triển phá hủy. Tác giả đề xuất cần 10–20 đa giác phân bố dọc theo chiều rộng của mẫu thí nghiệm, hoặc tối thiểu năm đa giác phân phối giữa hai khe nứt nếu trong mẫu có khe nứt. Ngoài ra, kích thước các khối đa giác nên lớn hơn 0.2 m ở khu vực quan tâm nghiên cứu và tăng dần ra các khu vực ngoài để giảm thiểu thời gian mô phỏng. Tác giả cũng khuyến nghị mật độ khối đa giác và số nhân khởi tạo (seed generator number) trong mô phỏng thí nghiệm nén, kéo và trong mô hình lò chợ thực địa là tương đương nhau. Nếu mô hình lò chợ thực địa chứa các vùng có kích thước khối đa giác khác nhau thì các vùng này phải được hiệu chỉnh riêng biệt.

Lựa chọn mô hình và khu vực nghiên cứu

Trong nghiên cứu này tác giả sử dụng chương trình số UDEC²³ kết hợp với cấu trúc hạt Voronoi để kiểm chứng quy trình hiệu chỉnh tính chất vi mô mặt tiếp xúc phục vụ nghiên cứu sự mất ổn định khối đá xung quanh lò chợ mỏ than hầm lò. Chương trình UDEC có khả năng mô phỏng sự tách rời vật liệu đá và rơi vào khoảng trống đã khai thác, trong khi cấu trúc Voronoi giúp mô tả cách thức và hướng phát triển phá hủy khối đá xung quanh lò chợ.

Lò chợ thực địa 11-1.14 tại mỏ than Hà Lâm được lựa chọn cho nghiên cứu này bởi (i) khối than nóc và gương lò chợ có hiện tượng mất ổn định, sập đổ vào lò chợ và (ii) các tính chất cơ học than và đất đá lò chợ đã được làm sáng tỏ và tin cậy. Cụ thể, các kỹ sư mỏ cho biết các cục than nóc và gương sập đổ có kích thước trung bình 20 đến 25 cm, có thể lên tới 50 cm khi đá kẹp xuất hiện trong vỉa. Gương than thường sụt lờ trong phạm vi 10 đến 30 giàn theo hướng dốc và sâu vào gương tối đa tương đương năm luống khấu. Các mặt phân lớp trong than có khoảng cách trung bình 20 đến 50 cm, và các nứt nẻ phát triển gần vuông góc với các mặt phân lớp. Các tính chất cơ học của than lò chợ phục vụ công tác hiệu chỉnh được tổng hợp trong Bảng 1. Chú ý rằng lò chợ có chiều dày vỉa than là 8 m và chiều dài khai thác theo phương vỉa lớn hơn 50

Bảng 1: Tổng hợp tính chất than lò chợ thực địa mỏ Hà Lầm^{26,27}

Độ bền đơn trục thí nghiệm (MPa)	Mô đun đàn hồi thí nghiệm (GPa)	Hệ số Poisson (giá định)	Cường độ kết thí nghiệm (MPa)	Góc nội ma sát thí nghiệm (độ)	Độ bền kéo thí nghiệm (MPa)	Độ bền nén đơn trục thực địa (MPa)	Mô đun đàn hồi thực địa (GPa)	Độ bền kéo thực địa (MPa)
15.45	2.32	0.25	5.36	25.14	1.55	4.38	1.09	0.77

m. Hệ số Poisson được giả định bằng một giá trị phổ biến của than là 0.25 do thiếu thiết bị và chất lượng mẫu thí nghiệm chưa đủ tốt.

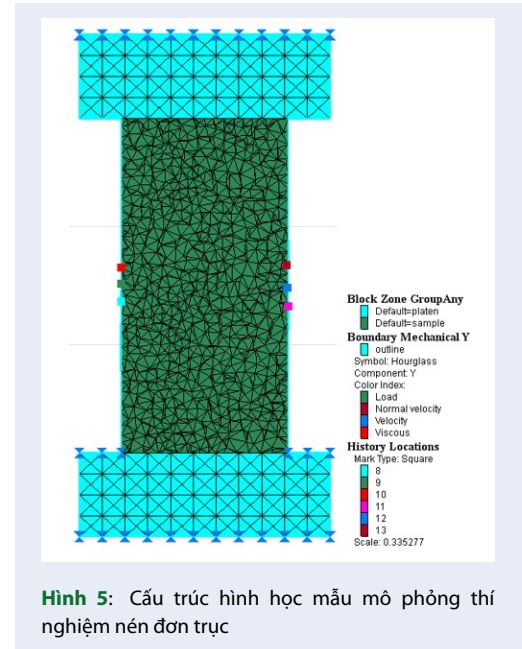
MÔ PHỎNG, KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mô phỏng thí nghiệm nén đơn trục

Mô phỏng thí nghiệm nén đơn trục được thực hiện để tìm ra kích thước khối đa giác (Bước 1 trong tiến trình Hình 4) cũng như tính chất khối đa giác và mặt tiếp xúc (Bước 2 đến Bước 5 trong tiến trình Hình 4) cho mô hình nghiên cứu phạm vi thực địa. Căn cứ vào chiều dày và chiều dài khai thác theo phương của lò chợ 11-1.14 nêu trên, chiều dài lớn nhất của khối đa giác Voronoi được chọn là 0.25 m sau một số thử nghiệm, đã tính đến cân bằng giữa chi tiết cấu trúc và thời gian chạy mô hình (Bước 1). Cấu trúc hình học của mẫu thí nghiệm được thể hiện trong Hình 5. Cụ thể, mẫu nén có đường kính là 4 m, gấp 16 lần cạnh khối đa giác theo đề xuất đã nêu. Mẫu nén có chiều cao là 8 m, gấp hai lần đường kính theo khuyến nghị của Hội Cơ học Đá Quốc tế (The International Society for Rock Mechanics—ISRM). Mẫu được đặt giữa hai bệ thép có đường kính 6 m và chiều cao 2 m, giúp tải trọng được phân bố đều lên mẫu. Bệ đáy mẫu được cố định theo các phương X (ngang) và Y (đứng). Bệ đỉnh mẫu được cố định theo phương X và được gán một tốc độ không đổi theo phương Y để mô phỏng sự chất tải mẫu.

Hai bệ thép được mô phỏng bằng vật liệu đàn hồi với các tính chất gần giống thực tế (Bảng 2). Với mục tiêu mô phỏng sự phá hủy khối nguyên thông qua phá hủy các mặt tiếp xúc, đa giác Voronoi cũng được mô phỏng bằng vật liệu đàn hồi trong khi các mặt tiếp xúc được gán mô hình ứng xử *Coulomb slip*. Mô đun đàn hồi và hệ số Poisson khối đa giác được lấy từ Bảng 1. Các tính chất ban đầu của mặt tiếp xúc được giả định dựa trên các tài liệu đã công bố như trong Bảng 3 (Bước 2).

Sự chất tải mẫu được điều khiển bởi biến dạng thay vì ứng suất bởi hệ thống (trong thực tế và mô hình) sẽ trở nên khó kiểm soát khi lực tác dụng tăng tới giá trị phá hủy²³. Tốc độ chất tải phải đủ nhỏ để ứng suất



Hình 5: Cấu trúc hình học mẫu mô phỏng thí nghiệm nén đơn trục

được lan truyền đầy đủ giữa các phần trong mẫu, hoặc nói cách khác, đảm bảo mẫu ở trạng thái cân bằng giả tĩnh. Tuy nhiên, nếu tốc độ chất tải quá nhỏ, ví dụ 0.02 mm/s như trong thí nghiệm vật lý, mô hình sẽ cần 1 tỷ bước chạy (step) để dịch chuyển bệ thép 2 mm với giả định một đơn vị thời gian số khoảng 10^{-7} giây. Thời gian chạy mô hình như vậy là không thực tế²⁸. Chú ý rằng một đơn vị thời gian số được tính toán tự động bởi UDEC, phụ thuộc vào khối lượng (mass) của khối nguyên và độ cứng của mặt tiếp xúc. Đơn vị thời gian này không nhất thiết phải cực kỳ nhỏ như ở trên. Sau một số thử nghiệm, tốc độ chất tải 0.01 m/s được lựa chọn cho nghiên cứu này do cân đối được biểu hiện phá hủy và thời gian chạy, và cũng nhất quán với các mô phỏng trước đây²⁵. Bộ mã lập trình tạo cấu trúc hình học mẫu thí nghiệm và chạy mô phỏng được cung cấp trong Phụ lục 1a, 1b.

Để tính toán độ bền và biến dạng mẫu, ứng suất trục, biến dạng trục và biến dạng hông được ghi lại sau mỗi một số các bước chạy nhất định. Sau một số thử nghiệm, các giá trị ứng suất và biến dạng được ghi lại sau mỗi 500 bước chạy với độ chênh lệch không

Bảng 2: Tính chất đàn hồi của bê thép

Tính chất	Tỷ trọng (kg/m ³)	Mô đun khối (GPa)	Mô đun cắt (GPa)	Hệ số Poisson
Giá trị	7850	160	79	0.3

Bảng 3: Tính chất ban đầu của mặt tiếp xúc

Tính chất	Độ cứng tiếp tuyến (GPa/m)	Độ cứng pháp tuyến (GPa/m)	Cường độ dính kết (MPa)	Góc nội ma sát (độ)	Độ bền kéo (MPa)
Giá trị	1	10	1.40	15	0.77

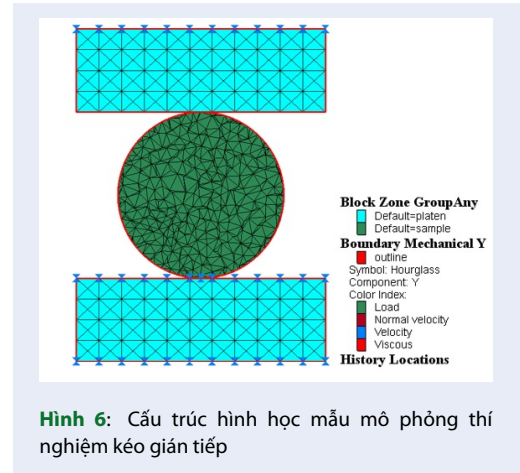
quá 10% giữa các lần ghi. Ứng suất trục và biến dạng trục được quan trắc tại 11 điểm phân bố đều tại mặt tiếp xúc giữa mẫu với bê thép đỉnh. Chú ý rằng trong cùng điều kiện chất tải mặt trên và cố định mặt dưới mẫu, một số mô phỏng đo đặc ứng suất trục tại đáy mẫu^{29,30}. Mặc dù sự chênh lệch ứng suất đo tại đỉnh và đáy mẫu là không nhiều (khoảng 4% như trong nghiên cứu này), giá trị đo tại mặt trên mẫu sẽ phản ánh chính xác hơn thời điểm mẫu phá hủy vì là vị trí đầu tiên của mẫu được nhận tải. Cùng lúc, biến dạng hông được quan trắc tại 6 điểm phân bố ở hai hông mẫu (Hình 5). Bộ mã lập trình theo dõi ứng suất và biến dạng thí nghiệm được cung cấp trong Phụ lục 1c. Các biểu đồ ứng suất và biến dạng từ mô phỏng được xuất định dạng sang Excel để tìm các giá trị UCS, E và v.

Mô phỏng thí nghiệm kéo gián tiếp

Thí nghiệm kéo gián tiếp (Brazilian) được Hội Cơ học Đá Quốc tế đề xuất là thí nghiệm chuẩn cho xác định độ bền kéo vật liệu³¹. Theo đó, độ bền kéo gián tiếp được tính bằng $2P_{max}/\pi Dt$ với P_{max} là tải trọng lớn nhất khi mẫu phá hủy, D là đường kính của mẫu trụ tròn, và t là độ dày của mẫu. Mô hình thí nghiệm kéo được dựng trong Hình 6 với đường kính mẫu là 4 m và chiều dày mẫu là 1 m (theo mặc định của UDEC). Chiều dài lớn nhất cạnh khối Voronoi và số nhân khởi tạo giống như trong thí nghiệm nén. Các thiết lập còn lại của mô phỏng như bê thép, cơ chế chất tải, và theo dõi ứng suất trục, biến dạng trục là tương tự như trong thí nghiệm nén. Bộ mã lập trình tạo cấu trúc hình học mẫu thí nghiệm kéo và chạy mô phỏng được cung cấp trong Phụ lục 2a, 2b.

Kết quả và thảo luận

Các tính chất cơ học mô hình UDEC-GBM trong quá trình hiệu chỉnh được tổng hợp trong Bảng 4. Các mô phỏng cho thấy khi tỉ số độ cứng mặt tiếp xúc tăng (Mô phỏng 1 tới Mô phỏng 5), hệ số Poisson giảm. Hệ số này có thể giảm về gần giá trị giả định lý thuyết (Mô phỏng 5) nhưng khi đó tỉ số ks/kn là không thực tế và vượt ngoài khoảng giá trị khuyến



Hình 6: Cấu trúc hình học mẫu mô phỏng thí nghiệm kéo gián tiếp

ngiht. Tỉ số ks/kn do đó được chọn cố định là 1 (Bước 3).

Tiếp theo, giá trị kn (và theo đó ks) được thay đổi để hiệu chỉnh E (Bước 4). Việc tăng kn và ks giúp tăng E tới giá trị mục tiêu, nhưng đồng thời cũng làm tăng v (Mô phỏng 6 tới Mô phỏng 10). Giá trị ks và kn được chọn cùng bằng 11 GPa/m (Mô phỏng 6) để cân bằng giữa giá trị E (bằng 94% mục tiêu) và v (bằng 107–120% giá trị thực tế thường gặp). Sự khác biệt của v có thể là do hạn chế của chương trình UDEC hai chiều trong việc mô phỏng hiện tượng nở hông có bản chất ba chiều³². Sự chênh lệch lớn nhất 20% xảy ra khi so sánh với một hệ số v thường gặp là 0,25 và giảm xuống chỉ còn 7% nếu hệ số mục tiêu tăng lên 0,28 như được báo cáo trong một số nghiên cứu³³.

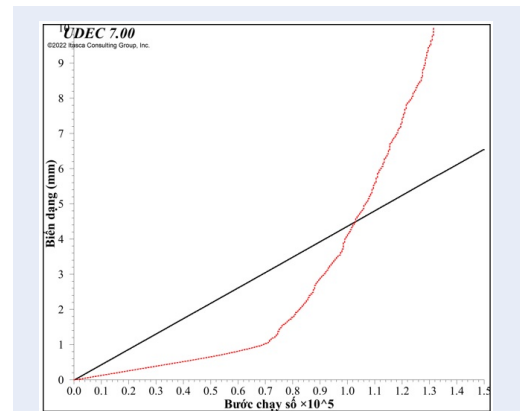
Giá trị độ bền nén mẫu trong Mô phỏng 6 là 6.70 MPa và cần được hiệu chỉnh giảm về mục tiêu 4.38 MPa (Bước 5). Việc này được thực hiện bằng việc giảm giá trị cường độ dính kết và góc nội ma sát (Mô phỏng 12–14). Giá trị góc nội ma sát và dính kết được chọn lần lượt là 1 MPa và 8 độ để độ bền mẫu mô phỏng là 4.44 MPa (Mô phỏng 14). Trạng thái mẫu sau phá hủy và biểu đồ ứng suất – biến dạng thể hiện trong Hình 7. Biểu đồ tương quan biến dạng dọc trục – biến dạng hông thể hiện trong Hình 8.

Bảng 4: Tính chất cơ học mô hình UDEC-GBM trong quá trình hiệu chỉnh

Thứ tự	Tính chất mặt tiếp xúc					Tính chất khối đá				
	Độ cứng tiếp tuyến (GPa/m)	Độ cứng pháp tuyến (GPa/m)	Cường độ dính kết (MPa)	Góc ma sát (độ)	Độ bền kéo (MPa)	Độ bền nén (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poisson		
1	1	10	1.40	15	0.77	6.09	0.74	1.13		
2	5	10	1.40	15	0.77	6.63	0.94	0.36		
3	10	10	1.40	15	0.77	6.79	0.83	0.30		
4	15	10	1.40	15	0.77	6.82	1.00	0.27		
5	20	10	1.40	15	0.77	6.85	1.01	0.26		
6	11	11	1.40	15	0.77	6.70	1.02	0.30		
7	12	12	1.40	15	0.77	6.56	1.05	0.31		
8	13	13	1.40	15	0.77	6.80	1.07	0.31		
9	14	14	1.40	15	0.77	6.66	1.09	0.32		
10	15	15	1.40	15	0.77	7.32	1.11	0.33		
11	11	11	1.00	15	0.77	5.30	1.02	0.30		
12	11	11	1.00	11	0.77	4.99	1.02	0.30		
13	11	11	0.7	7.5	0.77	3.39	1.01	0.30		
14	11	11	1.00	8	0.77	4.44	1.04	0.30		

Giá trị độ bền kéo mẫu đá trong Mô phỏng 14 thu được là 0.35 MPa. Để đạt được giá trị mục tiêu, độ bền kéo mặt tiếp xúc được tăng lên 3 MPa. Giá trị độ bền kéo mẫu thí nghiệm thu được là 0.74 MPa, bằng 96% độ bền kéo khối đá thực địa (Bước 6). Trạng thái mẫu sau phá hủy trong mô phỏng kéo được thể hiện trong Hình 9.

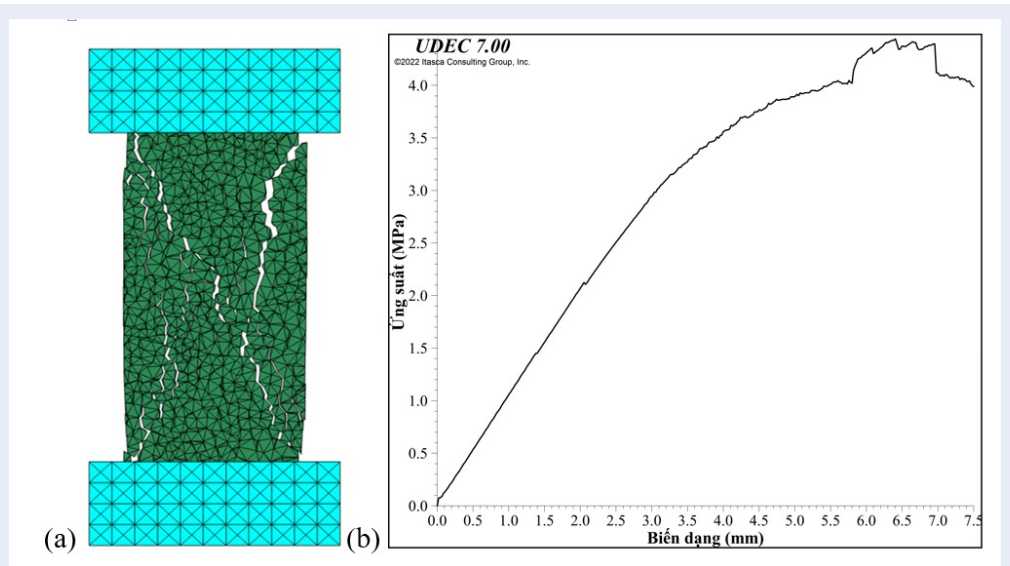
Các kết quả trên cho thấy các giá trị sau hiệu chỉnh về cơ bản chênh lệch từ 4 tới 7% so với các giá trị mục tiêu. Khoảng chênh lệch này là tương tự như sự chênh lệch thu được từ các quy trình hiệu chỉnh đã có^{11,18}. Tuy nhiên, quy trình hiện tại so với các quy trình trước thể hiện được ba ưu điểm. Thứ nhất, quy trình bổ sung cơ sở luận giải để lựa chọn hình dạng và kích thước khối đa giác phù hợp. Thứ hai, quy trình có thể áp dụng để hiệu chỉnh tính chất khối đá ở phạm vi thực địa một cách tường minh thay vì ở phạm vi phòng thí nghiệm. Thứ ba, bộ mã nguồn mô phỏng được cung cấp giúp người đọc dễ dàng kiểm chứng tính đúng đắn của kết quả mô phỏng, điều mà các quy trình khác dù cho kết quả hiệu chỉnh tốt hơn nhưng không kiểm chứng được.



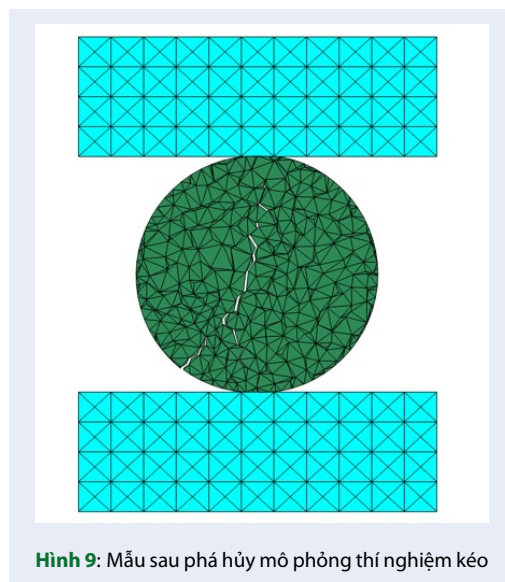
Hình 8: Biểu đồ tương quan biến dạng dọc trục – biến dạng hông mô phỏng thí nghiệm nén

KẾT LUẬN

Sự ổn định khối đá xung quanh lò chợ mỏ than hầm lò có ý nghĩa thực tế sản xuất quan trọng nhưng bản chất sự ổn định chưa được làm rõ thỏa đáng do khó khăn trong việc mô tả cấu trúc và tính chất khối đá ở phạm vi thực địa, cũng như sự thiếu hụt một công



Hình 7: Mẫu sau phá hủy và biểu đồ ứng suất – biến dạng mô phỏng thí nghiệm nén



Hình 9: Mẫu sau phá hủy mô phỏng thí nghiệm kéo

cụ nghiên cứu thỏa đáng. Nhằm phục vụ nghiên cứu biểu hiện ổn định khối đá nêu trên, nội dung bài báo trình bày một kỹ thuật mô phỏng số khối đá bằng mô hình nền tảng hạt sử dụng chương trình UDEC với cấu trúc hạt Voronoi. Một quy trình hiệu chỉnh tính chất vật liệu trong kỹ thuật mô phỏng bao gồm 6 bước được đề xuất và kiểm chứng tính đúng đắn thông qua phân tích sử dụng tính chất đất đá thực địa mỏ than Hà Lâm, tỉnh Quảng Ninh. Kết quả phân tích cho thấy quy trình hiệu chỉnh là phù hợp, các tính chất khối đa giác Voronoi và mặt tiếp xúc phản ánh được tính chất khối đá ở phạm vi thực địa. Chú ý rằng do bản

chất hai chiều của chương trình số mô phỏng, hệ số Poisson khối đá mô phỏng có thể lớn gấp 1.07 tới 1.2 lần giá trị thực tế thường gặp. Nội dung bài báo cũng đề xuất một kỹ thuật lựa chọn kích thước khối hạt và giám sát mô phỏng hiệu quả. Áp dụng quy trình hiệu chỉnh và bộ mã lập trình mô phỏng trong bài báo này có thể giúp các nhà nghiên cứu và kỹ sư mô phỏng được cấu trúc và tính chất khối đá cho từng điều kiện lò chợ cụ thể. Đây là tiền đề quan trọng để nghiên cứu bản chất sự mất ổn định khối đá trong các lò chợ khác nhau và từ đó đề xuất các giải pháp kỹ thuật đảm bảo an toàn làm việc và sản xuất theo kế hoạch.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Tác giả cam kết không có xung đột về lợi ích trong bài báo này.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Tác giả Lê Tiến Dũng hình thành ý tưởng, thu thập dữ liệu, thực hiện thí nghiệm, phân tích kết quả và hoàn thành bản thảo bài báo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Báo Người Lao Động. Sạt lở than trong hầm lò, 2 người thương vong See Available from: <https://nld.com.vn/thoi-su/sat-lo-than-trong-ham-lo-2-nguoi-thuong-vong-202011041444518.htm> for further details. [accessed Dec 29 2021].
2. Đình VC, Trinh ĐH, Hoàng PT. Đánh giá thực trạng tai nạn lao động tại các mỏ than hầm lò và đề xuất một số giải pháp nhằm hạn chế nguy cơ gây mất an toàn. Thông Tin Khoa Học Công Nghệ Mỏ. 2020;10-5.
3. Báo điện tử VOV Tai nạn lao động khiến 1 người tử vong tại chỗ See Available from: <https://nld.com.vn/thoi-su/sat-lo-than-trong-ham-lo-2-nguoi-thuong-vong-202011041444518.htm> for further details. [accessed Dec 29 2021].

4. Vũ TT, Đỗ AS. Phân tích nguyên nhân hiện tượng tụt nóc, lở gương cục bộ trong lò chợ khai thác cơ giới hóa đồng bộ và các biện pháp phòng ngừa. Tạp Chí Công Nghiệp Mỏ. 2014;26-9;.
5. Lê TD, Vũ TT, Đào VC. Cơ chế tụt lở than nóc và giải pháp xử lý tại lò chợ cơ giới hóa mỏ than Hà Lâm, Việt Nam, Proceedings of Conference Cơ chế tụt lở than nóc và giải pháp xử lý tại lò chợ cơ giới hóa mỏ than Hà Lâm, Việt Nam, Hồ Chí Minh, Việt Nam, 2019; Available from: <https://doi.org/10.15625/vap.2019.000167>.
6. Le TD. Analytical study on the stability of longwall top coal caving face. In: Bui XN, Lee C, Drebenstedt C, editors. Proceedings of the international conference on innovations for sustainable and responsible mining (ISRM 2020) lecture notes in civil engineering. Vol. 109. Cham: Springer International Publishing; 2021. p. 308-19; Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-60839-2_16.
7. Le TD, Bui MT, Phạm DH, Vũ TT, Đào VC. A modelling technique for top coal fall ahead of face support in mechanised longwall using Discrete Element Method. J Min Earth Sci. 2018;59:56-65;.
8. Zhang Y, Wong LNY. A review of numerical techniques approaching microstructures of crystalline rocks. Comput Geosci. 2018;115:167-87; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.03.012>.
9. Lorig LJ, Cundall PA. Modeling of reinforced concrete using the distinct element method, Proceedings of Conference Modeling of reinforced concrete using the distinct element method, Houston, 1987. p. 276-87; Available from: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3578-1_28.
10. Gao FQ, Stead D. The application of a modified Voronoi logic to brittle fracture modelling at the laboratory and field scale. Int J Rock Mech Min Sci. 2014;68:1-14; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2014.02.003>.
11. Mayer JM, Stead D. Exploration into the causes of uncertainty in UDEC grain Boundary Models. Comput Geotech. 2017;82:110-23; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.10.003>.
12. Nicksiar M. Effective parameters on crack initiation stress in low porosity rocks. In: Department of civil and environmental engineering. Alberta: University of Alberta; 2013; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.007>.
13. Coggan J, Gao F, Stead D, Elmo D. Numerical modelling of the effects of weak immediate roof lithology on coal mine roadway stability. Int J Coal Geol. 2012;90-91:100-9; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.11.003>.
14. Gao F, Stead D, Kang H. Simulation of roof shear failure in coal mine roadways using an innovative UDEC trigon approach. Comput Geotech. 2014;61:33-41; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.04.009>.
15. Bai Q-S, Tu S-H, Zhang C, Zhu D. Discrete element modeling of progressive failure in a wide coal roadway from water-rich roofs. Int J Coal Geol. 2016;167:215-29; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.10.010>.
16. Gao F, Stead D, Coggan J. Evaluation of coal longwall caving characteristics using an innovative UDEC trigon approach. Comput Geotech. 2014;55:448-60; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.09.020>.
17. Li X, Ju M, Yao Q, Zhou J, Chong Z. Numerical investigation of the effect of the location of critical rock block fracture on crack evolution in a gob-side filling wall. Rock Mech Rock Eng. 2016;49(3):1041-58; Available from: <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0783-1>.
18. Zhang C, Mitra R, Oh J, Canbulat I, Hebblewhite B. Numerical analysis on mining-induced fracture development around river valleys. Int J Min Reclam Environ. 2018;32(7):463-85; Available from: <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1293495>.
19. Yao Q, Li X, Sun B, Ju M, Chen T, Zhou J, et al. Numerical investigation of the effects of coal seam dip angle on coal wall stability. Int J Rock Mech Min Sci. 2017;100:298-309; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2017.10.002>.
20. Wu W-d, Bai J-b, Wang X-y, Yan S, Wu S-x. Numerical study of failure mechanisms and control techniques for a gob-side yield pillar in the Sijiazhuang coal mine, China. Rock Mech Rock Eng. 2019;52(4):1231-45; Available from: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1654-3>.
21. Damjanac B, Board M, Lin M, Kicker D, Leem J. Mechanical degradation of emplacement drifts at Yucca Mountain-A modeling case study: Part II: Lithophysal. Int J Rock Mech Min Sci. 2007;44(3):368-99; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2006.07.010>.
22. Potyondy D. A grain-based model for rock: approaching the true microstructure, Proceedings of Conference A grain-based model for rock: Approaching the true microstructure; 2010. p. 225-34;.
23. Itasca Consulting Group. UDEC - Universal Distinct Element Code. Ver 7.0. Minneapolis. Itasca; 2019;.
24. Trueman R, Coulthard MA, Poulsen BA. Numerical methods for estimating the stability of unsupported spans for highwall mining. Proceedings of Conference Numerical methods for estimating the stability of unsupported spans for highwall mining, Montreal, 1996;.
25. Sinha S, Walton G. A study on Bonded Block Model (BBM) complexity for simulation of laboratory-scale stress-strain behavior in granitic rocks. Comput Geotech. 2020;118:103363; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103363>.
26. Le TD, Nguyen CT, Dao VC. Estimation of coal and rock mechanical properties for numerical modelling of longwall extraction, Inżynieria Mineralna - Journal of the Polish Mineral Engineering Society. 2020;46:41-7;.
27. Le TD, Oh J. Longwall face stability analysis from a discontinuum-Discrete Fracture Network modelling. Tunneling Undergr Space Technol. 2022;124:104480; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104480>.
28. Kazerani T, Yang ZY, Zhao J. A discrete element model for predicting shear strength and degradation of rock joint by using compressive and tensile test data. Rock Mech Rock Eng. 2012;45:695-709; Available from: <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0153-6>.
29. Gao F, Stead D, Elmo D. Numerical simulation of microstructure of brittle rock using a grain-breakable distinct element grain-based model. Comput Geotech. 2016;78:203-17; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.05.019>.
30. Oh J, Li Y, Mitra R, Canbulat I. A Numerical study on dilation of a saw-toothed rock joint under direct shear. Rock Mech Rock Eng. 2017;50(4):913-25; Available from: <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1142-6>.
31. Ulusay R, Hudson JA. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Ankara: International Society for Rock Mechanics; 2007;.
32. Potyondy DO, Cundall PA. A bonded-particle model for rock. Int J Rock Mech Min Sci. 2004;41(8):1329-64; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2004.09.011>.
33. Singh GSP, Singh UK. Numerical modeling study of the effect of some critical parameters on caving behavior of strata and support performance in a longwall working. Rock Mech Rock Eng. 2010;43(4):475-89; Available from: <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0061-1>.

Numerical modelling technique for rock mass in underground coal mine by using grain-based model

Tien Dung Le*



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

ABSTRACT

The stability of rock mass around longwall or excavation in underground coal mine is a prerequisite for the safe and continuous coal production. In practice, instability incidents commonly occur at longwall face or longwall roof that causes serious occupational injury or even death. Current research on the instability has not sufficiently interpreted the formation and propagation of rock mass failure, mostly due to the discontinuous, anisotropic, inhomogeneous and non-elastic nature of rock mass. To assist interpretation of the above stability behaviour, this paper presents a study to improve the numerical modelling technique of rock mass around longwall by using Grain-Based Model. The modelling technique uses Discrete Element Methods and the grain structure Voronoi. A procedure for calibrating rock properties in modelling technique is proposed and validated through application for field rock mass at Ha Lam coal mine, Quang Ninh province, Vietnam. The paper also presents a technique for selecting grain size and monitoring the modelling efficiently. The proposed procedure along with the modelling code are useful for investigation of rock mass around underground excavations from which technical solutions for safe and continuous production can be established.

Key words: Longwall, Rock mass, Numerical modelling, Discrete Element Methods, Grain-Based Model

Department of Underground Mining,
Faculty of Mining, Hanoi University of
Mining and Geology, Ha Noi 100000,
Vietnam

Correspondence

Tien Dung Le, Department of
Underground Mining, Faculty of Mining,
Hanoi University of Mining and Geology,
Ha Noi 100000, Vietnam

Email: t.d.le@humg.edu.vn

History

- Received: 04-11-2022
- Accepted: 22-02-2023
- Published: 15-4-2023

DOI : <https://doi.org/10.32508/stdjsee.v7i1.711>



Copyright

© VNUHCM Press. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



Cite this article : Le T D. Numerical modelling technique for rock mass in underground coal mine by using grain-based model. *Sci. Tech. Dev. J. - Sci. Earth Environ.*; 2023, 7(1):609-618.