

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT
BỘ MÔN ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH



BÁO CÁO HỌC THUẬT

**ĐẶC ĐIỂM PHÁ HỦY CỦA KHỐI ĐÁ XUYÊN
ĐẰNG HƯỚNG DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI ĐƠN
TRỰC**

NGƯỜI THỰC HIỆN: TS. BÙI VĂN BÌNH
BỘ MÔN ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH

HÀ NỘI, 6/2023

MỤC LỤC

1. GIỚI THIỆU CHUNG	5
1.1 Tình hình nghiên cứu trên Thế Giới	5
1.2. Tình hình nghiên cứu trong nước	10
1.3 Khái quát tính không đẳng hướng và các nghiên cứu	12
2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	15
2.1. Mô hình đá nguyên khối (BPM).....	16
2.2. Mô hình khe nứt trơn nhẵn (SJM)	18
2.3. Mô hình khối đá tổng hợp (SRM)	19
3. MỘT SỐ KẾT QUẢ MÔ HÌNH SỐ	19
3.1. Ứng xử cơ học của khối đá dưới các góc nghiên của khe nứt	20
3.2. Xác định các hằng số đàn hồi đẳng hướng ngang	24
3.3. Tiêu chuẩn bền cho đá xuyên đẳng hướng.....	26
4. KẾT LUẬN	31
5. TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	31

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1. Phân loại tính dị hướng (Ramamurthy, 1993).....	6
Hình 2. Các hệ khe nứt trong khối đá.....	8
Hình 3. Mô hình khái niệm vật liệu xuyên đẳng hướng.....	12
Hình 4. Sự thay đổi độ bền của đá với các góc nghiêng khác nhau của khe nứt (Jaeger, 1990)	14
Hình 5. Mô hình khối đá xuyên đẳng hướng (Tien và nnk., 2020)	19
Hình 6. Sự thay đổi tính chất cơ học với các góc nghiêng khe nứt: (a) UCS và (b) mô đun đàn hồi (Tien và nnk., 2020).	20
Hình 7. Sự phát triển khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng của kiểu phá hủy SS. 21	
Hình 8. Sự phát triển khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng của kiểu phá hủy SL. 22	
Hình 9. Sự phát triển khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng của kiểu phá hủy SP. 23	
Hình 10. Sự phát triển khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng của kiểu phá hủy M 24	
Hình 11. So sánh các kiểu phá hủy của nghiên cứu này với Tien và nnk., 2006; Cho và nnk., 2012 (Tien và nnk., 2020).	25
Hình 12. Mô đun đàn hồi tương ứng với các góc nghiêng của khe nứt	26
Hình 13. Ứng suất chính lớn nhất với các góc nghiêng khe nứt.....	27
Hình 14. Độ bền cắt của mặt yếu	28
Hình 15. Các tham số của tiêu chuẩn bền Hoek-Brown cho đá nguyên khối với góc nghiêng của khe nứt 0° và 90°	29
Hình 16. Kết quả mô hình số và tiêu chuẩn bền Tien và Kuo., 2001	30

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 1. Các tham số của mô hình hạt gắn kết và mô hình khe nứt tron nhẵn	16
Bảng 2. Tính chất cơ học của mô hình đá nguyên khối	17
Bảng 3. Các tham số hình học của của khối đá xuyên đẳng hướng.....	18
Bảng 4. Các tham số của khối đá xuyên đẳng hướng	25

TÓM TẮT

Các ứng xử cơ học của khối đá nứt nẻ chứa một hệ khe nứt được có tính xuyên đẳng hướng. Trong bài báo này, một loạt các mô phỏng số bằng phương pháp phần tử dòng hạt (PFC3D) đã được thực hiện để khảo sát ứng xử cơ học và các kiểu phá hủy của khối đá dưới các góc nghiêng khác nhau dựa trên thí nghiệm nén đơn trục và 3 trục. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng mối quan hệ giữa độ bền và góc nghiêng có dạng chữ “U”. Bốn kiểu phá hủy của đá đã được chỉ ra: Trượt hoặc phân tách cắt qua các khe nứt (SS), trượt dọc theo các khe nứt (SL), phân tách dọc theo các khe nứt (SP) và kiểu hỗn hợp (M). Phương pháp để xác định các tham số đặc trưng cũng như tiêu chuẩn bền cho khối đá xuyên đẳng hướng đã được tổng hợp và sử dụng trong nghiên cứu này.

1. Giới thiệu chung

Tính dị hướng của đá và khối đá là một trong những tính chất rất phức tạp trong cơ học đá và đá công trình. Nó đòi hỏi cần có nhiều nghiên cứu để làm sáng tỏ được ảnh hưởng của nó đến công tác xây dựng các công trình nhất là khi xây dựng các công trình ngầm. Do đó, từ trước tới nay đã có nhiều các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu vấn đề này.

1.1 Tình hình nghiên cứu trên Thế Giới

Các công trình nghiên cứu tính độ bền nén của đá bằng các thí nghiệm trong phòng điển hình như:

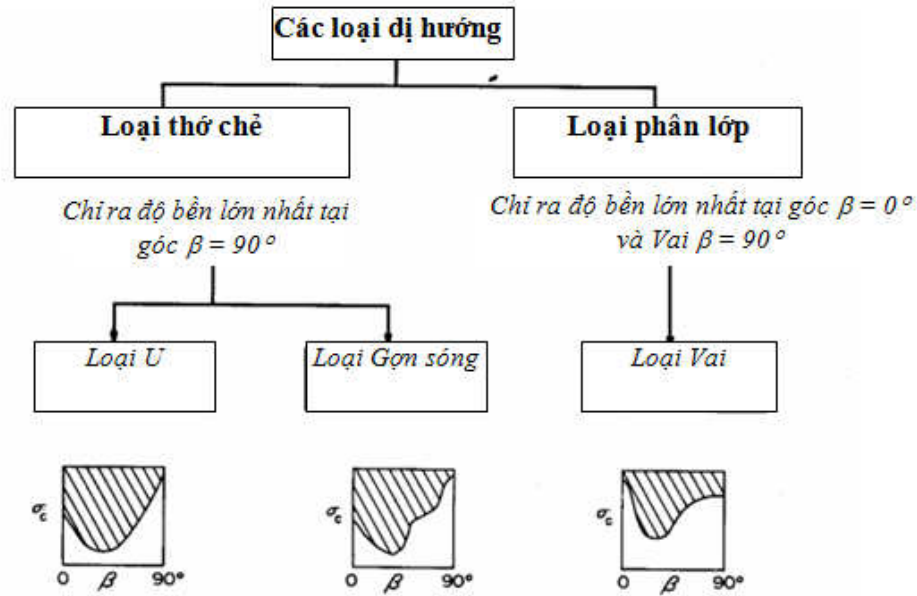
Các công trình nghiên cứu tính dị hướng độ bền của đá từ khá sớm được thực hiện bởi các nhà khoa như Jaeger (1960), Bray (1967), Walsh và Brace (1964), McLamore and Gray (1967), Hoek (1983) and Ramamurthy (1993).

Theo Ramamurthy (1993) tính dị hướng được thể hiện ở tính dị hướng độ bền và dị hướng biến dạng. Ông cho rằng có 2 loại dị hướng là dị hướng tự nhiên và dị hướng thứ sinh. Tính dị hướng tự nhiên được gây ra bởi các quá trình hình thành đá như trong các đá trầm tích phân lớp, và các đá phiến. Tính dị hướng thứ sinh được gây ra bởi quá trình thanh đới trạng thái ứng suất sau khi đá được hình thành và do quá trình phong hóa gây ra biểu hiện ở các đá bị nứt nẻ, các đới phá hủy kiến tạo.

Ramamurthy (1993) đã phân tính dị hướng thành 3 loại sau:

- Dị hướng loại U
- Dị hướng loại Vai
- Dị hướng loại hình sóng

Dị hướng loại U thường được gặp trong đá phiến mà có một loạt các bề mặt song song hoặc các mặt yếu như là nguồn của tính dị hướng. Dị hướng loại Vai được quan sát trong vật liệu như đá cát kết bởi vì tính tích tụ tự nhiên của chúng, và dị hướng hình sóng được quan sát trong than đá, diatomite và mô hình tường gạch trong đó sự hiện diện của nhiều mặt yếu được nhìn thấy cắt qua chúng.



Hình 1. Phân loại tính dị hướng (Ramamurthy, 1993)

E. Yasar (2001) nghiên cứu về sự phá hủy và các lý thuyết phá hủy của các đá dị hướng. Kết quả nghiên cứu trên các đá trầm tích thuộc hệ tầng Handere tuổi Miocene - Pliocene với các góc dị hướng khác nhau từ 0° đến 90° với khoảng tăng 10° nhằm xác định độ bền kháng nén theo các góc dị hướng và hệ số suy giảm modulus đàn hồi của đá dị hướng[1].

C.S.Shen và S.C.Hsu (2001) nghiên cứu về sự đo đạc độ bền kéo gián tiếp của các đá dị hướng bằng thí nghiệm Ring. Nghiên cứu trình bày một phương pháp mới, kết hợp với phương pháp phân từ biên phân tích và nén theo đường sinh trên một đĩa mỏng với một lỗ nhỏ ở tâm, thí nghiệm Ring, cho việc xác định độ bền kéo gián tiếp của các đá dị hướng. Nói chung, độ bền kéo cho các đá dị hướng được xác định bởi thí nghiệm Ring không là một hằng số nhưng tùy thuộc vào các tính chất đàn hồi của các đá, góc giữa bề mặt dị hướng của đá và hướng tải trọng tác dụng, đường kính của lỗ ở tâm và điều kiện tiếp xúc của tải trọng tác dụng [2].

Matti Hakala, Harri Kuula, John Hudson (2005) nghiên cứu tính dị hướng độ bền và biến dạng của đá Mica Gneiss ở Olkiluoto. Công tác khảo sát hiện trường cho các kho chứa rác phóng xạ nằm sâu tại Olkiluoto ở miền tây Phần Lan đã chỉ ra rằng các thành tạo biến chất mica Gneiss là có tính dị hướng. Tính dị hướng trong các giá trị

modulus đàn hồi của đá liên khối với một hệ số cao hơn 1.3 – 1.5 lần đã được báo cáo để có ảnh hưởng đến tầm quan trọng tính toán và các hướng của các thành phần ứng suất nguyên sinh[3].

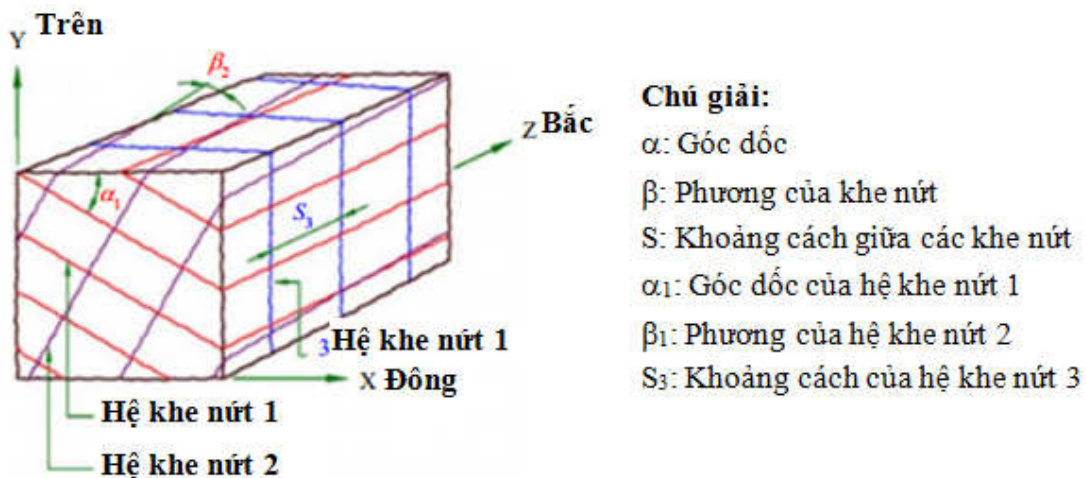
Kwasniewski.M (2009) đã tiến hành thí nghiệm và mô hình hóa tính dị hướng của độ bền kéo của các đá. Trong nghiên cứu, các kết quả thí nghiệm kéo xác định độ bền kéo và nén được tiến hành với các mẫu hình trụ của đá phân phiến và có tính dị hướng cao như đá phiến mica ở Zloty Stok ở núi Sudety phía Tây Nam Ba Lan. Các mẫu có đường kính 41.6mm được tiến hành kéo đơn trục trực tiếp và thí nghiệm nén đơn trục với các hướng khác nhau từ 0 đến 90°, với khoảng tăng 15° cho các bề mặt phân phiến. Trên cơ sở của các kết quả thí nghiệm đã đề xuất rằng sự thay đổi của độ bền kháng kéo đơn trục với hướng dốc của bề mặt phân phiến, với hệ số của tính dị hướng của độ bền kháng kéo đơn trục (k_T), đã định nghĩa như là hệ số của giá trị độ bền lớn nhất và nhỏ nhất, bằng 86,9. Mối quan hệ đã được thiết lập, mô hình tùy thuộc vào hướng của hế độ độ bền nén đơn trục và độ bền kéo ($z = \sigma_c / \sigma_T = f(\beta)$), với z giả thiết làm giá trị nhỏ nhất, bằng 7,4 cho hướng $\beta = 0^\circ$ và giá trị lớn nhất bằng 421,5 với $\beta = 90^\circ$ [4].

Mert Garagon, Tolga Can (2009) đã mô phỏng tính dị hướng độ bền trong thí nghiệm nén đơn trục của đá cát kết phân lớp mỏng sử dụng phân tích hội tụ đa biến. Trong nghiên cứu này, thí nghiệm nén đơn trục (UCS) được tiến hành để khảo sát ứng xử độ bền dị hướng của đá cát kết bị ép phiến được lựa chọn từ các trầm tích biển ở bồn trũng Neogene Adana phía Nam Thổ Nhĩ Kỳ. Các mẫu được chuẩn bị với các góc dị hướng (β) là 0°, 30°, 45°, 60° và 90°. Độ bền dị hướng loại U với hệ số dị hướng ($R_c = \sigma_{90} / \sigma_{\min}$) biến đổi trong khoảng 1.29 và 1.74 [5].

R.P Bewick (2009) nghiên cứu ảnh hưởng của tính dị hướng của khối đá đến sự ổn định của ông trình ngầm. Bài báo, nghiên cứu ảnh hưởng của đặc trưng cấu trúc như khe nứt, bề mặt phân lớp, quá trình dịch chuyển ứng suất trong khối đá và sự suy thoái của khối đá do quá trình thay đổi ứng suất. Ứng xử của khối đá tới thiết kế và sự sử dụng công cụ đơn giản để đánh giá ảnh hưởng của các đặc trưng cấu trúc tới ổn định hố đào. Từ công tác này, nhân tố suy giảm theo hướng dựa vào sự hiệu chỉnh yếu tố suy giảm ứng suất đã phát triển bởi Barton (1974) được đưa ra để hỗ trợ trong thiết kế công trình ngầm trong đá dị hướng [6]

Andrea Lisjack Bradley (2013) trong luận văn tiến sĩ đã khảo sát ảnh hưởng của tính dị hướng cơ học đến các ứng xử của đá phiến sét có tính dòn và bị nứt nẻ áp dụng cho các kho chứa nằm sâu. Đề tài nghiên cứu quá trình biến dạng và phá hủy của đá phiến sét, OPalinus clay, với trọng tâm chính là ảnh hưởng của tính dị hướng đến ứng xử ngắn hạn của các công trình ngầm tiết diện tròn. Để đạt được mục tiêu nghiên cứu, một phương pháp tiếp cận số lai ghép giữa liên tục và không liên tục được sử dụng kết hợp với các đo đạc ở hiện trường [6].

T.D.Y.F Simanjuntak, M. Marence, ntk (2014) đã nghiên cứu ảnh hưởng của tính dị hướng của khối đá đến tính biến dạng và ứng suất xung quanh công trình ngầm trong khi khai đào. Bài báo trình bày khái quát về phương pháp mô hình cho đường hầm tròn được đào trong khối đá khô, trong đó các trạng thái ứng suất tự nhiên là đồng nhất. Khối đá được giả sử là ứng xử đàn hồi và hai trường hợp được kiểm nghiệm: khối đá đàn hồi đẳng hướng và dị hướng. Mô hình biến dạng phẳng được sử dụng để nghiên cứu ứng xử của khối đá khi khai đào. Ứng xử đàn hồi của khối đá được bảo đảm trong mô hình bằng lực dính kết tương đương. Nghiên cứu chỉ ra rằng sự phân bố của ứng suất gây ra do khai đào và biến dạng trong khoảng không xung quanh khối đá có tính không đẳng hướng khác với trạng thái ứng suất biến dạng dưới điều kiện đẳng hướng[7]



Hình 2. Các hệ khe nứt trong khối đá

C.Y Kim, K.Y. Kim, ntk đã phân tích độ hội tụ của đường hầm trong khối đá không đồng nhất, dị hướng. Trong bài báo, trình bày ảnh hưởng của sự không đồng nhất/ bất đẳng hướng của vùng đá yếu hội tụ xung quanh công trình ngầm. Mô hình phần tử hữu

hạn 3 chiều của các vùng đá yếu khác nhau, chiều dày, hướng của công trình ngầm được tiến hành và các tham số cần thiết được đánh giá từ các kết quả. Các kết quả được so sánh với kết quả quan trắc từ đường hầm Alpine trong đá dị hướng. Mỗi quan hệ chất lượng tốt giữa xu hướng quan trắc ở hiện trường và kết quả số hóa đưa ra triển vọng rằng việc xác định thông thường của các tham số cần thiết trong khi đào một phòng điều kiện ban đầu của khối đá của bề mặt công trình ngầm có thể được cải thiện. Chuyển vị xung quanh công trình ngầm bị ảnh hưởng mạnh mẽ bởi vùng yếu nhỏ hoặc lớn cũng như mức độ nứt nẻ và đới đứt gãy, đôi khi vùng trượt[8].

Majid Noorian Bidgoli, Lanru Jing, (2014) đã nghiên cứu tính dị hướng độ bền và biến dạng của các đá nứt nẻ. Sự dị hướng của ứng xử độ bền và biến dạng của khối đá nứt nẻ là vấn đề vô cùng quan trọng cho thiết kế và các đánh giá ổn định của các cấu trúc công trình đá, do chủ yếu là các yếu tố hình học không đồng nhất và bất thường của các hệ thống khe nứt. Tuy nhiên, không đủ các nỗ lực đã được làm để nghiên cứu vấn đề này bởi vì ngày nay không thể thí nghiệm trong phòng với các mẫu kích thước lớn chứa đựng nhiều khe nứt, và sự khó khăn cho việc điều khiển sự tin tưởng vào điều kiện ban đầu và điều kiện biên cho mẫu tỷ lệ lớn trong thí nghiệm hiện trường. Do đó, một phương pháp mô hình số tin cậy cho việc đánh giá tính dị hướng của khối đá nứt nẻ là cần thiết. Đối tượng của nghiên cứu này là nghiên cứu một cách có hệ thống tính dị hướng của độ bền và biến dạng của đá nứt nẻ, mà đã không được thực hiện trong quá khứ, sử dụng phương pháp mô hình số. Một loạt các mô hình hệ thống khe nứt không liên tục 2 chiều đáng tin cậy đã được thiết lập dựa vào các tài liệu khảo sát hiện trường, trong đó nó phải chịu tải trọng tác dụng theo các hướng khác nhau, sử dụng phần mềm UDEC mô hình phân tử rời rạc (DEM), với sự thay đổi áp lực hông. Kết quả số hóa chỉ ra rằng đường bao độ bền và tham số biến dạng đàn hồi của các mô hình số có tính dị hướng cao, và thay đổi với sự thay đổi của tải trọng dọc trục và áp lực hông. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng cho công tác thiết kế và các đánh giá an toàn của các công trình trong đá, sự đang dạng của các hướng của độ bền và biến dạng của khối đá nứt nẻ có liên quan phải được xử lý thích hợp về các hướng của ứng suất trong tự nhiên [9].

B. AMADEI, Int.J. Rock mech (1996) chỉ ra tầm quan trọng của tính dị hướng khi ước tính và đo đạc các ứng suất hiện trường trong các đá. Các đá biến chất phân phiến

và phân lớp, phân tầng hoặc các đá trầm tích phân lớp có các tính chất (vật lý, động học, nhiệt, cơ học và thủy động lực) mà thay đổi theo hướng và được gọi là dị hướng. Khối đá dị hướng có thể được tìm thấy trong các hệ tầng núi lửa và đá trầm có nhiều lớp xen kẽ nhau hoặc chứa đựng các lớp đá khác nhau. Khối đá bị chia cắt bởi các khe nứt là dị hướng và không liên tục. Bài báo này giải quyết chủ đề tính dị hướng của đá và ứng suất của đá. Nghiên cứu chỉ ra rằng sự phân bố ứng suất xung quanh các hố đào tùy thuộc vào các tính chất đàn hồi của đá nếu đá có tính dị hướng. Các ứng suất đàn hồi trong môi trường dị hướng là tương đối khác với các ứng suất trong môi trường đẳng hướng[10].

Diego Lope Aslvarez (2012) trong luận văn thạc sĩ của mình, tác giả đã nghiên cứu các giới hạn của đường cong phản ứng của nền cho các đường hầm nằm nông trong điều kiện ứng suất hiện trường có tính dị hướng cao. Mục tiêu của nghiên cứu là để khảo sát những thiếu sót của đường cong phản ứng của nền cho công trình ngầm nằm nông và hệ số ứng suất tự nhiên cao. Cốt đề khảo sát điều này, một phân tích phần tử rời rạc mô hình 2D được tiến hành bởi phần mềm UDEC 5.0. Trong phân tích này, một đường hầm được đặt tại 4 độ sâu khác nhau với vài hệ số ứng suất ban đầu khác nhau được phân tích đầu tiên. Sau đó, các đường cong phản ứng của nền được hiển thị và phân tích chi tiết. Sự khảo sát liên quan đến khả năng xác định các công thức thực nghiệm để ước tính chuyển vị cuối cùng của công trình ngầm và của mặt đất theo các điều kiện đó. Nghiên cứu chỉ ra rằng vấn đề nhận được từ các đường cong phản ứng nền trong công trình ngầm nằm nông rất phức tạp. Trong trường hợp điều kiện ứng suất hiện trường đẳng hướng, kết quả được đưa ra bởi giải pháp phân tích cung với mô hình số tại độ sâu hơn 14 lần bán kính của công trình ngầm. Nói theo cách khác, sự khác nhau giữa các giải pháp số học và phân tích trở lên cao hơn trong khi sự tăng lên của hệ số ứng suất hiện trường thậm chí cho công trình ngầm nằm rất sâu. Kết luận của nghiên cứu này là giải pháp phân tích không được sử dụng cho các trường ứng suất dị hướng và các công trình ngầm nằm nông [11].

1.2. Tình hình nghiên cứu trong nước

Ở nước ta, việc nghiên cứu tính chất cơ học của đá cũng đạt được những thành tựu nhất định. Hầu hết các nghiên cứu đi sâu đánh giá tính chất cơ học của đá nhằm phục

vụ cho công tác xây dựng các công trình thủy điện và công trình mỏ. Các công trình nghiên cứu điển hình như:

Lương Lăng, Nguyễn Quang Phích 1974, các tác giả đã nghiên cứu và đưa ra được một số kết quả nghiên cứu tính chất cơ học của đá cát bột kết của một số mỏ vùng Quảng Ninh. Nghiên cứu đã đánh giá được tính chất cơ học của các loại đá nghiên cứu và xác định mô hình cơ học của chúng, thông qua đó xác định các thông số của mô hình phụ vụ cho công tác thiết kế công trình.

Nguyễn Quang Phích, Dương Đức Hùng 1997, dựa vào kết quả thí nghiệm nén đơn trục với tốc độ biến dạng không đổi, các tác giả đã phân tích mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của đá bằng mô hình lưu biến giảm bền nhằm xác định các thông số của mô hình.

Đình Quốc Quân đã nghiên cứu thí nghiệm Brazilian cho đá dị hướng để xác định cường độ kháng kéo của đá. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng cường độ kháng kéo trong thí nghiệm Brazilian ảnh hưởng lớn bởi đặc tính phân lớp của đá dị hướng nhưng ít ảnh hưởng đối với đá đồng nhất. Cường độ kéo của đá cát kết FG.Ss có độ lệch chuẩn thấp và hệ số phân tán nhỏ 13%, ngược lại đá gneiss và phiến sét có độ lệch chuẩn lớn và hệ số phân tán lớn (31%, 26% và 61% lần lượt cho đá gneiss FG.Gs, Le.Gs và phiến sét My.Sc). Độ phân tán càng lớn chứng tỏ ảnh hưởng của mức độ dị hướng càng lớn.

Cấu trúc mặt phân lớp ảnh hưởng lớn hơn thế nằm đối với đá gneiss và phiến sét. Khác biệt trong kết quả thí nghiệm cường độ kéo cho đá dị hướng có thể lên tới 2.65 đến 5.24 lần đối với đá gneiss và đá phiến sét phụ thuộc vào cấu trúc phân lớp và thế nằm. Từ kết quả nghiên cứu khuyến nghị tiến hành thí nghiệm Brazilian cho các mẫu đá có tính dị hướng cao cần lưu ý đến cấu trúc phân lớp và thế nằm thực tế của mẫu đá. Từ đó có thể diễn giải kết quả thí nghiệm chính xác. Thông qua biểu đồ tương quan hệ số mức độ dị hướng cho phép xây dựng hệ số chuẩn dùng làm tham chiếu đối với các kết quả ở các góc phân lớp và góc gia tải khác từ kết quả thí nghiệm đối với các góc cơ bản thường theo phương trục giao hay song song.

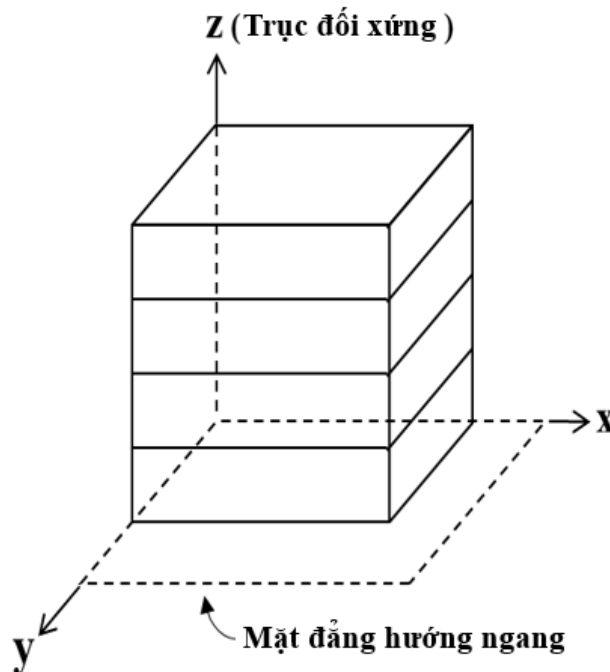
Ngoài các nghiên cứu kể trên, còn có rất nhiều các nghiên cứu khác. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu cũng chỉ được thực hiện trên một số loại đá ở một khu vực cụ

thể. Bên cạnh đó, hiện nay vẫn chưa có một nghiên cứu cụ thể nào về tính chất cơ học cho đá vôi C – P hệ tầng Bắc Sơn ở khu vực Cẩm Phả, Quảng Ninh. Các nghiên cứu phần lớn mang tính chất cục bộ trong quá trình khảo sát xây dựng, phần lớn chủ yếu nhằm đánh giá độ bền nén một trục của đá. Do đó, cần phải nghiên cứu đầy đủ, cụ thể về tính chất cơ học của đá vôi C – P hệ tầng Bắc Sơn ở khu vực Cẩm Phả, Quảng Ninh. Việc nghiên cứu tính chất của đá vôi trên máy nén 3 trục cho phép phản ánh đúng điều kiện làm việc của đá ở thực tế khi xây dựng công trình.

1.3 Khái quát tính không đẳng hướng và các nghiên cứu

Vật liệu xuyên đẳng hướng là vật liệu có các đặc tính vật lý đối xứng trục mà trục đối xứng là pháp tuyến của mặt đẳng hướng ngang. Mặt đẳng hướng ngang này có vô số mặt đối xứng, trong mặt phẳng này các tính chất của vật liệu là giống nhau theo mọi hướng, như hình 3. Các loại đá đẳng hướng ngang phổ biến bao gồm cát kết, bột kết, đá phiến, đá phiến và đá phiến sét, hoặc đá khối chứa một hệ khe nứt.

Vật liệu xuyên đẳng hướng có năm hằng số đàn hồi độc lập (E, E', ν, ν', G') và quan hệ giữa ứng suất và biến dạng được biểu diễn trong công thức 1.



Hình 3. Mô hình khái niệm vật liệu xuyên đẳng hướng

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu'}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E} & \frac{-\nu'}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G'} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G'} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

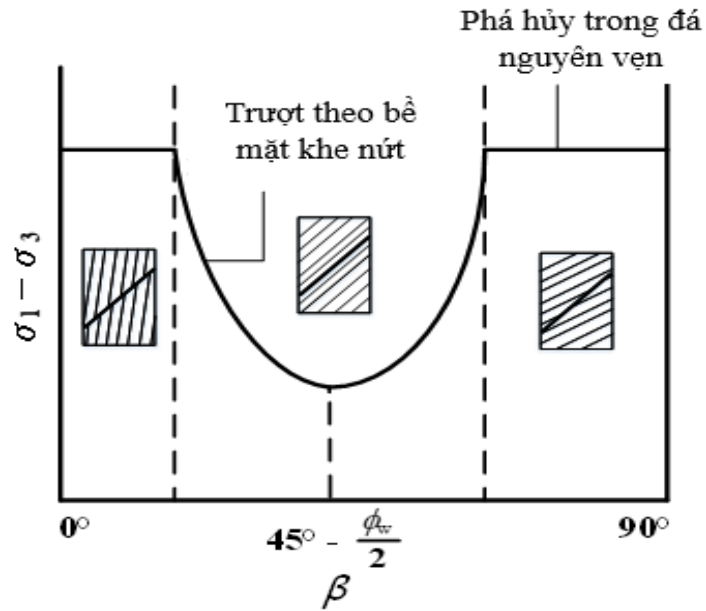
Trong công thức, E và E' là môđun Young của mặt phẳng đẳng hướng ngang và hướng pháp tuyến của nó;

ν, ν' là tỷ số Poisson của mặt phẳng đẳng hướng ngang và hướng vectơ pháp tuyến của nó;

G là môđun cắt của mặt phẳng đẳng hướng ngang ($G = E / 2 (1 + \nu)$);

G' là môđun cắt của mặt phẳng trục giao với mặt phẳng đẳng hướng ngang.

Trong cơ học đá công trình, việc xác định các tham số cơ học hợp lý của đá và khối đá là một nhiệm vụ đầy thách thức. Thực tế, các khối đá trong tự nhiên luôn cho thấy tính bất đẳng hướng về độ bền. Trong quá khứ, nhiều các tác giả đã nỗ lực để làm sáng tỏ tính bất đẳng hướng độ bền cũng như các tiêu chuẩn phá hủy của đá xuyên đẳng hướng. Dựa vào lý thuyết mặt yếu đơn hoặc các yếu song song, Jaeger., 1990 đã đề xuất tiêu chuẩn phá hủy cho khối đá xuyên đẳng hướng với hai kiểu phá hủy độc lập: phá hủy dọc theo các mặt không liên tục và kiểu phá hủy trong đá nguyên vẹn. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng độ bền của đá xuyên đẳng hướng thay đổi với sự thay đổi của góc dốc của khe nứt, như hình 4.



Hình 4. Sự thay đổi độ bền của đá với các góc nghiêng khác nhau của khe nứt (Jaeger, 1990)

Tien và Kuo., 2001 đã đề xuất một tiêu chuẩn phá hủy mới cho đá xuyên đẳng hướng dựa vào hai kiểu phá hủy: trượt dọc theo bề mặt không liên tục và không trượt, trong đó sự phá hủy bị chi phối bởi vật liệu đá. Tiêu chuẩn phá hủy này đã dự đoán chính xác tính dị hướng của đá phiến, đá phiến sét và đá phiến gneiss, etc.

Vervoort và nnk., 2014 đã khảo sát ứng xử của đá xuyên đẳng hướng bằng thí nghiệm Brazilian. Lee và Pietruszczak., 2015 đề xuất tiêu chuẩn phá hủy kéo 3D cho đá xuyên đẳng hướng trong đó, điều kiện phá hủy liên quan đến 3 tham số độ bền và sử dụng một tensor bậc 2 để mô tả phân phối không gian của độ bền kéo.

Gần đây với sự phát triển của khoa học máy tính, các phương pháp mô hình số đã được sử dụng để khảo sát ứng xử cơ học của đá và khối đá. Một trong số đó là phương pháp phần tử rời rạc (DEM). Phương pháp này đã chỉ ra sự hiệu quả trong việc mô phỏng quá trình phá hủy của mẫu đá. Potyondy và cundall., 2004 đã đề xuất mô hình hạt gắn kết (BPM) để mô phỏng đá nguyên khối. Trong đó, đá nguyên khối được đại diện bởi một tập hợp các hạt hình cầu không đồng đều về kích thước được gắn kết với nhau tại các tiếp điểm của chúng. Gần đây hơn, nhiều học giả đã kết hợp giữa mô hình các hạt được gắn kết (BPM) và mô hình khe nứt tron nhẵn (SJM) để mô phỏng ứng xử cơ học

và cơ chế phá hủy của khối đá nứt nẻ. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu tập trung vào mô hình 2D. Thực tế, có một số ít học giả sử dụng mô hình 3D với giả thuyết các khe nứt là liên tục để mô phỏng ứng xử của khối đá nứt nẻ.

Park và nnk, 2015 & 2018 đã sử dụng phương pháp phần tử rời rạc trong môi trường 2D và 3D kết hợp với mô hình khe nứt trơn nhẵn để mô phỏng ứng xử cơ học của đá xuyên đẳng hướng. Từ việc so sánh giữa các kết quả từ mô phỏng và thí nghiệm trong phòng trên 3 loại đá (gneiss, đá phiến sét và đá phiến), họ đã chỉ ra rằng phương pháp số phù hợp để ước lượng các tham số đàn hồi và độ bền của đá xuyên đẳng hướng. Pouragha và nnk., 2020 đã nghiên cứu mối tương quan giữa tính đàn hồi và các đặc điểm độ bền của đá xuyên đẳng hướng. Họ đã đề xuất một quy trình giải tích để ước lượng độ bền bất đẳng hướng của đá.

Việc xác định sự bất đẳng hướng về độ bền của khối đá với một tỷ lệ thực trong thực hành cơ học đá công trình làm một thách thức lớn. Bởi vì các thông tin về các đặc điểm khe nứt nhận được từ các thí nghiệm hiện trường luôn chứa đựng những sự không chắc chắn. Do đó, thật khó khăn để chỉ ra các tham số thiết kế. Trong bài báo này, chúng tôi kết hợp phương pháp phần tử rời rạc và mô hình khe nứt trơn trượt để mô phỏng khối đá xuyên đẳng hướng. Trong đó, các khe nứt được phát sinh một cách ngẫu nhiên dựa vào phân phối của các tham số hình học của khe nứt. Kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng để giải thích các cơ chế phá hủy của khối đá xuyên đẳng hướng dưới tải trọng đơn trục và 3 trục.

2. Phương pháp nghiên cứu

Trong thực tế, để mô phỏng khối đá nứt nẻ nứt nẻ, mô hình khối đá tổng hợp thường được sử dụng. Khối đá tổng hợp được hình thành từ sự kết hợp của mô hình đá nguyên khối và mô hình khe nứt. Trong nghiên cứu này, mô hình khối đá tổng hợp được tạo ra từ mô hình hạt gắn kết và mô hình khe nứt trơn nhẵn (SJM). Phương pháp phần tử dòng hạt (PFC3D) dựa trên phương pháp phần tử rời rạc (DEM) được sử dụng trong nghiên cứu này.

2.1. Mô hình đá nguyên khối (BPM)

Mô hình hạt gắn kết được đề xuất bởi Potyondy và Cundall., 2004 dựa vào mô hình khái niệm coi vật liệu là một tập hợp các hạt hình cầu không đồng nhất về kích thước được gắn kết tại các tiếp điểm của chúng. Sự gắn kết tại vị trí tiếp xúc giữa các hạt, trong khi phá hủy có thể xảy ra khi sự gắn kết giữa các hạt phải chịu một lực giới hạn nào đó. Lực và moment được cập nhập sau mỗi chu kỳ tính toán. Do đó, mô hình này có lợi ích vượt trội trong việc mô tả các phá hủy vi cấu trúc. Sự phá hủy ban đầu và sự phân bố các khe nứt có thể được ghi nhận tự động trong khi mô phỏng.

Trong nghiên cứu này, mô hình đá nguyên khối được tạo ra trong môi trường PFC3D (Itasca Inc, 2014). Mô hình gắn kết tuyến tính song song được sử dụng để mô phỏng sự làm việc của vật liệu gắn kết giữa các hạt. Mẫu đá nguyên khối có hình dạng lăng trụ với kích thước $1.5 \times 1.5 \times 3.0 \text{m}^3$. Các tính chất vi cấu trúc của mô hình gắn kết giữa các hạt được mô tả trong bảng 1. Các tính chất cơ học của đá nguyên vẹn được trình bày ở bảng 2.

Bảng 1. Các tham số của mô hình hạt gắn kết và mô hình khe nứt trơn nhẵn

Mô hình	Các tham số	Giá trị
Mô hình hạt gắn kết song song	Khối lượng riêng, (kg/m^3)	2650
	Độ lỗ rỗng, ρ	0.2
	Bán kính hạt nhỏ nhất (m)	0.036
	Tỷ số bán kính hạt, R_{\max}/R_{\min}	1.65
	Mô đun của hạt, E^* (GPa)	2.5
	Tỷ số giữa độ cứng hướng pháp tuyến và tiếp tuyến của hạt, k_n/k_s	4.0
	Hệ số ma sát, μ	0.577

	Mô đun của vật liệu gắn kết song song, \bar{E}^* (GPa)	2.5
	Tỷ số giữa độ cứng hướng pháp tuyến và tiếp tuyến của vật liệu gắn kết, \bar{k}_n/\bar{k}_s	4.0
	Độ bền kéo, $\bar{\sigma}_c$ (MPa)	5.0
	Độ bền cắt, $\bar{\tau}_c$ (MPa)	25
Khe nứt tron nhẵn	Độ cứng pháp tuyến trên đơn vị diện tích, sk_n (N/m/m ²)	5.63×10^9
	Độ cứng tiếp tuyến trên đơn vị diện tích, sk_s (N/m/m ²)	1.05×10^9
	Lực dính kết, c	0.0
	Hệ số ma sát, μ	0.50
	Độ bền kéo, σ_c (MPa)	0.0

Bảng 2. Tính chất cơ học của mô hình đá nguyên khối

Tính chất cơ học	Giá trị
Độ bền kháng nén đơn trục (MPa)	22.22
Mô đun đàn hồi, E_{50} (GPa)	4.81
Hệ số Poisson, ν	0.24

2.2. Mô hình khe nứt tron nhãn (SJM)

Mô hình khe nứt tron nhãn mô phỏng ứng xử của bề mặt tiếp xúc bằng cách gán mô hình gắn kết hoặc không gắn kết cho các tiếp điểm giữa các hạt. Các tiếp điểm đó có tâm của các hạt cầu nằm trên hai mặt đối diện của khe nứt. Ứng xử cơ học của các vật liệu gắn kết được gán bởi mô hình khe nứt tron nhãn là đàn hồi đẳng hướng với trạng thái gắn kết yếu hoặc không gắn kết tùy thuộc vào trạng thái khe nứt thực tế. Ứng xử của một bề mặt tiếp xúc không gắn kết là đàn hồi tuyến tính với phá hủy trượt tuân theo định luật Coulomb. Để gán mô hình khe nứt tron nhãn cho khối đá, đầu tiên các bề mặt hoặc các khe nứt được chèn vào trong khối đá. Sau đó, các tiếp điểm của các hạt mà có tâm của hai hạt cầu nằm trên hai mặt đối diện của khe nứt sẽ được gán với mô hình khe nứt tron nhãn. Ứng xử vĩ mô của khe nứt được điều khiển bởi các tính chất vi mô của mô hình. Các tính chất vi cấu trúc của mô hình khe nứt tron nhãn được trình bày trong bảng 1. Trong bài báo này, mô hình mạng lưới khe nứt rời rạc (DFN) được tạo ra dựa vào các tham số hình học của hệ khe nứt như hướng khe nứt, mật độ khe nứt và kích thước khe nứt. Trong mô hình DFN, hình dạng khe nứt được giả sử là các đĩa hình tròn. Vì vậy, thuật ngữ đường kính khe nứt được sử dụng để thay thế cho kích thước khe nứt. Để hiểu rõ hơn về ứng xử cơ học của khối đá xuyên đẳng hướng, mô hình DFN được tạo ra với kích thước $1.5 \times 1.5 \times 3.0 \text{ m}^3$. Các tham số quan trọng bao gồm góc nghiêng của khe nứt (β), mật độ khe nứt (P_{32}), đường kính khe nứt (D) và hằng số Fisher được chỉ ra trong bảng 3. Thuật ngữ góc nghiêng (β) ở đây được định nghĩa như là góc giữa khe nứt và hướng tải trọng tác dụng.

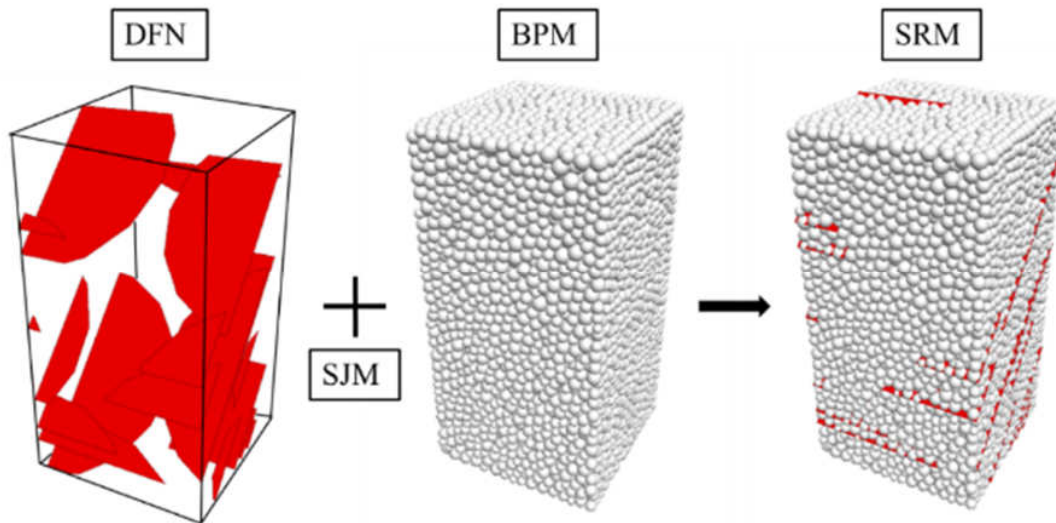
Bảng 3. Các tham số hình học của của khối đá xuyên đẳng hướng

Tham số	Giá trị
Thể tích mẫu, V (m^3)	$1.5 \times 1.5 \times 3$
Góc nghiêng khe nứt, β ($^\circ$)	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90
Mật độ khe nứt, P_{32} (m^2/m^3)	1
Đường kính khe nứt, D (m)	2

Hằng số Fisher, κ	∞
--------------------------	----------

2.3. Mô hình khối đá tổng hợp (SRM)

Khối đá xuyên đẳng hướng được tạo ra bởi sự kết hợp giữa mô hình khối đá nguyên vẹn và mô hình mạng lưới khe nứt rời rạc (DFN), như hình 3. Trong đó, các tiếp điểm của các cặp hạt nằm trên hai mặt đối diện của các khe nứt trong mô hình DFN được gán bởi mô hình khe nứt trơn nhẵn. Các tính chất vi cơ học của mô hình khối đá nguyên vẹn và mô hình khe nứt trơn nhẵn được trình bày trong bảng 1. Như đã đề cập bên trên, kích thước của khối đá xuyên đẳng hướng với kích thước $1.5 \times 1.5 \times 3.0 \text{ m}^3$ được sử dụng trong nghiên cứu này. Mô hình DFN cho khối đá xuyên đẳng hướng được tạo ra với 7 góc nghiêng của khe nứt ($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ và 90°). Sau khi khối đá xuyên đẳng hướng được tạo ra, các thí nghiệm đơn nén đơn trục và 3 trục được mô phỏng trong PFC3D để khảo sát ứng xử cơ học, kiểu phá hủy cũng như sự phát triển của các khe nứt mới.



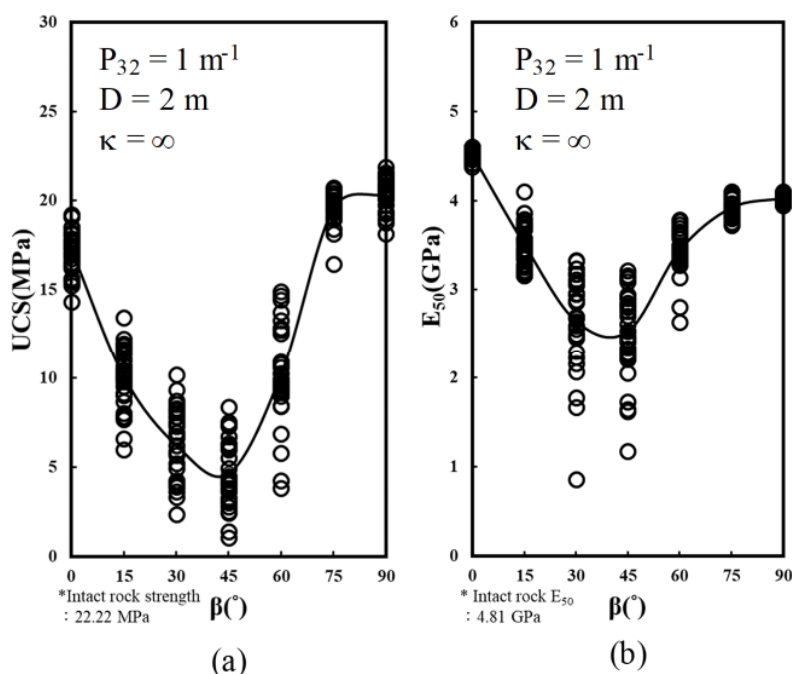
Hình 5. Mô hình khối đá xuyên đẳng hướng (Tien và nnk., 2020)

3. Một số kết quả mô hình số

Các kết quả mô hình thí nghiệm nén đơn trục và 3 trục khối đá xuyên đẳng hướng được thực hiện dưới các góc nghiêng của khe nứt nhằm khảo sát sự biến đổi các tính chất cơ học của khối đá dưới tác dụng của các hướng tải trọng tác dụng.

3.1. Ứng xử cơ học của khối đá dưới các góc nghiêng của khe nứt

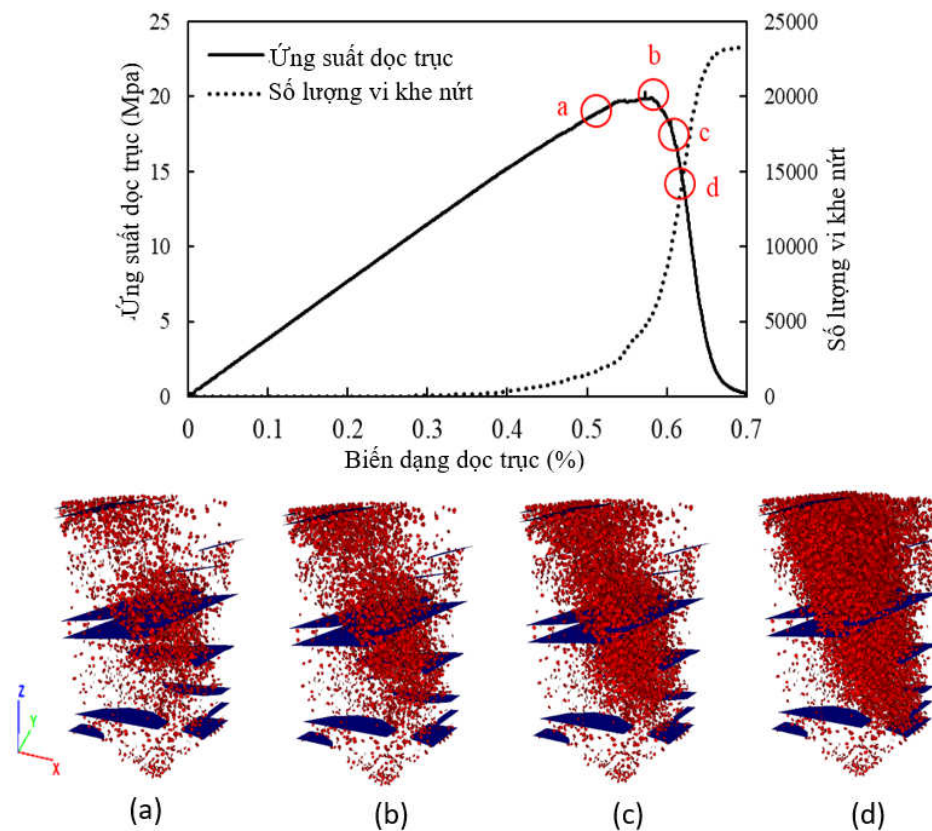
Để khảo sát ứng xử cơ học của khối đá xuyên đẳng hướng, chúng tôi đã thực hiện mô phỏng thí nghiệm nén đơn trục. Các tham số hình học của mô hình DFN bao gồm đường kính khe nứt (D) 2m, mật độ khe nứt (P_{32}) $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 7 góc nghiêng của khe nứt (β) từ 0° đến 90° với khoảng cách 15° . Để loại bỏ tính chủ quan trong mô phỏng, chúng tôi sử dụng 30 mẫu ngẫu nhiên của mô hình khối đá xuyên đẳng hướng tương ứng với mỗi góc nghiêng của khe nứt. Kết quả của mô hình số chỉ ra rằng sự bất đẳng hướng đàn hồi và độ bền của khối đá xuyên đẳng hướng phụ thuộc vào hướng của lực tác dụng so với hướng góc nghiêng của khe nứt. Sự thay đổi độ bền nén đơn trục (UCS) và mô đun đàn hồi (E_{50}) với sự thay đổi của góc nghiêng có dạng chữ “U”, như đã chỉ ra trong hình 6. Hình vẽ này chỉ ra rằng mẫu với góc nghiêng (β) bằng 0° và 90° có độ bền nén đơn trục và mô đun đàn hồi lớn nhất. Sự biến thiên của giá trị độ bền nén đơn trục và mô đun đàn hồi là nhỏ nhất. Trong khi, mẫu với góc nghiêng từ 30° - 60° có giá trị độ bền nén đơn trục và mô đun đàn hồi nhỏ nhất. Sự biến thiên của các giá trị độ bền nén đơn trục và mô đun đàn hồi là rất lớn.



Hình 6. Sự thay đổi tính chất cơ học với các góc nghiêng khe nứt: (a) UCS và (b) mô đun đàn hồi (Tien và nnk., 2020).

Từ sự phát triển của các vi khe nứt trong quá trình tác dụng tải trọng và các kiểu phá hủy của khối đá tương ứng với các góc nghiêng của khe nứt, các kiểu phá hủy của khối đá xuyên đặng hướng dưới tải trọng nén có thể được chia ra làm 4 loại như sau:

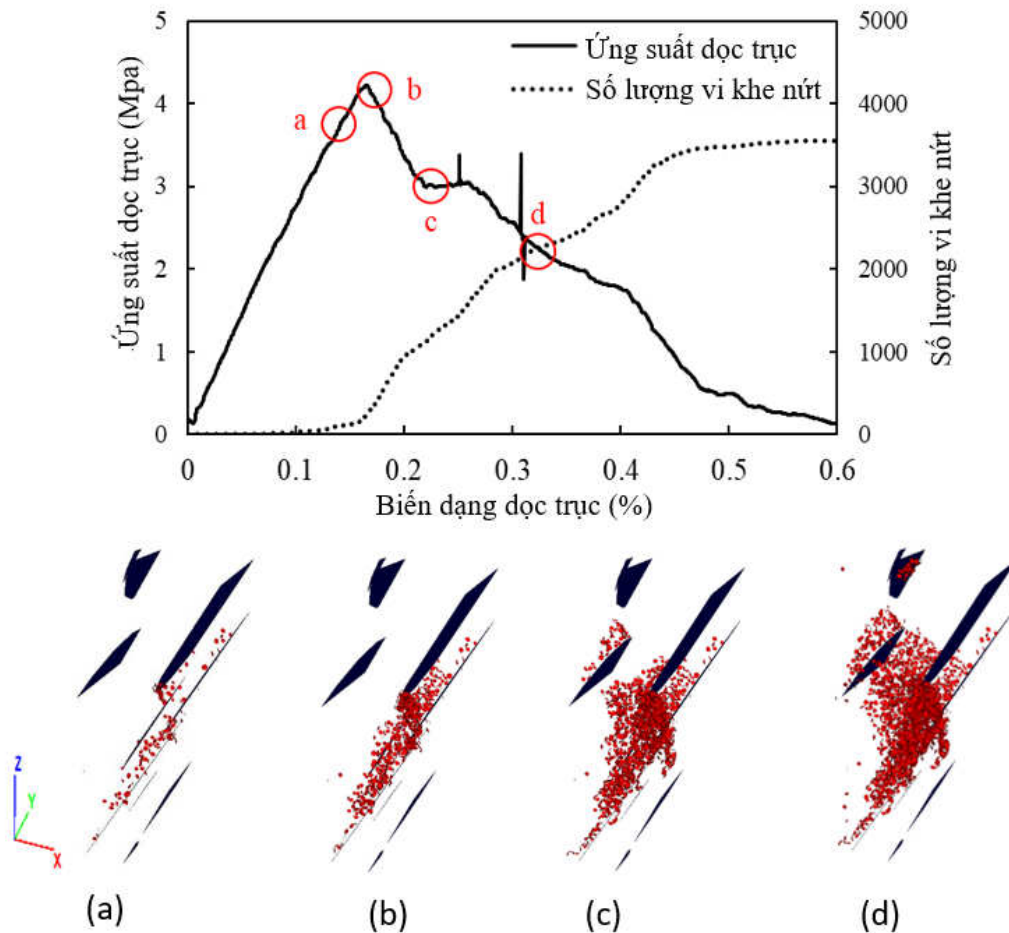
Kiểu trượt hoặc tách cắt qua các khe nứt có sẵn (SS): Trong kiểu phá hủy này, các vi khe nứt phát triển trong đá nguyên khối và liên kết với nhau để tạo thành mặt phá hủy. Hướng của mặt phá hủy tương đối trực giao với các khe nứt có sẵn. Kiểu phá hủy này xảy ra với góc nghiêng của khe nứt từ 75° - 90° . Mối quan hệ giữa sự phát triển của các vi khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng được trình bày trong hình 7.



Hình 7. Sự phát triển khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng của kiểu phá hủy SS.

Kiểu trượt dọc theo khe nứt có sẵn (SL): Các vi khe nứt phát triển theo hướng song song với hướng của các khe nứt có sẵn. Các khe nứt phát triển dần dần và liên kết với với các khe nứt sẵn có để hình thành bề mặt phá hủy. Khối đá bị phá hủy bằng cách

trượt theo bề mặt phá hủy đó, như đã chỉ ra trong hình 6. Kiểu phá hủy này hầu hết xảy ra khi các góc nghiêng (β) của khe nứt từ $15^\circ - 60^\circ$.

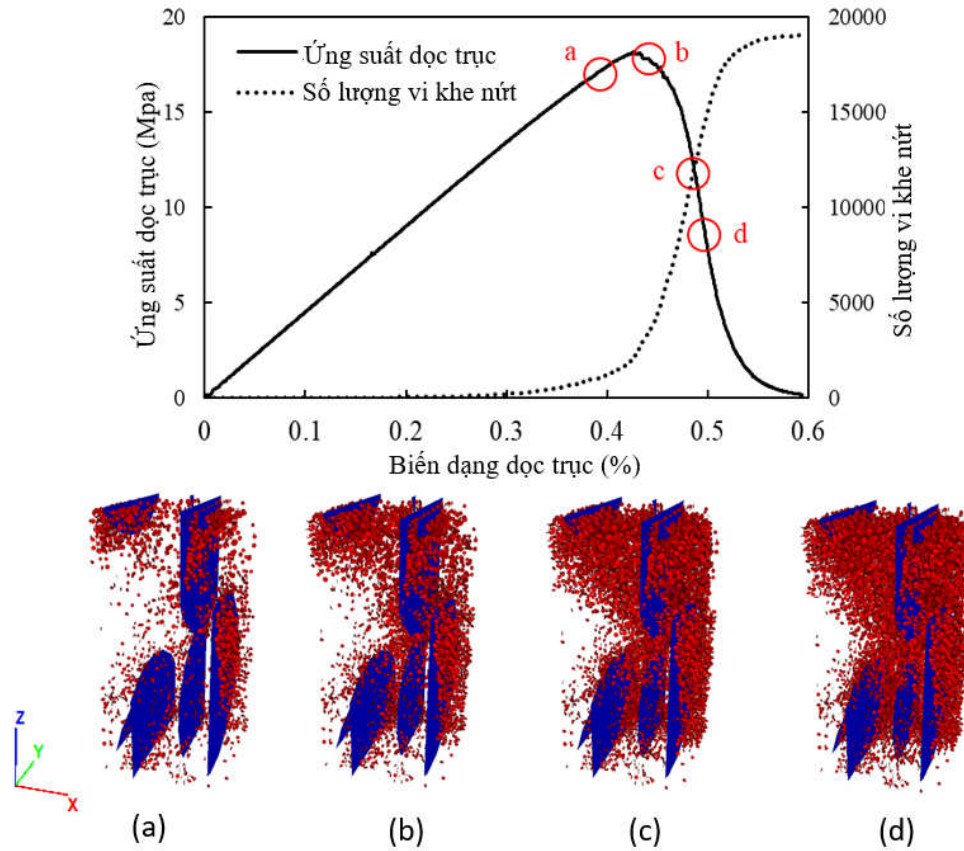


Hình 8. Sự phát triển khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng của kiểu phá hủy SL.

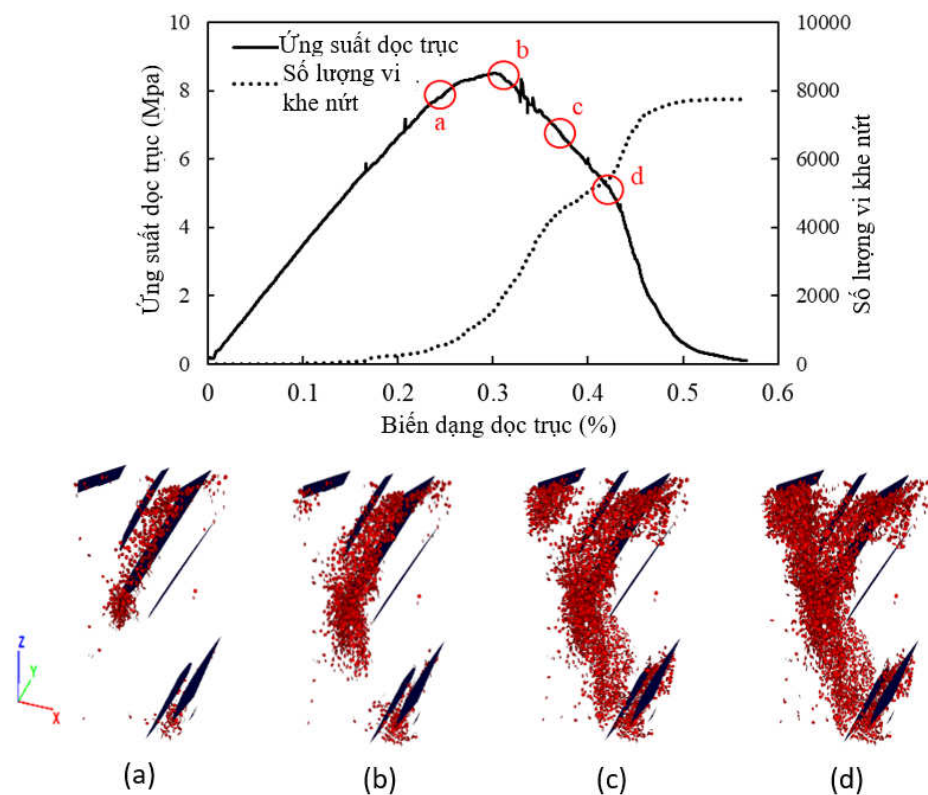
Kiểu tách dọc theo các khe nứt sẵn có (SP): Trong kiểu này các vi khe nứt phát triển hoàn toàn trong đá nguyên khối. Do các khe nứt có sẵn có phương thẳng đứng nên hướng phát triển của các vi khe nứt bị chi phối mạnh mẽ bởi các khe nứt có sẵn, như hình 9. Kết quả là, phá hủy xảy ra dưới dạng tách dọc theo các khe nứt sẵn có. Kiểu phá hủy này được quan sát tương ứng với góc nghiêng của khe nứt bằng 0° .

Kiểu hỗn hợp (M): Xảy ra khi kiểu phá hủy bao gồm cả trượt và xuyên cắt hoặc trượt và tách cùng tồn tại. Nó thường xảy ra trong khối đá với góc nghiêng của khe nứt 15° và 75° . Sự phát triển khe nứt tương ứng với các giai đoạn tác dụng của tải trọng trong kiểu phá hủy này được trình bày trong hình 10. Các kiểu phá hủy của khối đá

xuyên đấng hướng dựa trên mô hình số khá phù hợp với các kết quả thí nghiệm của Tien và nnk., 2006 và Cho và nnk., 2012, như đã chỉ ra trong hình 11.



Hình 9. Sự phát triển khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng của kiểu phá hủy SP



Hình 10. Sự phát triển khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng của kiểu phá hủy M

3.2. Xác định các hằng số đàn hồi đẳng hướng ngang

Đối với khối đá xuyên đẳng hướng, năm thông số đàn hồi độc lập (E , ν , E' , ν' , G') đại diện cho các tính chất cơ học của nó. Năm thông số này có thể được xác định dựa vào phương pháp của Amadei (1983) thông qua thí nghiệm nén đơn trục với các góc nghiêng khác nhau của khe nứt bao gồm 0° , 45° và 90° . Từ mẫu có góc nghiêng của khe nứt $\beta = 90^\circ$, có thể thu được E' và ν' theo phương vuông góc với mặt đẳng hướng ngang; và thí nghiệm trên mẫu có góc nghiêng $\beta = 45^\circ$ để xác định mô đun trượt G' . Giá trị E và ν của mặt đẳng hướng ngang có thể thu được dựa vào thí nghiệm nén đơn trục trên mẫu có góc nghiêng khe nứt $\beta = 0^\circ$. Dựa vào kết quả mô hình số, các tham số cơ học của khối đá xuyên đẳng hướng được xác định như trong bảng 4. Từ các tham số cơ học của khối đá xuyên đẳng hướng, chúng ta có thể dễ dàng tính toán được sự biến đổi

của mô đun đàn hồi dưới sự thay đổi của các góc nghiêng khác nhau dựa vào phương pháp giải tích như công thức 2 (Amadei, 1983).

$$E_z = \frac{1}{\frac{\sin^4 \beta}{E} + \frac{\cos^4 \beta}{E'} + \frac{\sin^2 2\beta}{4} \left(-\frac{2\nu'}{E'} + \frac{1}{G'}\right)} \quad (2)$$

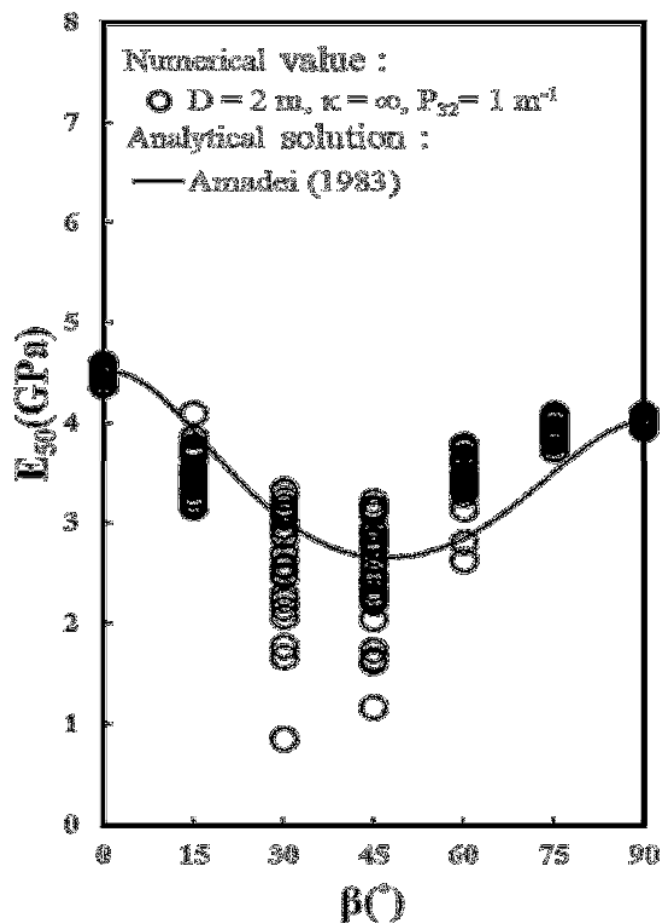
Kết quả của phương pháp số và phương pháp giải tích về giá trị E_{50} là tương đối phù hợp, như đã trình bày ở hình 12. Nó có thể chỉ ra rằng phương pháp số phù hợp để mô phỏng ứng xử của đá xuyên đẳng hướng.

β°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Tien et al. (2006)							
Cho et al. (2012)							
This study Fracture Parameter : $K = 90$ $P_{32} = 1 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ $D = 2 \text{ (m)}$	 SP	 SL	 SL	 SL	 M	 SS	 SS

Hình 11. So sánh các kiểu phá hủy của nghiên cứu này với Tien và nnk., 2006; Cho và nnk., 2012 (Tien và nnk., 2020).

Bảng 4. Các tham số của khối đá xuyên đẳng hướng

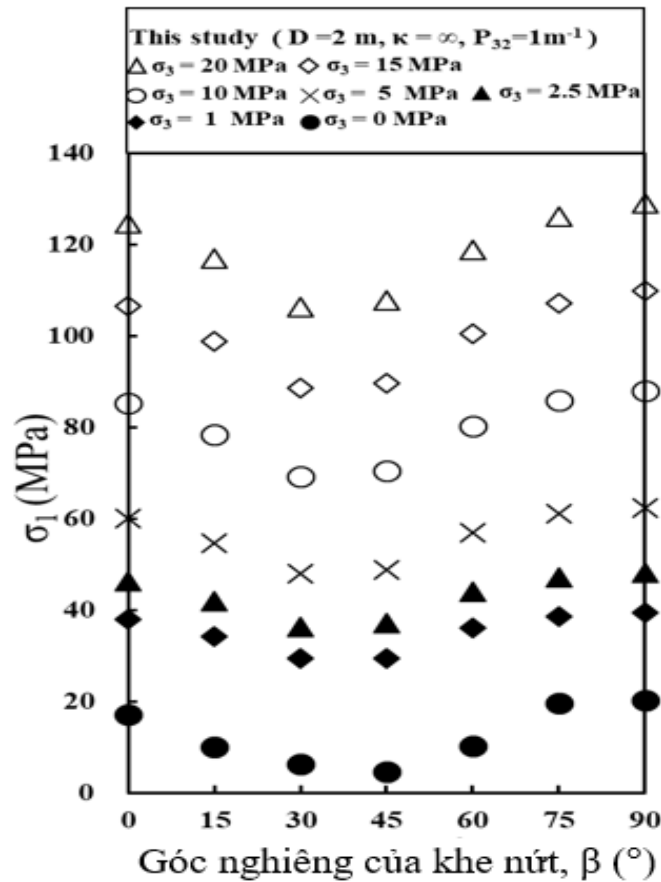
Mô hình số	E (GPa)	E' (GPa)	ν	ν'	G' (GPa)
	4.03	4.52	0.21	0.41	0.82



Hình 12. Mô đun đàn hồi tương ứng với các góc nghiêng của khe nứt

3.3. Tiêu chuẩn bền cho đá xuyên đẳng hướng

Trong nghiên cứu này, mô hình thí nghiệm nén 3 trục sẽ được thực hiện cho khối đá xuyên đẳng hướng với các áp lực hông (σ_3) lần lượt là 0, 1, 2.5, 5, 10, 15, 20 Mpa. Kết quả thí nghiệm nén 3 trục trên khối đá xuyên đẳng hướng được thể hiện trên hình 11. Kết quả mô hình số cho thấy rằng, độ bền nén 3 trục lớn nhất thu được tương ứng với góc nghiêng của khe nứt 0° , 75° và 90° , trong khi độ bền nén nhỏ nhất tương ứng với các góc nghiêng 30° - 45° . Mối quan hệ giữa độ bền nén 3 trục và góc nghiêng của khe nứt có dạng chữ “U”, như hình 13. Sự biến thiên về giá trị độ bền nén 3 trục giảm dần với sự tăng lên của áp lực hông. Với áp lực hông bằng 0 Mpa, độ biến thiên của giá trị độ bền nén 3 trục là lớn nhất.



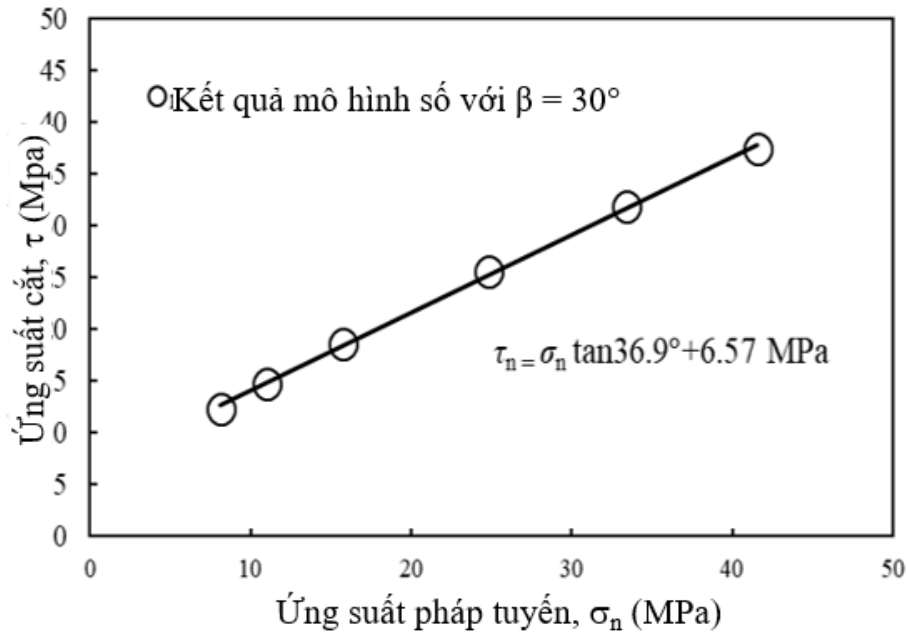
Hình 13. Ứng suất chính lớn nhất với các góc nghiêng khe nứt

Trong nghiên cứu này, phương pháp ứng suất chính lớn nhất được đề xuất bởi Tien và Kuo., 2001 được sử dụng để xác định các đặc trưng tiêu chuẩn bền của khối đá xuyên đẳng hướng. Tiêu chuẩn bền Tien và Kuo., 2001 có tổng cộng 7 tham số, chúng có thể được xác định thông qua 4 loạt thí nghiệm nén 3 trục với các góc nghiêng của khe nứt lần lượt là 0° , 30° , 75° và 90° . Tiêu chuẩn này dựa trên 2 kiểu phá hủy là kiểu trượt theo bề mặt yếu (sliding) (để xác định C_w và ϕ_w) và kiểu phá hủy không trượt (non-sliding) (để xác định các tham số của đá nguyên khối $\sigma_c(0^{\circ})$, $\sigma_c(90^{\circ})$, $m(0^{\circ})$, $m(90^{\circ})$ và giá trị n). Các tham số được xác định như sau:

Tính chất bề mặt yếu (ϕ_w và C_w):

Sử dụng thí nghiệm 3 trục trên mẫu khối đá xuyên đẳng hướng với góc nghiêng của khe nứt là 30° để xác định giá trị C_w và ϕ_w tương ứng với kiểu phá

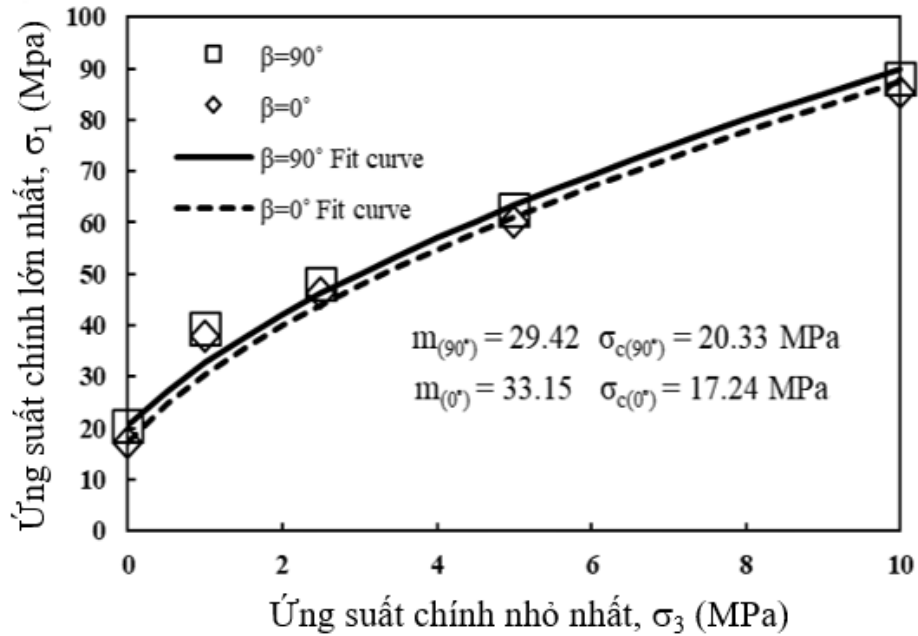
hủy trượt dọc theo bề mặt yếu. Giá trị C_w và ϕ_w được xác định đại diện cho lực dính kết và góc ma sát trên bề mặt yếu, như hình 14.



Hình 14. Độ bền cắt của mặt yếu

Thông số vật liệu đá ($\sigma_c (0^\circ)$, $\sigma_c (90^\circ)$, $m (0^\circ)$, $m (90^\circ)$):

Các tham số độ bền dựa vào tiêu chuẩn bền Hoek và Brown cho khối đá được xác định từ thí nghiệm 3 trục với các góc nghiêng 0° và 90° . Theo Hoek và Brown., 1980, các gợi ý cho việc lựa chọn áp lực hông và xác định các tham số đã được đề xuất. Ít nhất 2 loạt thí nghiệm nén 3 trục với các áp lực hông khác nhau được sử dụng để xác định. Áp lực hông được cân nhắc sử dụng trong khoảng từ 0-5Mpa. Các tham số độ bền Hoek và Brown tương ứng với góc nghiêng của khe nứt 0° và 90° được trình bày trong hình 15.



Hình 15. Các tham số của tiêu chuẩn bền Hoek-Brown cho đá nguyên khối với góc nghiêng của khe nứt 0° và 90° .

Xác định tham số dị hướng (n):

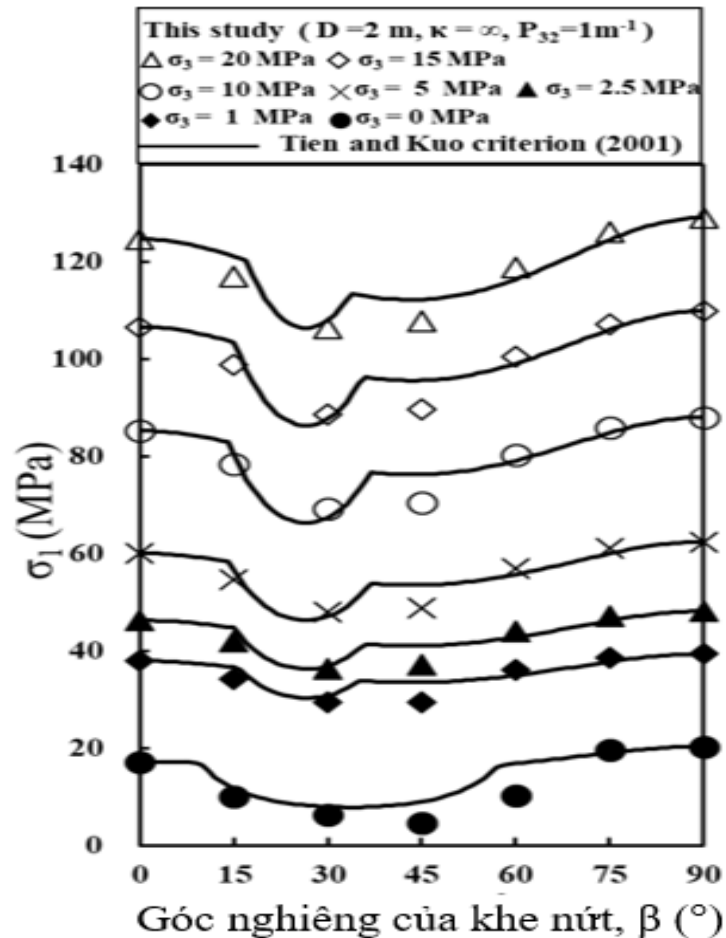
Tham số dị hướng của khối đá xuyên đẳng hướng (n) là một tham số mới được đề xuất bởi Tien và Kuo., 2001. Nó có thể được xác định dựa vào kết quả thí nghiệm 3 trục với góc nghiêng của khe nứt là 75° hoặc 90° .

Bảng 5. Các tham số của tiêu chuẩn bền Tien và Kuo., 2001

K ết quả từ mô hình số	ϕ_w	C_w	σ_c	σ_c	m	m	n
			(0°)	(90°)	(0°)	(90°)	
	36.	6.	17.	20.	33.	29.	1.
	9°	57	24	33	15	42	29

Chú ý : đơn vị của C_w , $\sigma_c(0^\circ)$, $\sigma_c(90^\circ)$ (Mpa)

Bảng tham số yêu cầu cho việc mô tả tiêu chuẩn bền của đá xuyên đẳng hướng theo đề xuất của Tien và Kuo., 2001 đã được trình bày trong bảng 5. Hình 16 chỉ ra kết quả mô hình số và tiêu chuẩn bền của đá xuyên đẳng hướng Tien và Kuo., 2001. Vì tiêu chuẩn bền này phân biệt các kiểu phá hủy thành kiểu trượt (sliding) và không trượt (non-sliding), nên tương ứng với các kiểu phá hủy khác nhau, một điểm ngoặt sẽ được tạo ra trong đường cong độ bền nén 3 trục với sự thay đổi của góc nghiêng khe nứt. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng khối đá xuyên đẳng hướng tại các áp lực hông và góc nghiêng khác nhau trong bài báo này rất phù hợp với các kết quả nhận được từ biện pháp giải tích Tien và Kuo.



Hình 16. Kết quả mô hình số và tiêu chuẩn bền Tien và Kuo., 2001

4. Kết luận

Phương pháp phần tử rời rạc (PFC3D) và mô hình khe nứt tron nhẵn đã được sử dụng để tạo ra khối đá xuyên đẳng hướng. Các ứng xử cơ học của đá xuyên đẳng hướng, kiểu phá hủy và tiêu chuẩn bền cho nó đã được trình bày. Kết quả mô hình số đã chỉ ra mô đun đàn hồi, độ bền nén đơn trục thay đổi với sự thay đổi của góc nghiêng khe nứt. Quan hệ giữa mô đun đàn hồi, độ bền nén và góc nghiêng khe nứt có dạng chữ "U". Bốn kiểu phá hủy của đá xuyên đẳng hướng dưới tải trọng nén đã được chỉ ra: Kiểu phá hủy trượt dọc theo khe nứt có sẵn (SL) thường được ghi nhận với mẫu có góc nghiêng khe nứt từ 15-60°; kiểu trượt hoặc tách cắt qua các khe nứt có sẵn (SP) xảy ra trong mẫu với góc nghiêng 0-15°; kiểu tách dọc theo các khe nứt sẵn có (SP) với mẫu góc nghiêng 75-90°; và kiểu hỗn hợp với mẫu có góc nghiêng 15 và 75°.

Kết quả mô hình hóa cũng đã giúp chúng ta thấy được các tham số đặc trưng của đá xuyên đẳng hướng và tiêu chuẩn bền của chúng. Kết quả mô hình số phù hợp với kết quả nhận được từ các phương pháp giải tích đã được đề xuất trong quá khứ. Qua đây có thể khẳng định rằng, phương pháp phần tử rời rạc (PFC3D) có thể sử dụng để mô phỏng các ứng xử phức tạp của khối đá.

5. Tài liệu tham khảo

1. Failure and failure theories for anisotropic rocks, E Yasar, 17th international mining congress and exhibition of Turkey – IMCET 2001.
2. Measurement of indirect tensile strength of anisotropic rocks by the ring test, C.S. Shen and S.C.Hsu, Rock mechanics and rock engineering, 2001.
3. Strength and strain anisotropy of OLKILUOTO mica gneiss, Matti Hakala, Harri Kuula, John Hudson, Working report, 2005
4. Testing and modeling of the anisotropy of tensile strength of rocks, Kwasniewski.M, Proceedings of the international conference on rock joints and jointed rock masses, Tucson, Arizona, USA 2009.
5. Predicting the strength anisotropy in uniaxial compression of some laminated sandstones using multivariate regression analysis, Mert Garagon, Tolga Can, 2009.

6. Influence of rock mass anisotropy on tunnel stability, R.P Bewick 2009, Proceeding of the 3rd CANUS Rock mechanics symposium, Toronto.
7. Investigating the influence of mechanical anisotropy on the fracturing behavior of brittle clay shales with application to deep geological repositories, Andrea Lisjack Bradley, Dissertation of Degree of Doctor of Philosophy graduate department of civil engineering university of Toronto, 2013
8. Effects of rock mass anisotropy on deformations and stresses around tunnels during Excavation. T.D.Y.F Simanjuntak, M. Marence, nnk 2014, Dams in a global environmental challenges, Bali, Indonesia.
9. Tunnel convergence analyses in heterogeneous/ anisotropic rock masses, C.Y Kim, K.Y. Kim, etc
10. Anisotropy of strength and deformability of fractured rocks, Majid Noorian Bidgoli, Lanru Jing, 2014. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.
11. Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock, B. AMADEI, Int.J. Rock mech. Min. Sci and Geomech. Vol 33, 1996.
12. Limitations of the ground reaction curve concept for shallow tunnels under anisotropic in-situ stress conditions, Diego Lope Aslvarez, Master of science thesis in soil and rock mechanics Stockholm, Sweden, 2012.
13. Nguyễn Quang Phích, 2007. Cơ học đá. NXB Xây dựng;
14. Nghiêm Hữu Hạnh, 2004. Cơ học đá. NXB Xây dựng;
15. Lương Lãng, Nguyễn Quang Phích, 1974. Một số kết quả nghiên cứu các tính chất cơ học của đá vùng Quảng Ninh. Tạp chí khoa học kỹ thuật, số 12/1974.
16. Nguyễn Quang Phích, Dương Đức Hùng, 1997. Phân tích quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của đá khi nén đơn trục với tốc độ biến dạng không đổi bằng mô hình lưu biến giảm bền. Tuyển tập các công trình khoa học, tập 26. ĐH Mỏ - Địa chất.
17. Đinh Quốc Quân. Thí nghiệm Brazilian cho đá dị hướng: Cường độ kéo tách.
18. Itasca Consulting Group Inc. 2014. PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions). Version 5. 0. Minneapolis, MN: ICG.

19. Ivars, D.M., D.O. Potyondy, M. Pierce, and P.A. Cundall. 2008. The Smooth-Joint Contact Model. *In Proceedings of the 8th World Congress on Computational Mechanics and 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Venice, July 2008*. In Press.
20. Jaeger, J.C. 1960. Shear failure of anisotropic rocks. *Geological Magazine*. 97(1): 65-72.
21. Lee, Y.K., and S. Pietruszczak. 2015. Tensile failure criterion for transversely isotropic rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*. 79: 205-215.
22. Lee, Y.K., and S. Pietruszczak. 2008. Application of critical plane approach to the prediction of strength anisotropy in transversely isotropic rock masses. *Int J Rock Mech Min Sci*. 45: 513-523.
23. Liao, J.J., M.T. Yang, and H.Y. Hsieh. 1997. Direct tensile behavior of a transversely isotropic rock. *Int J Rock Mech Min Sci*. 34: 837-849.
24. Park, B., K.B. Min, N. Thompson, and P. Horsrud. 2018. Three-dimensional bonded-particle discrete element modeling of mechanical behavior of transversely isotropic rock. *Int J Rock Mech Min Sci*. 110: 120-132.
25. Park, B., and K.B. Min. 2015. Bonded-particle discrete element modeling of mechanical behavior of transversely isotropic rock. *Int J Rock Mech Min Sci*. 76: 243-255.
26. Potyondy, D.O., and P.A. Cundall. 2004. A bonded-particle model for rock. *Int J Rock Mech Min Sci*. 41(8): 1329–64.
27. Pouragha, M., M. Eghbalian, and R. Wan. 2020. Micromechanical correlation between elasticity and strength characteristics of anisotropic rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*. 125: 104154.
28. Tien, Y.M., M.C. Kuo, and C.H. Juang. 2006. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*. 43: 1163-1181.

29. Tien, Y.M., and M.C. Kuo. 2001. A failure criterion for transversely isotropic rocks. *Int J Rock Mech Min Sci.* 38: 399-412.
30. Tien, Y. M., V. B. Bui, C. H. Liu, and C. H. Juang. "Numerical modeling of mechanical behaviors of fractured transversely isotropic rock masses." In *54th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. OnePetro, 2020.
31. Vervoort, A., K.B. Min, H. Konietzky, J.W. Cho, B. Debecker, Q.D. Dinh, T. Frühwirt, and A. Tavallali. 2014. Failure of transversely isotropic rock under Brazilian test conditions. *Int J Rock Mech Min Sci.* 70: 343-352.