

MÔ HÌNH HÓA ỨNG XỬ CƠ HỌC CỦA KHỐI ĐÁ XUYÊN ĐẲNG HƯỚNG

Bùi Văn Bình*

Trường Đại học Mỏ - Địa chất

Tóm tắt

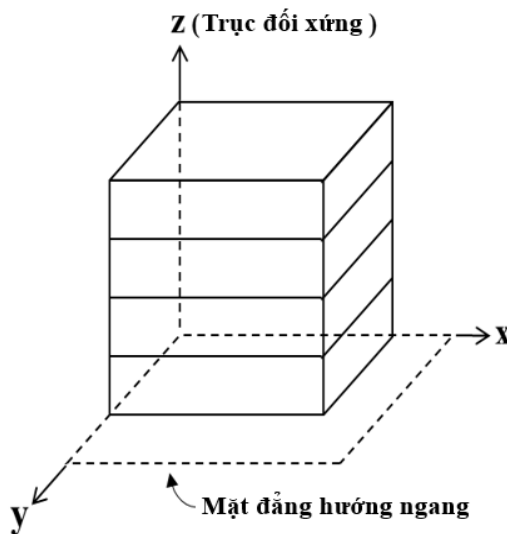
Các ứng xử cơ học của khối đá nứt nẻ chứa một hệ khe nứt được có tính xuyên đẳng hướng. Trong bài báo này, một loạt các mô phỏng số bằng phương pháp phần tử dòng hạt (PFC3D) đã được thực hiện để khảo sát ứng xử cơ học và các kiểu phá hủy của khối đá dưới các góc nghiêng khác nhau dựa trên thí nghiệm 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.

Từ khóa: Khối đá xuyên đẳng hướng; phần tử rời rạc; khối đá tổng hợp; tiêu chuẩn bền

1. Giới thiệu chung

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 1. 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 1. Mô hình khái niệm vật liệu xuyên đẳng hướng

* Ngày nhận bài: 12/3/2022; Ngày phản biện: 06/4/2022; Ngày chấp nhận đăng: 10/4/2022

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

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

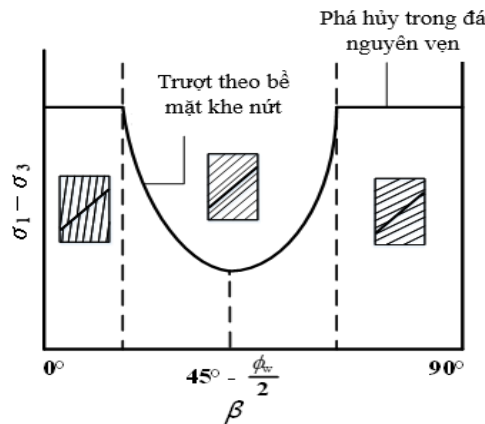
Trong công thức, E và E' là mô đun Young của mặt phẳng đẳng hướng ngang và hướng pháp tuyến của nó;

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 mô đun cắt của mặt phẳng trực 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 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 2.



Hình 2. 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 trơn 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, 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 nhật 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)	2.650
	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, E* (GPa)	2.5
	Tỷ số giữa độ cứng hướng pháp tuyến và tiếp tuyến của vật liệu gắn kết, k _n /k _s	4.0
	Độ bền kéo, σ _c (MPa)	5.0
	Độ bền cắt, τ _c (MPa)	25
Khe nứt trơn 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 trơn nhẵn (SJM)

Mô hình khe nứt trơn nhẵn 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 trơn nhẵn 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 trơn nhẵn 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 trơn nhẵn. 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 trơn nhẵn 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 1.5×1.5×3.0m³. Các tham số quan trọng bao gồm góc nghiêng của khe nứt (β), mật độ khe nứt (P₃₂), đường kính

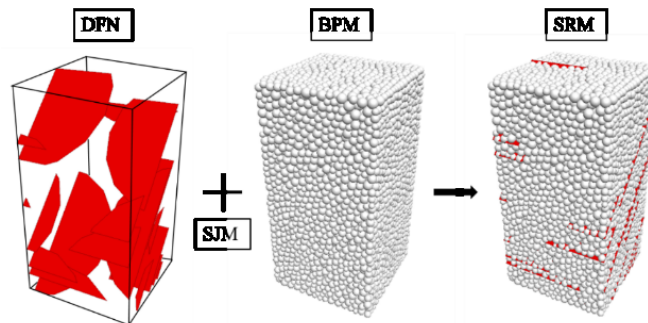
khe nứt (D) và hằng số Fisher được chỉ ra trong bảng 3. Thuật ngữ góc nghiêng (β) ở đây được định nghĩa như là góc giữa khe nứt và hướng tải trọng tác dụng.

Bảng 3. Các tham số hình học của 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 $1.5 \times 1.5 \times 3.0 m^3$ 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° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° 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 3. Mô hình khối đá xuyên đẳng hướng (Tien và nnk., 2020)

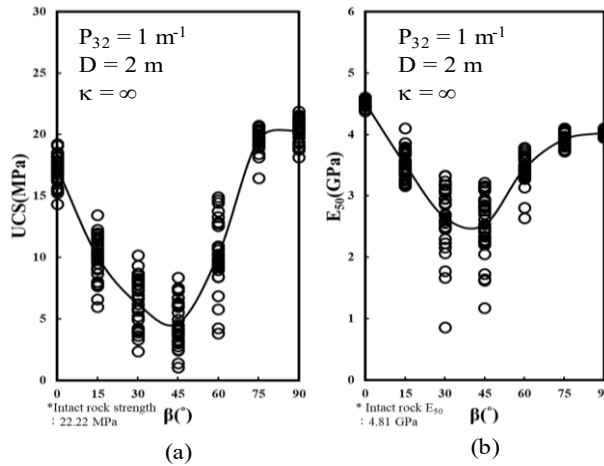
3. Một số kết quả mô hình số

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}) $1 m^2/m^3$, 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 4. Hình vẽ

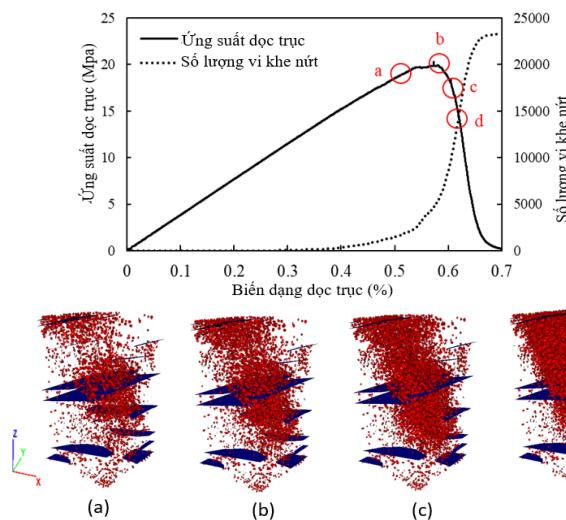
này chỉ ra rằng mẫu với góc nghiêng (β) bằng 0° và 90° có độ bền nén đơn trục và mô đun đàn hồi lớn nhất. Sự biến thiên của giá trị độ bền nén đơn trục và mô đun đàn hồi là nhỏ nhất. Trong khi, mẫu với góc nghiêng từ $30^\circ - 60^\circ$ có giá trị độ bền nén đơn trục và mô đun đàn hồi nhỏ nhất. Sự biến thiên của các giá trị độ bền nén đơn trục và mô đun đàn hồi là rất lớn.



Hình 4. 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).

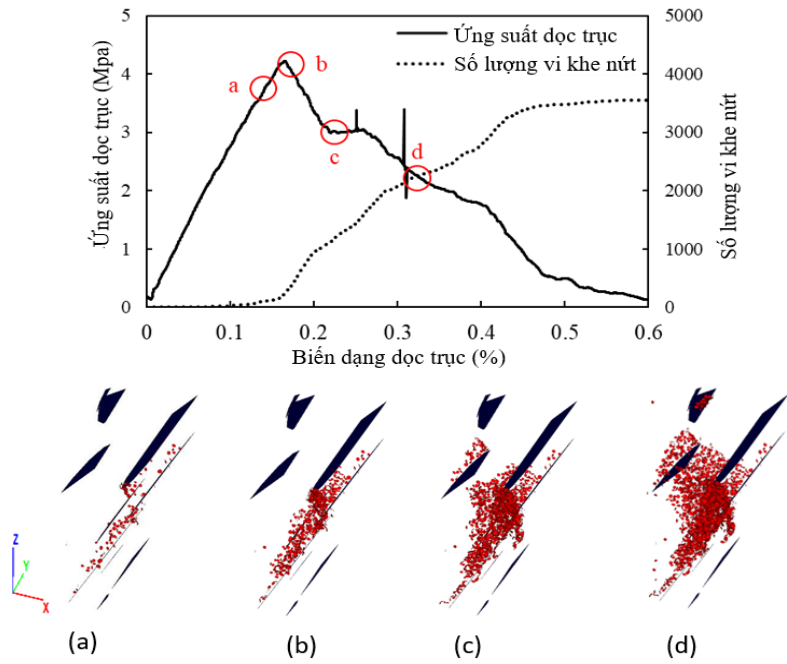
Từ sự phát triển của các vi khe nứt trong quá trình tác dụng tải trọng và các kiểu phá hủy của khối đá tương ứng với các góc nghiêng của khe nứt, các kiểu phá hủy của khối đá xuyên đặng hướng dưới tải trọng nén có thể được chia ra làm 4 loại như sau:

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 $75^\circ - 90^\circ$. Mối quan hệ giữa sự phát triển của các vi khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng được trình bày trong hình 5.



Hình 5. Sự phát triển khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng của kiểu phá hủy SS.

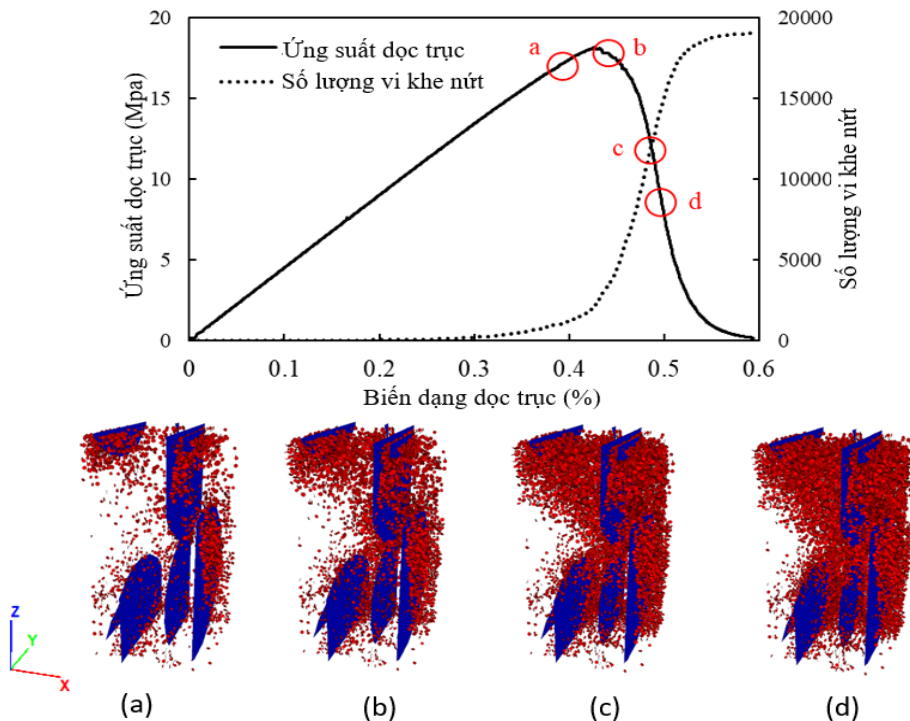
Kiểu trượt dọc theo khe nứt có sẵn (SL): Các vi khe nứt phát triển theo hướng song song với hướng của các khe nứt có sẵn. Các khe nứt phát triển dần dần và liên kết với các khe nứt sẵn có để hình thành bề mặt phá hủy. Khối đá bị phá hủy bằng cách trượt theo bề mặt phá hủy đó, như đã chỉ ra trong hình 6. Kiểu phá hủy này hầu hết xảy ra khi các góc nghiêng (β) của khe nứt từ $15^\circ - 60^\circ$.



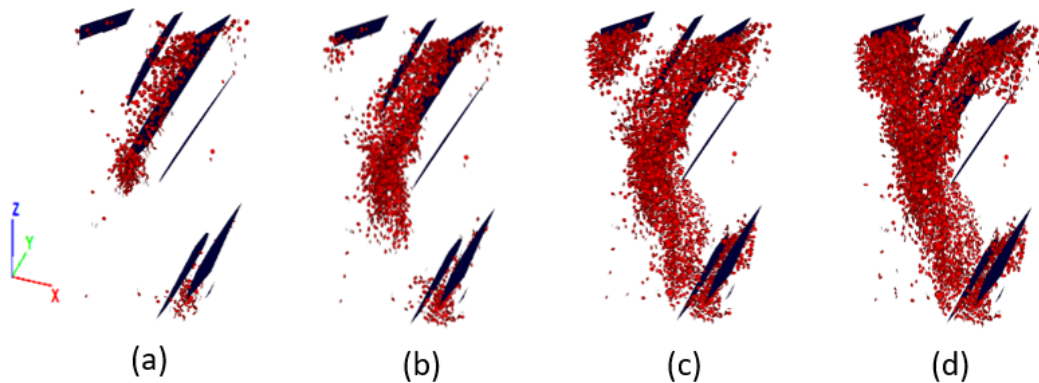
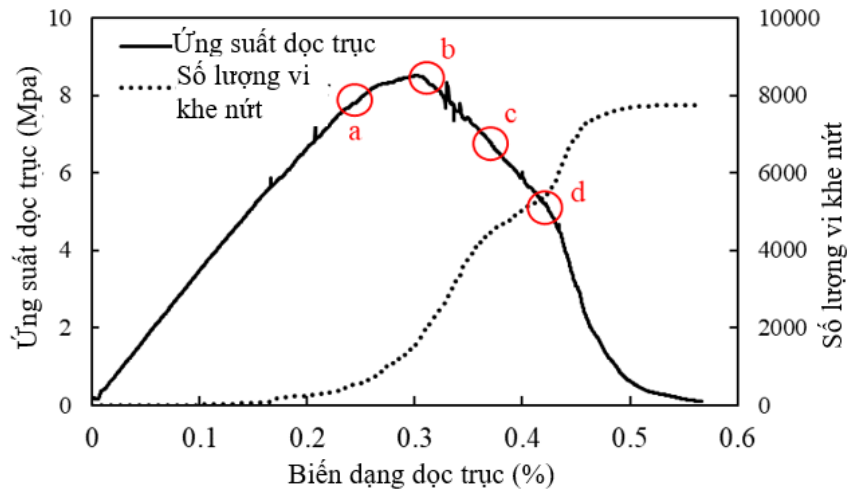
Hình 6. Sự phát triển khe nứt tương ứng với tải trọng tác dụng của kiểu phá hủy SL.

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 7. 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 8. Các kiểu phá hủy của khối đá xuyên đẳng 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 9.



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



Hình 8. 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 $0^\circ, 45^\circ$ 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).

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

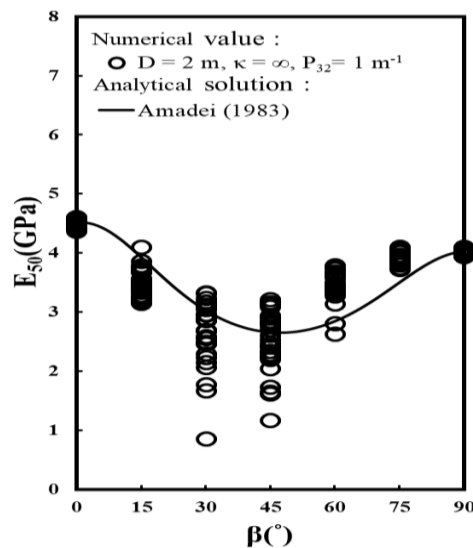
Kết quả của phương pháp số và phương pháp giải tích về giá trị E_{50} là tương đối phù hợp, như đã trình bày ở hình 10. Nó có thể chỉ ra rằng phương pháp số phù hợp để mô phỏng ứng xử của đá xuyên đẳng hướng.

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

Hình 9. 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

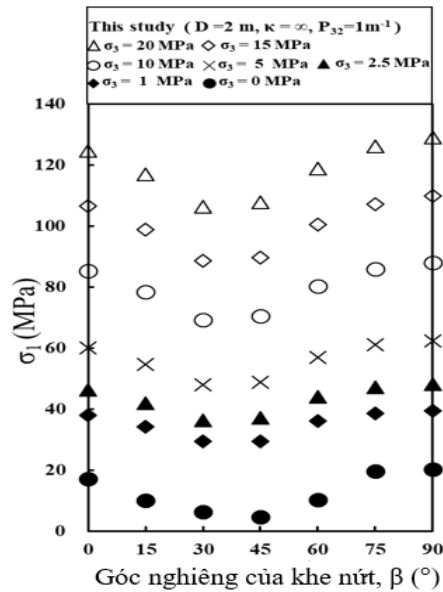


Hình 10. Mô đun đàn hồi tương ứng với các góc nghiêng của khe nứt

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 11. 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.

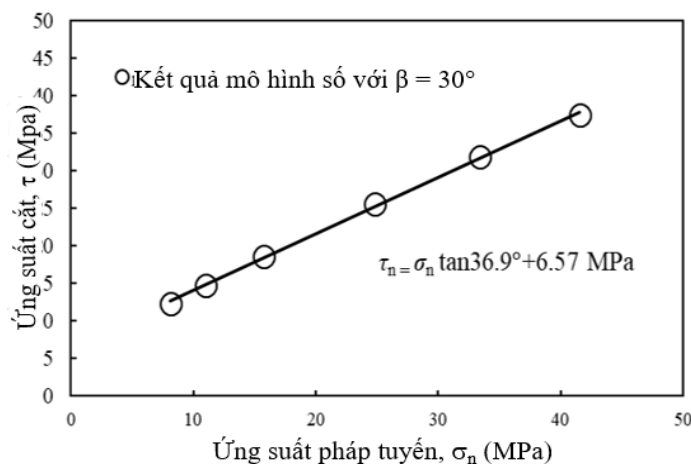


Hình 11. Ứng suất chính lớn nhất với các góc nghiêng khe nứt

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):

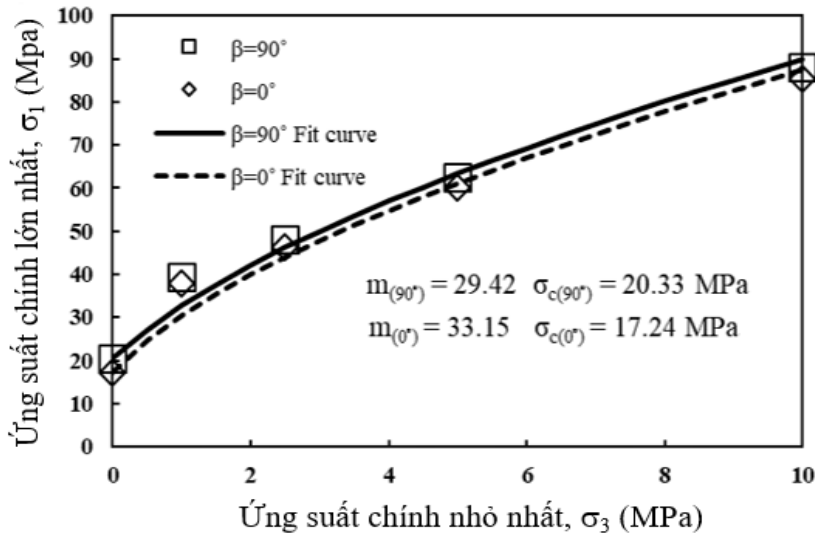
Sử dụng thí nghiệm 3 trục trên mẫu khối đá xuyên đẳng hướng với góc nghiêng của khe nứt là 30° để xác định giá trị C_w và ϕ_w tương ứng với kiểu phá hủy trượt dọc theo bề mặt yếu. Giá trị C_w và ϕ_w được xác định đại diện cho lực dính kết và góc ma sát trên bề mặt yếu, như hình 12.



Hình 12. 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 - 5 Mpa. Các tham số độ bền Hoek và Brown tương ứng với góc nghiêng của khe nứt 0° và 90° được trình bày trong hình 13.



Hình 13. 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):

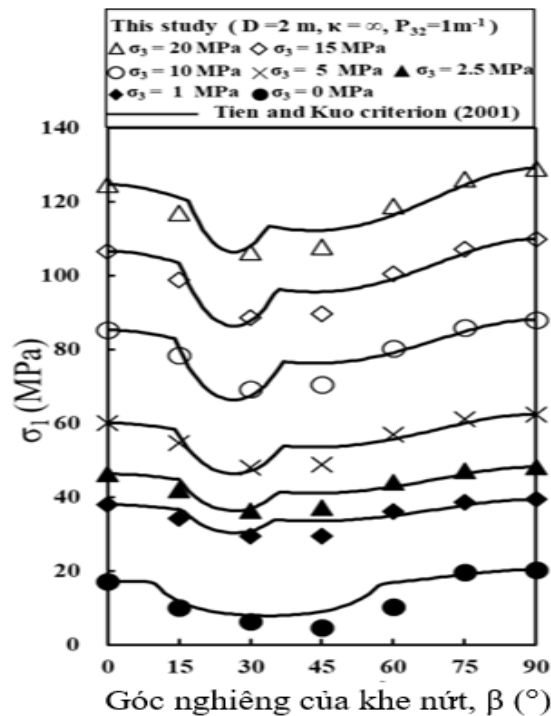
Tham số dị hướng của khối đá xuyên đẳng hướng (n) là một tham số mới được đề xuất bởi Tien và Kuo., 2001. Nó có thể được xác định dựa vào kết quả thí nghiệm 3 trục với góc nghiêng của khe nứt là 75° hoặc 90° .

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

Kết quả từ mô hình số	ϕ_w	C_w	$\sigma_c(0^\circ)$	$\sigma_c(90^\circ)$	$m(0^\circ)$	$m(90^\circ)$	n
	36.9°	6.57	17.24	20.33	33.15	29.42	1.29

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

Bảy 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 13 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 bài báo này rất phù hợp với các kết quả nhận được từ biện pháp giải tích Tien và Kuo.



Hình 13. 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 trơn 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.

Tài liệu tham khảo

- Itasca Consulting Group Inc. 2014. PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions). Version 5. 0. Minneapolis, MN: ICG.
- 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.
- Jaeger, J.C. 1960. Shear failure of anisotropic rocks. *Geological Magazine*. 97(1): 65-72.
- Lee, Y.K., and S. Pietruszczak. 2015. Tensile failure criterion for transversely isotropic rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*. 79: 205-215.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Potyonody, D.O., and P.A. Cundall. 2004. A bonded-particle model for rock. *Int J Rock Mech Min Sci.* 41(8): 1329-64.
- 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.
- 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.
- Tien, Y.M., and M.C. Kuo. 2001. A failure criterion for transversely isotropic rocks. *Int J Rock Mech Min Sci.* 38: 399-412.
- 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.
- 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.