

NGHIÊN CỨU SỰ LÀM VIỆC VÀ PHÁ HOẠI CỦA MỘT LOẠI ĐÁ TƯƠNG TỰ NHÂN TẠO SỬ DỤNG TRONG MÔ HÌNH HÓA KẾT CẤU ĐÁ BẰNG THÍ NGHIỆM NÉN VÀ GIÃN BA TRỤC

KS. NGUYỄN SĨ HÙNG
Viện KHCN Xây dựng

1. Mở đầu

Việc nghiên cứu sự chịu lực và hình thành các hệ thống nứt gãy trong các kết cấu đá tự nhiên hay nhân tạo rất quan trọng. Ví dụ trong công nghiệp dầu mỏ, cần dự đoán hệ thống vết nứt trong mỏ dầu để hợp lý hóa vị trí các giếng khoan, tối đa sản lượng khai thác. Trong các công trình xây dựng có liên quan trực tiếp đến kết cấu đá như đập thủy điện, hầm tuynen xuyên qua núi, cần phải khảo sát các hệ thống vết nứt trước khi xây dựng và dự báo sự làm việc của kết cấu sau khi xây dựng. Tuy nhiên, do quy mô các kết cấu kể trên thường rất lớn, từ hàng trăm mét đến hàng km, nên công việc khảo sát, tính toán toàn hệ kết cấu một cách chính xác rất khó thực hiện hoặc bất khả thi. Để vượt qua, phương pháp sử dụng vật liệu tương tự mô hình hóa kết cấu trong phòng thí nghiệm đã được bắt đầu sử dụng từ thế kỷ XIX và ứng dụng khá rộng rãi trong những năm gần đây [Hubert, 1951 ; Schellart, 2000 ; Panien, 2006]. Vật liệu đá tương tự sử dụng cho mô hình hoá là vật liệu có các đặc trưng cơ học cơ bản tương tự như vật liệu đá tự nhiên nhưng có khả năng chịu lực bé hơn rất nhiều lần. Trên mô hình thu nhỏ của kết cấu thực tế có thể thực hiện các thí nghiệm trong phòng cũng như các tính toán mô phỏng chi tiết trên máy tính. Do giữa kết cấu thật và mô hình có sự tương quan lẫn nhau thông qua các hệ số tỷ lệ về hình học, lực tác động cũng như quy luật ứng suất-biến dạng nên các kết quả thí nghiệm, tính toán trên mô hình sẽ áp dụng được cho kết cấu thực. Trong phương pháp này, việc tìm ra loại vật liệu tương tự thích hợp và tính toán chính xác các hệ số tỷ lệ sẽ cho phép sự tương quan mô hình – kết cấu thực tốt, nâng cao độ chính xác của dự đoán.

Từ năm 2000, tại phòng thí nghiệm Géosciences Azur – CNRS – Cộng hòa Pháp đã đưa vào nghiên cứu một loại vật liệu đá tương tự có tên Cr¹. Cr¹ đã được dùng để tái tạo thành công một số quá trình hình thành hệ thống vết nứt trong các lớp đá trầm tích tự nhiên dưới tác dụng lực cơ học [Jorand, 2005]. Tuy nhiên, các thí nghiệm này mới chỉ dừng lại ở mức độ định tính. Do vậy, để hoàn chỉnh việc nghiên cứu và đưa ra ứng dụng trong thực tế, chúng tôi đã tiến hành các thí nghiệm cơ bản mang tính định lượng trên máy nén ba trục với các dụng cụ đo có độ chính xác cao. Các kết quả thí nghiệm sẽ được sử dụng để thiết lập các phương trình mô tả sự làm việc của đá và cuối cùng mô phỏng và tính toán kết cấu trên máy tính.

Các kết quả thí nghiệm nén, giãn ba trục đã chỉ ra vật liệu Cr¹ có đầy đủ các tính chất cơ học của các loại đá vôi, đá cát kết thông thường. Dưới sự gia tăng ứng suất trung bình, sự chuyển đổi giòn - dẻo diễn ra một cách liên tục thể hiện qua đường cong ứng suất - biến dạng cũng như kiểu phá hoại bởi các loại băng biến dạng. So sánh kết quả hai loại thí nghiệm nén và giãn cho ta thấy sự ảnh hưởng của thông số trạng thái ứng suất N lên sự làm việc và phá hoại của vật liệu.

2. Vật liệu đá tương tự Cr¹

Đá tương tự Cr¹ được sản xuất bằng cách nén một loại bột ôxít kim loại đặc biệt dưới tác dụng áp lực thủy tĩnh 2 MPa. Bột ôxít kim loại sau khi nén chặt tạo ra một loại vật liệu giòn, có độ rỗng $e = 50\%$, trọng lượng riêng $r = 1.8 \text{ g/cm}^3$, đường kính hạt từ 0.2 đến 0.5 mm, có độ đồng nhất cao.

Cr¹ thỏa mãn các điều kiện là một vật liệu đá tương tự (cho đá vôi, đá cát kết) như điều kiện quy luật biến dạng đàn hồi, điều kiện quy luật biến dạng không đàn hồi, điều kiện phát triển vết nứt Griffith [Jorand, 2005]; Để mô hình hoá một cách tỷ lệ, kết cấu thực và mô hình thu nhỏ cần phải thỏa mãn các điều kiện tương tự sau (K. Hubbert, 1937; A. Chemenda, 2000; G. Mandl, 2000):

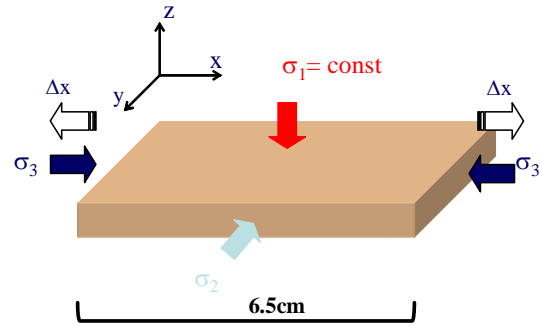
- Tương tự hình học (geometrical similarity): tất cả các chiều dài của kết cấu mô hình và kết cấu thực phải tỷ lệ với nhau và tất cả các góc trong hai kết cấu phải bằng nhau;
- Tương tự động học (kinematic similarity) : sự thay đổi hình dáng và vị trí trong hai kết cấu mô hình và thực theo thời gian tỷ lệ đồng dạng với nhau;
- Tương tự động lực học (dynamical similarity): Sự phân bố và tỉ lệ về cường độ của các loại lực tác dụng lên hai kết cấu thực và mô hình phải như nhau.

So sánh các thông số cơ học cơ bản của Cr¹ với vật liệu đá vôi (bảng 1) cho phép xác định sơ bộ các hệ số tỷ lệ giữa mô hình bằng Cr¹ và kết cấu thực bằng đá vôi như sau (Jorand, 2005): Hệ số tỷ lệ hình học 1/100, 1 cm kích thước mô hình thể hiện 1 m kích thước kết cấu thực bằng đá vôi; Hệ số tỷ

lệ lực tác dụng là 1/500, tức một lực thẳng đứng 0.1 MPa tác dụng lên mô hình tương đương với trọng lượng của địa tầng ở độ sâu 2 km tác động lên kết cấu thực.

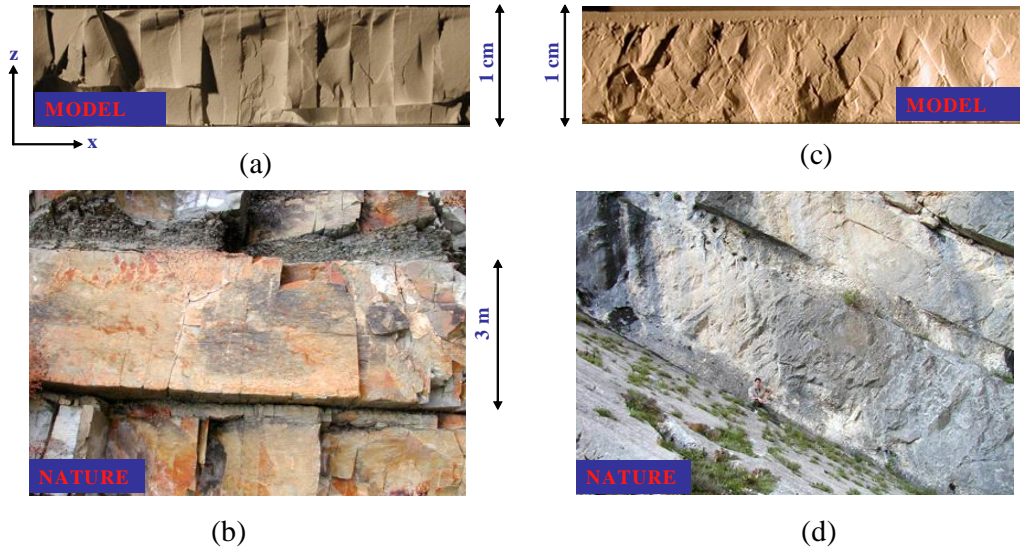
Bảng 1. So sánh các thông số cơ bản của Cr¹ với đá vôi

Thông số	Đá vôi	Cr1
Cường độ chịu nén s_c (Pa)	$10^7 \rightarrow 10^8$	$5 \cdot 10^5$
Cường độ chịu kéo s_T (Pa)	$10^6 \rightarrow 10^7$	$0,3 \cdot 10^5$
Mô đun đàn hồi E (Pa)	$10^{10} \rightarrow 2,5 \cdot 10^{10}$	$6,5 \cdot 10^8$
Hệ số Poisson n	0.2 \rightarrow 0.32	0.22
Trọng lượng riêng (kg/m ³)	$2,3 \cdot 10^3$	1,8
Cường độ ứng suất tới hạn K_{IC} (Pa.m ^{1/2})	$\approx 10^6$	$\approx 2 \cdot 10^3$
Góc ma sát f (°)	25 \rightarrow 45	25



Hình 1. Sơ đồ mô hình bằng Cr¹ và các ứng suất tác dụng, Jorand C (2005)

Jorand C., 2005, trên mô hình Cr¹ có kích thước 1 x 6.5 x 6.5 mm (hình 1), đầu tiên tác dụng một trạng thái ứng suất thủy tĩnh ($s_x = s_y = s_z = P$), sau đó cho mô hình giãn theo phương x trong khi kích thước theo phương y được giữ cố định và giữ nguyên ứng suất $s_z = P$. Trạng thái ứng suất trên mô hình trở thành ($s_z = s_1 = P > s_y = s_2 > s_x = s_3$). Khi s_3 giảm đến mức tới hạn, trong mô hình sẽ xuất hiện hệ thống vết nứt (gọi một cách chính xác hơn là băng biến dạng "strain localization bands"). Mô hình này cho phép mô tả một số quá trình kiến tạo địa chất, với các giá trị s_1 khác nhau sẽ tạo ra những hệ thống băng biến dạng khác nhau tương tự như trong tự nhiên (hình 2). Nếu ứng suất trung bình $s = (s_1 + s_2 + s_3)/3$ tăng thì góc nghiêng của các băng biến dạng so với phương ứng suất s_1 tăng.



Hình 2. Tái tạo các hệ thống vết nứt trong tự nhiên trên mô hình thu nhỏ làm bằng Cr¹ (Jorand, 2005).

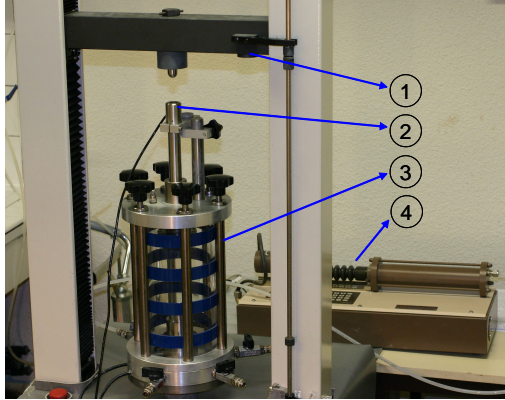
(a), (b). Hệ thống các vết nứt thẳng đứng (joint) khi ứng suất trung bình σ nhỏ;

(c), (d). Hệ thống các vết nứt xiên (fault) khi ứng suất trung bình σ lớn.

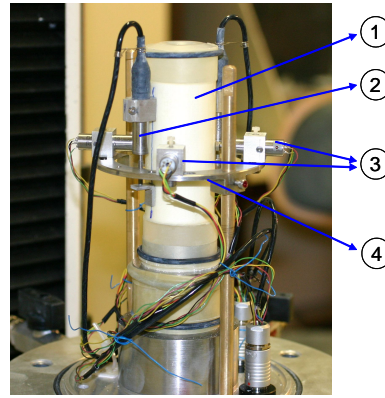
3. Phương pháp thí nghiệm bằng máy nén ba trục

Máy nén ba trục bao gồm hệ thống gia lực thẳng đứng và hệ thống gia lực ngang thông qua áp lực chất lỏng trong lồng thí nghiệm (hình 3). Mẫu thí nghiệm hình trụ có đường kính 40 mm và chiều cao 80mm. Lực thẳng đứng được đo bằng bộ cảm biến lực gắn ở đầu trục gia lực trong lồng thí nghiệm. Để đo biến dạng, chúng tôi dùng hệ thống đo trong gồm 6 cảm biến LVDT (Linear Variable Differential Transformer): 2 LVDT dán trực tiếp lên mẫu đo biến dạng thẳng đứng hai phía đối xứng qua trục mẫu, 4 LVDT gắn trên một vòng tròn cố định đo biến dạng ngang ở phần giữa chiều cao mẫu theo hai phương vuông góc (hình 4). Sai số đo của các LVDT là $< 0.1\%$. So với phương pháp đo biến dạng ngoài, phương pháp đo trong với dụng cụ đo gắn trực tiếp lên mẫu cho kết quả có độ chính xác cao hơn rất nhiều. Phương pháp đo biến dạng ngoài chỉ dùng một dụng cụ đo biến dạng gắn trên trục gia lực bên ngoài lồng thí nghiệm. Do đó cảm biến biến dạng không chỉ đo biến dạng của mẫu mà còn

đo biến dạng của một phần hệ thống gia lực và chịu ảnh hưởng nhiều bởi các khiếm khuyết của mẫu cũng như của hệ thống gia lực [Bésuelle, 2001; Scholey, 1995]. Để giảm ma sát tiếp xúc giữa bề mặt mẫu và hệ thống gia lực, chúng tôi sử dụng hỗn hợp a xít stéatique + vaselin.



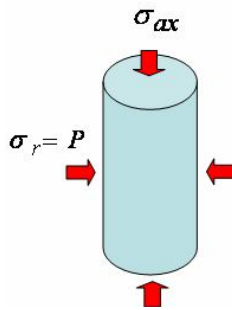
Hình 3. Máy thí nghiệm nén ba trục
1. Hệ thống gia lực thẳng đứng; 2. Trụ gia lực ;
3. Lồng thí nghiệm; 4. Bơm chất lỏng.



Hình 4. Hệ thống đo biến dạng
1. Mẫu thí nghiệm; 2. LVDT đo biến dạng thẳng đứng
dán trực tiếp lên mẫu; 3. LVDT đo biến dạng ngang; 4.
Vòng tròn cố định gắn LVDT ngang.

Với máy nén 3 trục ta có thể thực hiện hai loại thí nghiệm nén và giãn:

Đầu tiên tác dụng lên mẫu một áp lực thủy tĩnh P thông qua áp lực chất lỏng trong lồng thí nghiệm. Giữ P cố định, trong thí nghiệm nén, bàn nén chuyển động xuống dưới làm tăng ứng suất dọc đến khi phá hoại mẫu ($\sigma_1 = \sigma_{ax} > \sigma_2 = \sigma_r = P$) (hình 5). Trong thí nghiệm giãn, bàn nén chuyển động lên trên làm giảm ứng suất nén dọc cho đến khi phá hoại mẫu ($\sigma_1 = \sigma_2 = P, > \sigma_3 = \sigma_{ax}$). Trong cả hai loại thí nghiệm, tốc độ biến dạng dọc mẫu là $10^{-5}/s$.



Hình 5. Sơ đồ ứng suất tác dụng lên

4. Kết quả thí nghiệm

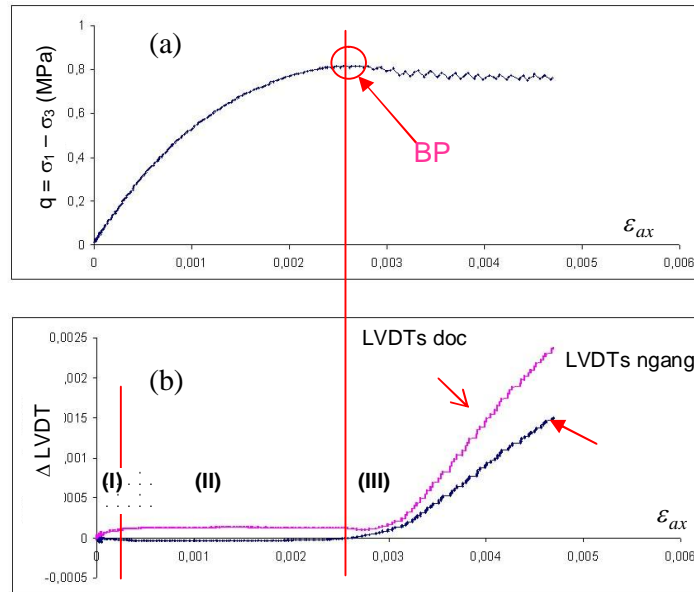
a) Xác định thời điểm xuất hiện băng biến dạng BP (point of bifurcation)

Dưới tác dụng của tải trọng, ban đầu mẫu biến dạng một cách đồng nhất. Khi tải trọng đạt đến một giá trị nào đó, băng biến dạng (localization band) sẽ hình thành trong mẫu (point of bifurcation), biến dạng chấm dứt sự đồng nhất và phát triển chủ yếu trong băng biến dạng. Băng biến dạng là một băng phẳng, có chiều dày thông thường từ 3 đến 20 lần đường kính hạt trung bình của vật liệu. Tiếp tục tăng tải, băng biến dạng sẽ phát triển đến khi mẫu bị phá hủy. Với hệ thống đo biến dạng bằng nhiều cảm biến, ta có thể phát hiện thời điểm băng biến dạng bắt đầu xuất hiện (BP) bằng cách so sánh các số đo của các cảm biến gắn trên các điểm khác nhau của mẫu. Trong giai đoạn biến dạng đồng nhất, số đo của các cảm biến tại các điểm khác nhau là giống nhau. Các số đo này bắt đầu khác nhau tại BP.

Trên hình 6 thể hiện phương pháp xác định BP trong một thí nghiệm với $P = 0.2 \text{ MPa}$. Rõ ràng chỉ với đường cong ứng suất biến dạng ($q - s_{ax}$) (hình 6a), ta không thể xác định được vị trí BP. Tuy nhiên trên đường cong thể hiện sai khác các số đo các cảm biến – biến dạng dọc trung bình (DLVDT - e_{ax}) ta có thể thấy 3 giai đoạn biến dạng khác nhau:

- Giai đoạn tạo tiếp xúc của hệ thống gia lực với mẫu thí nghiệm. Giai đoạn này có sự sai khác nhỏ giữa các cảm biến do khiếm khuyết của bề mặt tiếp xúc mẫu - hệ thống gia lực giai đoạn này ngắn và kết thúc khi hệ thống gia lực tiếp xúc hoàn toàn với mẫu.
- Giai đoạn biến dạng đồng nhất, không có sự sai khác đáng kể giữa các cảm biến khác nhau.

- Giai đoạn hình thành và phát triển băng biến dạng (xem băng biến dạng ở hình 8), sự sai khác giữa các cảm biến tăng lên đột biến do sự xuất hiện của băng biến dạng. BP chính là điểm bắt đầu của giai đoạn III.



Hình 6. Phương pháp xác định thời điểm xuất hiện băng biến dạng BP (thí nghiệm với $P = 0.2$ MPa
 a. Đường cong ($q - e_{ax}$); b. Đường cong ($\Delta LVDT - e_{ax}$).
 (I). Giai đoạn tạo tiếp xúc; (II). Giai đoạn biến dạng đồng nhất
 (III). Giai đoạn hình thành và phát triển băng biến dạng.

Trên hình 6 ta thấy PB nằm trước thời điểm phá hoại hoàn toàn mẫu (điểm có q_{max}) và nó được xem là điểm bắt đầu của quá trình phá hoại.

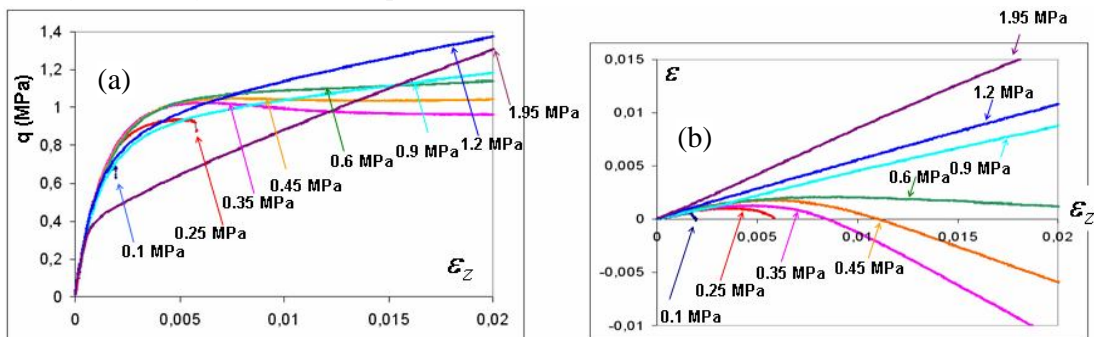
b) Kết quả thí nghiệm nén

Thí nghiệm nén được thực hiện với nhiều áp lực P khác nhau từ 0 đến 2 MPa. Các kết quả được thể hiện trên các đường cong ($q - e_{ax}$) và ($e - e_{ax}$) (hình 7a,b). Sự biến đổi của băng biến dạng theo P thể hiện trong hình 8. Từ các kết quả trên ta có thể chia ra 3 chế độ làm việc của vật liệu:

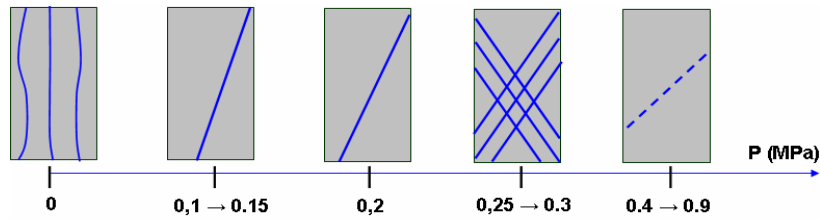
- $P = 0$ đến 0.15 MPa: Chế độ làm việc giòn, xảy ra hiện tượng sụt ứng suất đột ngột khi mẫu bị phá hoại bởi băng biến dạng kiểu cắt (shear band) có góc nghiêng θ so với s_1 tăng từ 0 đến 22° theo P. Các điểm PB luôn xuất hiện trước điểm ứng suất cực đại q_{max} , q_{max} tăng theo áp lực P. Biến dạng thể tích chuyển từ trạng thái nén chặt sang trạng thái giãn nở trước điểm BP.

- $P = 0.2$ đến 0.3 MPa: Chế độ làm việc nửa giòn (quasi-brittle), không xảy ra hiện tượng sụt ứng suất đột ngột sau điểm cực đại q_{max} mà giảm từ từ. ở $P = 0.2$ MPa, trong mẫu chỉ có một băng biến dạng có $\theta = 24^\circ$, trong khi ở $P = 0.25$ và 0.3 MPa, xuất hiện hai hệ thống nhiều băng biến dạng nghiêng song song và giao nhau có $\theta = 33$ đến 35° . Các điểm PB luôn xuất hiện trước điểm ứng suất cực đại q_{max} . Biến dạng thể tích chuyển từ trạng thái nén chặt sang trạng thái giãn nở sau điểm BP.

- $P \geq 0.4$ MPa: Chế độ làm việc dẻo: Không có điểm ứng suất cực đại (trong gam biến dạng tác dụng), ứng suất luôn tăng theo biến dạng. Không nhìn thấy băng biến dạng ở bề mặt ngoài mẫu như các chế độ làm việc khác. Tuy nhiên khi xem xét bề mặt các lát cắt mẫu trên kính hiển vi ta có thể thấy các băng biến dạng kiểu nén (compaction band) có $\theta > 40^\circ$.



Hình 7. Kết quả thí nghiệm nén ba trục
 a. Đường cong ($q - \epsilon_{ax}$); b. Đường cong ($\epsilon - \epsilon_{ax}$)



Hình 8. Các dạng băng biến dạng theo chiều tăng của P trong các thí nghiệm nén
 ————— Nét liền : băng biến dạng nhìn thấy ở bề mặt mẫu;
 - - - - - Nét cắt : băng biến dạng chỉ nhìn thấy dưới kính hiển vi.

Khi so sánh các kết quả trên với một số loại đá điển hình như đá vôi Tavel [Vajdova, 2003]; đá cát kết Bleurswiller [Fortin, 2005], cũng như một số loại đá khác, chúng tôi nhận thấy Cr^1 có đầy đủ các tính chất cơ học điển hình của các loại đá tự nhiên [N. Sihung, 2007]. Đó là sự thay đổi chế độ làm việc giòn – dẻo cùng với các loại băng biến dạng tương ứng theo chiều tăng của áp lực P.

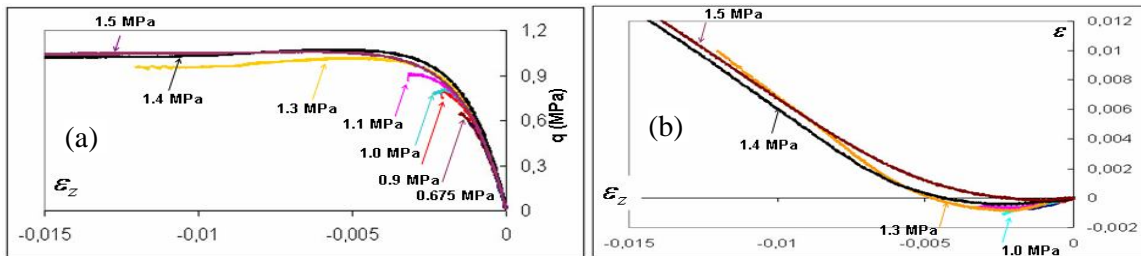
c) Kết quả thí nghiệm giãn

Điểm mạnh trong các nghiên cứu của chúng tôi so với nhiều nghiên cứu khác là khả năng thực hiện đồng thời hai loại thí nghiệm nén và giãn trên máy nén ba trục nhờ một số cải tiến kỹ thuật (N. SiHung, 2007). Như thí nghiệm nén, thí nghiệm giãn được thực hiện với nhiều P khác nhau. Các kết quả thể hiện trên các đường cong ($q - \epsilon_{ax}$), ($\epsilon - \epsilon_{ax}$) (hình 9a,b) và các loại băng biến dạng trên hình 10. Cũng như thí nghiệm nén, có 3 chế độ làm việc của vật liệu:

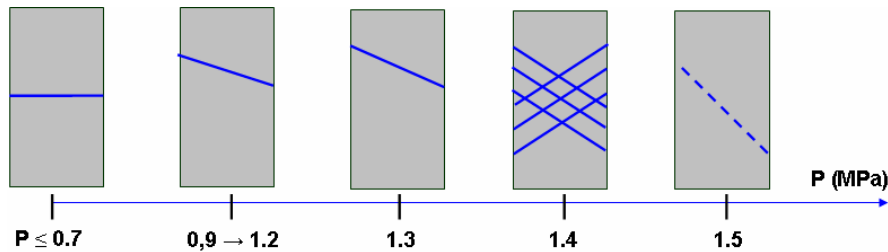
- $P \leq 1.1$ MPa: Chế độ làm việc giòn, mẫu bị phá hoại bởi băng biến dạng có θ tăng từ 0 đến 24° theo P. Các điểm PB luôn xuất hiện trước điểm ứng suất cực đại q_{max} , q_{max} tăng theo áp lực P. Biến dạng thể tích luôn trong trạng thái giãn nở.

- $P = 1.2$ đến 1.4 MPa: Chế độ làm việc nửa giòn (quasi – brittle), với $P = 1.2$ và 1.3 MPa, trong mẫu chỉ có một băng biến dạng có θ là 32° đến 34°, trong khi $P = 1.4$ MPa, xuất hiện hai hệ thống nhiều băng biến dạng nghiêng song song và giao nhau có θ là 45°. Các điểm PB luôn xuất hiện trước điểm ứng suất cực đại q_{max} . Biến dạng thể tích chuyển từ trạng thái giãn sang trạng thái nén chặt sau điểm BP.

- $P \geq 1.5$ MPa: Chế độ làm việc dẻo: Không có điểm ứng suất cực đại, các băng biến dạng kiểu nén (compaction band) chỉ nhìn thấy trên kính hiển vi với $\theta > 40^\circ$.



Hình 9. Kết quả thí nghiệm giãn
 a. Đường cong ($q - \epsilon_{ax}$); b. Đường cong ($\epsilon - \epsilon_{ax}$).



Hình 10. Các dạng băng biến dạng theo chiều tăng của P trong các thí nghiệm giãn
 ————— Nét liền: băng biến dạng nhìn thấy ở bề mặt mẫu;
 - - - - - Nét cắt : băng biến dạng chỉ nhìn thấy dưới kính hiển vi.

5. Lý thuyết về sự hình thành băng biến dạng, phân tích ảnh hưởng thông số trạng thái ứng suất N

Như đã đề cập ở trên, PB là điểm bắt đầu của quá trình phá hoại kết cấu mà ta cần phải dự đoán được khi tính toán. Các cơ cấu vật lý hình thành bằng biến dạng rất đa dạng và phức tạp, như sự mở rộng các vi vết nứt (micro-crack), sự trượt, quay, nghiền nát các hạt và lỗ rỗng trong vật liệu. Cấu trúc bằng biến dạng phụ thuộc vào đặc tính vật liệu và trạng thái ứng suất tác dụng. Lý thuyết đàn hồi dẻo Morh thường được dùng trong thực hành để dự báo ứng suất tới hạn kết cấu đá vì tính đơn giản. Tuy nhiên nó không tính đến ảnh hưởng của ứng suất trung gian s_2 , cũng như không giải thích được sự hình thành nhiều dạng bằng biến dạng khác nhau [Jaeger and Cook, 1979; Mandl, 2000; Bésuelle, 2004]. Để thay thế, Rice và Rudnicki, 1975 đã đề ra lý thuyết đàn – dẻo R.R về điều kiện hình thành bằng biến dạng. Trên cơ sở lý thuyết này, đến nay đã có nhiều nghiên cứu, phát triển hoàn thiện mô tả và dự báo ngày càng chính xác sự làm việc và cách thức phá hoại vật liệu [Bésuelle, 2001; Issen, 2002].

Lý thuyết R.R quan niệm rằng sự phá hoại kết cấu là kết quả của sự mất ổn định cấu thành (constitutive instability) của kết cấu dưới tác dụng tải trọng. Tại thời điểm mất ổn định (bifurcation point), các phương trình toán học mô tả sự làm việc của kết cấu (phương trình cân bằng, phương trình ứng xử ứng suất – biến dạng) sẽ mất tính chất duy nhất nghiệm, bằng biến dạng xuất hiện làm mất tính biến dạng đồng nhất của kết cấu.

Các phương trình cơ bản của R.R:

Đại lượng biến dạng cắt dẻo tích lũy biểu diễn lịch sử biến dạng dẻo vật liệu:

$$\gamma^P = \int \sqrt{2de_{ij}^P de_{ij}^P} \quad (1)$$

Trong đó de_{ij}^P là phần lệch (deviatoric) của số gia biến dạng dẻo toàn phần $d\varepsilon_{ij}^P$:

$$de_{ij}^P = d\varepsilon_{ij}^P - \frac{1}{3}\delta_{ij}de^P \quad (2)$$

δ_{ij} là delta Kronecker (= 1 nếu $i = j$; = 0 nếu $i \neq j$) và $de^P = d\varepsilon_{kk}^P$.

Tương tự, ta định nghĩa phần lệch s_{ij} và phần trung bình σ của trạng thái ứng suất:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \delta_{ij}\sigma \quad (3)$$

với $\sigma = 1/3\sigma_{kk}$.

Không gian ứng suất đàn hồi (yeilding surface) Drucker – Prager:

$$\bar{\tau} - f(\sigma, \gamma^P) = 0 \quad (4)$$

Trong đó $\bar{\tau} = \sqrt{1/2(s_{ij}s_{ij})}$. Không gian ứng suất đàn hồi biến đổi theo γ^P , nếu trạng thái ứng suất nằm trong biên của không gian ứng suất đàn hồi thì vật liệu làm việc đàn hồi và nếu nằm trên biên thì vật liệu biến dạng dẻo.

Điều kiện tương thích (consistency condition) đảm bảo cho trạng thái ứng suất luôn nằm trên biên của không gian ứng suất đàn hồi trong quá trình biến dạng dẻo liên tục:

$$d\bar{\tau} - \mu d\sigma - h d\gamma^P = 0 \quad (5)$$

Trong đó $\mu(\sigma, \gamma^P) = \frac{df}{d\sigma}$ là hệ số ma sát và $h(\sigma, \gamma^P) = \frac{df}{d\bar{\tau}}$ là hệ số cứng hóa (plastic hardening modulus).

Số gia biến dạng dẻo tính theo công thức:

$$d\varepsilon_{ij}^P = \frac{dg}{d\sigma_{ij}} d\lambda \quad (6)$$

Trong đó $g = \bar{\tau} - f(\sigma, \gamma^P)$ là thế năng biến dạng dẻo và $d\lambda > 0$.

Tách phần lệch từ (6) ta có: $de_{ij}^P = \frac{s_{ij}}{2\bar{\tau}} d\lambda$ (7)

Thay (6) và kết hợp $d\lambda = d\gamma^P$ vào (1) ta có biến dạng dẻo thể tích:

$$de^P = -\beta d\gamma^P \quad (8)$$

Trong đó $\beta(\sigma, \gamma^P) = \partial g / \partial \sigma$ gọi là hệ số giãn nở.

Từ các phương trình mô tả quan hệ ứng suất – biến dạng kê trên, kết hợp với các phương trình cân bằng lực và sự liên tục của trường ứng suất biến dạng, R.R chỉ ra rằng, điều kiện để kết cấu chuyển từ trạng thái biến dạng đồng nhất sang biến dạng không đồng nhất do sự xuất hiện băng biến dạng là:

$$\frac{h_{cr}}{G} = \frac{(1+\nu)}{9(1-\nu)}(\beta - \mu)^2 - \frac{(1+\nu)}{2}(N + 1/3(\beta + \mu))^2 \quad (9)$$

Trong đó $N = s_{22} / \bar{\tau}$ là thông số biểu thị trạng thái ứng suất, $-1/\sqrt{3} \leq N \leq -1/\sqrt{3}$, $N = -1/\sqrt{3}$ trong thí nghiệm giãn ba trục ($s_1 = s_2 = P > s_3 = s_{ax}$) và $N = 1/\sqrt{3}$ trong thí nghiệm nén 3 trục. G và n là cường độ chịu cắt và hệ số Poisson của vật liệu.

Góc của mặt phẳng băng biến dạng tạo với s_1 là θ được tính như sau:

$$\theta = \pi/4 + 1/2 \arcsin \alpha \quad (10)$$

Trong đó

$$\alpha = \frac{2/3(1+\nu)(\beta + \mu) - N(1-2\nu)}{\sqrt{4-3N^2}} ;$$

Trong thí nghiệm nén, giãn ba trục, băng biến dạng sẽ là băng cắt (shear band) nếu:

$$-\sqrt{3} \leq \mu + \beta \leq \sqrt{3}(2 - \nu)/(1 + \nu) \quad (11)$$

Trường hợp vế trái bất đẳng thức (11) bị vi phạm, ta có băng biến dạng giãn (băng vuông góc với s_3 , độ rỗng trong băng lớn hơn ngoài băng). Nếu vế phải bất đẳng thức (11) bị vi phạm ta có băng biến dạng nén (băng vuông góc với s_1 , độ rỗng trong băng bé hơn ngoài băng)

Như vậy thời điểm xuất hiện, đặc tính băng biến dạng phụ thuộc vào vật liệu và trạng thái ứng suất N.

6. Phân tích ảnh hưởng của N lên sự làm việc và phá hoại của vật liệu từ các kết quả thí nghiệm trên Cr¹

Từ các kết quả đo trên thí nghiệm nén ($N = 1/\sqrt{3}$) và giãn ($N = -1/\sqrt{3}$), ta có thể tính được các thông số E và n. Sau đó tính được thành phần biến dạng không đàn hồi và các thông số của quá trình biến dạng không đàn hồi μ , β .

Trong bảng 2 và 3 thể hiện các giá trị μ và β tính tại thời điểm liền trước BP. Ta nhận thấy cả trong hai trường hợp thí nghiệm nén và giãn, theo chiều tăng P giá trị của μ , β giảm từ giá trị dương sang âm. Tương ứng với sự thay đổi của $\alpha + \beta$, khi quan sát các băng biến dạng dưới kính hiển vi [N. SiHung, 2007] cho thấy một sự thay đổi liên tục các dạng băng như sau theo chiều tăng của P: băng giãn (dilatation band) → băng cắt giãn (nghiêng một góc khác 0 với s_1 , độ rỗng trong băng lớn hơn bên ngoài băng) → băng thuần cắt (độ rỗng trong và ngoài băng là như nhau) → băng cắt nén (độ rỗng trong băng bé hơn ngoài băng).

Bảng 2. Các giá trị μ , β và loại băng biến dạng trong thí nghiệm nén

P (Mpa)	α	β	Kiểu băng biến dạng
0,55	0,35	0,15	Băng cắt giãn
0,1	0,21	0,06	Băng cắt giãn
0,15	0,24	0	Băng cắt giãn
0,2	0,23	- 0,09	Băng thuần cắt
0,25	0,23	- 0,09	Băng cắt nén giao nhau
0,3	0,17	- 0,135	Băng cắt nén giao nhau
0,35	0,00	- 0,1	Băng cắt nén
0,4	0,00	- 0,19	Băng cắt nén
0,45	- 0,08	- 0,2	Băng cắt nén
0,5	- 0,05	- 0,17	Băng cắt nén
0,6	- 0,13	- 0,18	Băng cắt nén
0,75	- 0,12	- 0,22	Băng cắt nén
0,9	- 0,12	- 0,3	
1,2		- 0,37	

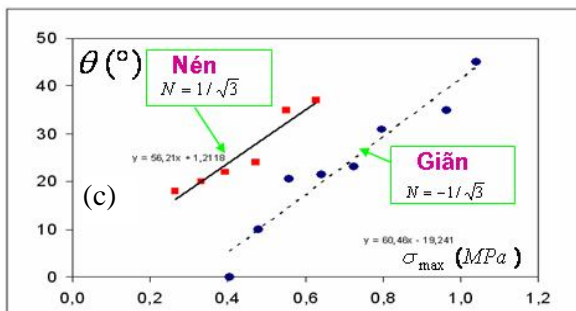
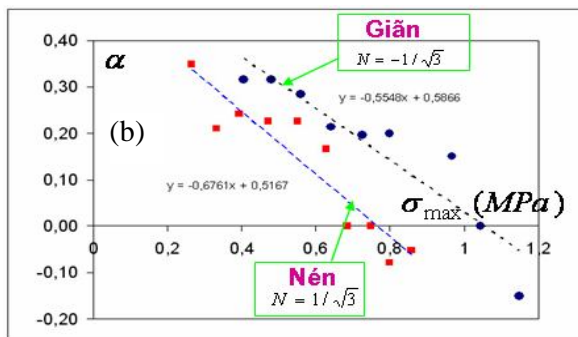
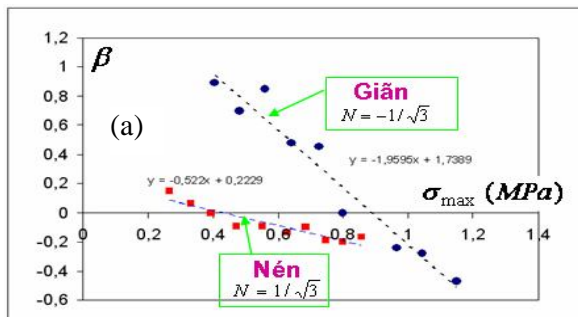
Bảng 3. Các giá trị μ , β và loại băng biến dạng trong thí nghiệm nén

P (Mpa)	α	β	Kiểu băng biến dạng
0,6	0,31	0,89	Băng giãn
0,7	0,31	0,7	Băng giãn
0,8	0,28	0,85	Băng cắt giãn
0,9	0,21	0,48	Băng cắt giãn
1	0,20	0,45	Băng cắt giãn
1,1	0,20	0	Băng thuần cắt
1,3	0,15	- 0,24	Băng cắt nén giao nhau
1,4	0,00	- 0,28	Băng cắt nén
1,5	- 0,15	- 0,47	Băng cắt nén

Trên hình 11a, b, c biểu diễn sự biến thiên của các thông số μ , β , θ theo ứng suất trung bình σ_{max} cho hai loại thí nghiệm nén và giãn.

- Cùng một giá trị σ như nhau, giá trị α , β trong thí nghiệm giãn lớn hơn so với thí nghiệm kéo, tức α , β phụ thuộc N. Tuy nhiên trong lý thuyết R.R chưa tính đến ảnh hưởng của N cho hai thông số này. Như vậy trạng thái ứng suất trong thí nghiệm giãn thuận lợi hơn cho việc tạo ra các băng biến dạng kiểu giãn, tức thiên về chế độ làm việc giòn. Ngược lại thí nghiệm nén sẽ thuận lợi hơn cho việc tạo ra các băng biến dạng kiểu nén và thiên về chế độ làm việc dẻo.

- Cùng một giá trị σ như nhau, góc θ trong thí nghiệm nén lớn hơn so với thí nghiệm giãn, phù hợp với dự đoán của lý thuyết R.R.



Hình 11. So sánh sự biến thiên các thông số μ , β , θ trong hai loại thí nghiệm nén và giãn theo chiều tăng σ

7. Kết luận

Qua các thí nghiệm nén và giãn ba trục cho thấy Cr¹ là một vật liệu đá tương tự tốt do nó có đầy đủ các tính chất cơ bản về sự làm việc và phá hoại như các loại đá tự nhiên. Được sản xuất trong phòng thí nghiệm với độ đồng đều và đồng nhất cao, sức chịu tải bé hơn rất nhiều so với đá tự nhiên thông thường (đá vôi và đá cát kết), Cr¹ là loại vật liệu rất tốt để nghiên cứu sự làm việc và phá hoại của đá và các kết cấu đá và bê tông (bê tông cũng được xem như một loại đá nhân tạo).

Dưới sự tăng áp lực nén thủy tĩnh xảy ra sự chuyển đổi chế độ làm việc giòn dẻo, cũng như thay đổi các đặc tính băng biến dạng từ giãn sang nén.

Đặc tính của băng biến dạng phụ thuộc vào tính chất vật liệu và trạng thái ứng suất. So sánh hai loại thí nghiệm nén và giãn cho thấy: sự làm việc của vật liệu trong thí nghiệm giãn thiên về chế độ dòn, tạo băng biến dạng giãn, trong thí nghiệm nén thiên về chế độ dẻo, tạo băng biến dạng nén. Thông số trạng thái N đã ảnh hưởng lên sự làm việc và phá hoại của vật liệu. Tuy nhiên lý thuyết R.R chưa tính đến sự ảnh hưởng của N trong các phương trình biểu diễn không gian ứng suất đàn hồi và thế năng biến dạng dẻo. Các kết quả thí nghiệm chính xác nén và giãn trình bày ở trên sẽ cho phép bổ túc vấn đề này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. BÐsuelle, P., Compacting and dilating shear band in porous rocks: theoretical and experimental conditions, *J. Geophys. Res.*, Vol.106, No. 7, 2001, pp. 13435-13442.
2. BÐsuelle, P., An internal instrumentation for axial and radial strain measurements in triaxial tests, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.24, No. 2, 2001, pp. 193-199.
3. Chemenda, A., Burg J.-P. and Mattauer M., Evolutionary model of the Himalaya-Tibet system: geopoem based on new modelling, geological and geophysical data. *Earth Planet. Sci. Lett.* 174 (2000), pp. 397 – 409.
4. Fortin, J., Compaction homogène et compaction localisée des roches poreuses, étude expérimentale et théorique, *Thèse scientifique, Université de Paris-VI*, 2005.
5. Hubbert, M. K., Theory of scale models as applied to the study of geologic structures, *Bulletin of Geol. Society of America*, 1937.
6. Issen, K. A., The influence of constitutive models on localization conditions for porous rocks, *Eng. Frac. Mechs.*, Vol. 69, 2002, pp. 1891 to 1906.
7. Jaeger, J.C and Cook, N.G.W, *Fundamentals of Rock Mechanics*, 1979;
8. Jorand, C., Modélisation expérimentale de la fracturation d'un milieu sédimentaire, *Thèse scientifique, Université de Nice*, 2005.
9. Mandl G., Modelling of faulting scaling problems, *Faulting in Brittle Rocks*, Springer, 1999, pages 407-428.
10. Panien, M. Schreurs, G, Mechanical behaviour of granular materials used in analogue modelling : insights from grain characterisation, ring-shear tests and analogue experiment, *J. Struct. Geol.*, 28, 1710-1724, 2006.
11. Rudnicki, J. W. and Rice, J. R., Condition for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials, *J. Mech. Phys. Solids*, 1975, Vol. 23, pp 371 to 394.
12. Schellart, W. P., Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling, *Tectonophysics*, Volume 324, Issues 1-2, 15 September 2000, Pages 1-16.
13. Scholey, G. K., A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.18, No. 2, 1995, pp. 137-156.
14. SĩHung, N., Rapports confidentiels pour les compagnies pétrolières (Total et Shell) dans le cadre du consortium GĐoFracNet, 2007.
15. Vajdova V., Compaction, dilatancy, and failure in porous carbonate rocks, in *J. Geophys. Res.* 2003, Vol. 109, No. 5204;