

NGHIÊN CỨU CÁC YÊU CẦU KỸ THUẬT CỦA MÁY NÉN 3 TRỤC VÀ DỤNG CỤ ĐO CHO CÁC THÍ NGHIỆM ĐÁ, ĐÁ CÓ ĐỘ CHÍNH XÁC CAO. PHƯƠNG PHÁP CẢI BIẾN MÁY NÉN 3 TRỤC ĐỂ THỰC HIỆN ĐƯỢC THÍ NGHIỆM KÉO TRÊN MẪU ĐÁ, ĐÁ

TS. NGUYỄN SỸ HÙNG

Khoa Xây dựng và Cơ học ứng dụng – Đại học SPKT Tp. HCM

Tóm tắt: Máy nén ba trục thông dụng trong cơ học đất đá đã được cải biến để có thể làm được thí nghiệm giãn. Các thiết bị đo trong được áp dụng để nâng cao độ chính xác của số liệu đo. Các điều kiện thí nghiệm khác như ma sát giữa bàn nén và mẫu được giảm thiểu tối đa, sự đồng trục giữa mẫu thử và hệ thống gia tải được đảm bảo. Các thí nghiệm nén và giãn sau đó được tiến hành trên các mẫu vật liệu đá nhân tạo GRAM1. Các kết quả thí nghiệm cho thấy điểm rẽ nhánh mà tại đây kết thúc sự biến dạng đồng đều của mẫu chuyển sang biến dạng tập trung trong băng biến dạng có thể xác định được một cách chính xác bằng phương pháp đo đa điểm. Với cả thí nghiệm nén và giãn, các điểm rẽ nhánh nằm trước đỉnh ứng suất lệch. Khi áp lực buồng P tăng lên có một sự chuyển dịch từ ứng xử dòn sang ứng xử dẻo. Điều này thể hiện ở đặc điểm sự sụt giảm ứng suất đỉnh từ đột ngột sang giảm tịnh tiến hay ứng xử tăng bền, từ sự phá hoại mẫu theo một vết nứt/băng biến dạng xiên duy nhất sang phá hoại theo nhiều băng biến dạng xiên đan chéo nhau và biến dạng đồng đều ở P cao. Tuy nhiên, áp lực buồng tại thời điểm chuyển dịch dòn-dẻo P_{bdt} của của thí nghiệm giãn cao gấp 5 lần thí nghiệm nén. Sự phụ thuộc của ứng suất đỉnh và góc vết nứt/băng biến dạng vào ứng suất trung bình σ của hai dạng thí nghiệm cũng khác nhau. Điều đó cho chúng ta thấy sự phụ thuộc ứng xử của vật liệu đá và lộ trình ứng suất.

Từ khóa: Máy nén ba trục, thí nghiệm đá, vết nứt, băng biến dạng, điểm rẽ nhánh.

1. MỞ ĐẦU

Việc xây dựng một lý thuyết hiệu quả về biến dạng dẻo và sự nứt vỡ, phá hủy của đá hay các vật liệu hạt khác như bê tông cần có số liệu thực nghiệm tốt. Phần lớn các thí nghiệm trên mẫu đá là thí nghiệm nén ba trục. Thí nghiệm này chỉ tái hiện được một trong vô số lộ trình gia tải. Mặt khác, một số thí nghiệm thực nghiệm trên mẫu đá đã chỉ ra rằng ứng xử của vật liệu phụ thuộc vào điều kiện gia tải, lộ trình gia tải [1-7].

Điều đó dẫn đến hệ quả rằng, các công thức của thuyết bền cần kể đến cả ba bất biến ứng suất chứ không chỉ là bất biến thứ nhất và bất biến thứ hai như trong các lý thuyết kinh điển [5,8-10]. Để lập các hàm của thuyết bền cần phải có một dải số liệu thực nghiệm rộng và chính xác, thực hiện dưới nhiều điều kiện gia tải khác nhau. Dải số liệu cần bao phủ hết

các vùng ứng xử của vật liệu từ ứng xử dòn sang ứng xử dẻo. Sự chuyển đổi dòn-dẻo của vật liệu cũng đã được nghiên cứu gần đây, tuy nhiên chủ yếu theo lộ trình nén ba trục [11-13]. Cũng đã có một số số liệu theo lộ trình giãn ba trục [14-17], tuy nhiên chúng bị giới hạn về số lượng và giá trị ứng suất trung bình, chủ yếu được thực hiện ở trong chế độ ứng xử dòn.

Heard [1], đã thực hiện một loạt các thí nghiệm giãn và nén ba trục cho đá vôi Solnhofen và đã chỉ ra rằng mặt phá hoại thể hiện trong không gian $(\sqrt{J_2}, \sigma)$ của thí nghiệm giãn và thí nghiệm nén là rất khác nhau (với J_2 là bất biến ứng suất thứ hai và σ là ứng suất trung bình. Điều quan trọng nhất, đó là các số liệu thí nghiệm đã chỉ ra rằng sự chuyển đổi dòn-dẻo (từ phá hoại dòn theo vết nứt duy nhất sang biến dạng dẻo phân bố) khác nhau rất rõ rệt giữa hai chế độ thí nghiệm giãn và

nén. Sự chuyển đổi này xảy ra ở ứng suất trung bình $\sigma = \sigma_{bdt}$ trong chế độ giãn lớn hơn hai lần so với chế độ nén. Nếu so sánh với điều kiện áp lực buồng P thì sự khác nhau lên đến hơn 7 lần.

Sự chuyển đổi dần dẽo không có giới hạn rõ rệt và được định nghĩa với nhiều khía cạnh khác nhau. Khi ứng suất buồng tăng lên, thời điểm chuyển đổi đặc trưng bởi sự thay đổi từ dạng phá hoại với ứng suất dọc giảm đột ngột và xuất hiện vết nứt xiên duy nhất sang sự giảm ứng suất dọc một cách từ từ với sự xuất hiện nhiều vết nứt đan chéo nhau. Khi $\sigma > \sigma_{bdt}$, sự ứng xử vật liệu chuyển từ giảm bền sang tăng bền, hệ số giãn nở chuyển từ dương sang âm. Khi $\sigma < \sigma_{bdt}$, mặt phá hoại có hình dạng gần tuyến tính và khi $\sigma > \sigma_{bdt}$, mặt phá hoại có độ dốc (chính là hệ số nội ma sát α) giảm dần tới không và sau đó là giá trị âm [11]. Như vậy nếu so sánh chế độ giãn và nén thì cùng một ứng suất trung bình σ như nhau, hệ số α (độ dốc mặt phá hoại) sẽ rất khác nhau. Hiện chưa có mô hình lý thuyết nào kể đến hiện tượng này.

Tuy nhiên, các số liệu của Heard [1-2] gần như là duy nhất và chưa có các nghiên cứu tiếp theo để làm sáng tỏ thêm vấn đề. Như đã nêu, đã có nhiều số liệu thực nghiệm ở chế độ nén với chất lượng tốt, đặt biệt cho đá cát kết [11,12,18] và đá vôi [13,19]. Tuy nhiên, các số liệu ở thí nghiệm giãn lại hầu như chưa có.

Sự thiếu các số liệu ở chế độ giãn nêu trên chủ yếu là do sự khó khăn về mặt thiết bị. Tuyệt đại đa số, các máy 3 trục quy ước (hai ứng suất ngang bằng nhau và bằng áp lực buồng, ứng suất thẳng đứng do pít tông chuyển động tạo ra, độc lập với hai ứng suất ngang) chỉ được chế tạo để làm thí nghiệm nén mà không thể làm được thí nghiệm giãn.

Riêng ở Việt Nam, các máy nén 3 trục chủ yếu dùng để làm thí nghiệm đất, hầu như không có máy nén ba trục để làm thí nghiệm trên mẫu đá. Hơn nữa các thiết bị đo ứng suất, biến dạng là các thiết bị đo ngoài, không đo trực tiếp trên mẫu thử nên độ chính xác không cao.

Đã có một số máy nén 3 trục thực (khác với máy nén 3 trục quy ước) được chế tạo, trong đó 3 ứng suất hoàn toàn độc lập với

nhau. Chẳng hạn như máy của Mogi [26] hay các máy của Haimson và Chang [6]. Tuy nhiên số lượng loại máy thí nghiệm này rất ít do gặp các vấn đề rất khó giải quyết về chế tạo cũng như vận hành.

Do vậy hướng chủ đạo khả dĩ nhất là cải biến máy nén 3 trục quy ước (gọi tắt là máy 3 trục) để có thể làm được thí nghiệm giãn.

Mục tiêu cải biến không những để máy nén 3 trục có thể làm được thí nghiệm giãn mà còn tối ưu hóa điều kiện thí nghiệm và các dụng cụ đo, loại bỏ tối đa các sai số, các ảnh hưởng không kiểm soát của thiết bị và thao tác người thí nghiệm đến độ chính xác của số liệu.

Các vấn đề cần giải quyết đó là : sự đồng trục của piston và mẫu thử, giảm ma sát tiếp xúc giữa tấm đệm và mẫu thử. Việc đo đặc chính xác phải được đảm bảo. Người ta phân biệt hai kiểu đo biến dạng : đo trong (còn gọi là đo cục bộ) và đo ngoài (còn gọi là đo tổng thể). Đo ngoài bị ảnh hưởng, giảm độ chính xác bởi rất nhiều yếu tố : đo ngoài đo luôn cả biến dạng thiết bị, sự uốn cong của mẫu trong quá trình gia tải, sự tiếp xúc kém giữa mẫu và tấm đệm [23]. Đo trong, do thiết bị đo gắn trực tiếp lên mẫu nên cho số liệu biến dạng của mẫu chính xác hơn rất nhiều so với đo ngoài. Đồng thời đo trong còn cho phép xác định được thời điểm xuất hiện sự không đồng đều về biến dạng trong mẫu, đây là một thời điểm rất quan trọng mà người ta còn gọi là thời điểm rẽ nhánh. Kể từ thời điểm này, các lý thuyết dựa trên ứng suất biến dạng đồng đều không còn áp dụng được một cách chính xác nữa vì biến dạng trong mẫu chỉ tập trung trong một dải hẹp gọi là băng biến dạng. Thời điểm này thường xuất hiện trùng hay trước đỉnh ứng suất, trước thời điểm mẫu bị phá hoại do các vết nứt có thể nhìn thấy bằng mắt thường.

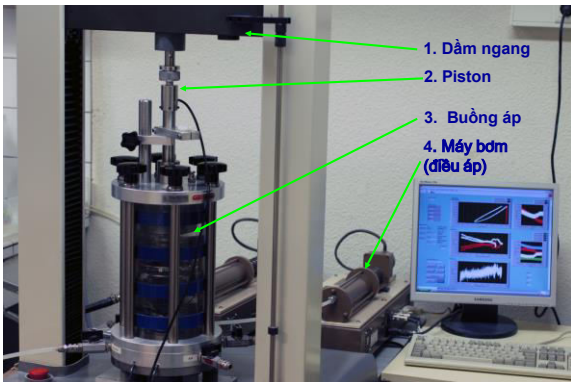
1. CẢI BIẾN THIẾT BỊ MÁY NÉN 3 TRỤC

1.1 CẤU TẠO VÀ THÔNG SỐ MÁY NÉN 3 TRỤC

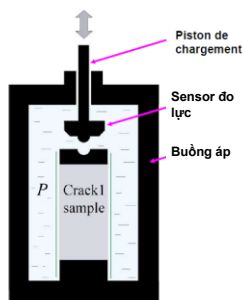
Sự cải biến được áp dụng trên một

máy nén 3 trục tiêu chuẩn thông dụng. Máy nén ba trục bao gồm các bộ phận chính : buồng áp lực, hệ thống gia tải thẳng đứng, các máy bơm đo và tạo áp lực (Hình 1). Buồng áp lực trong suốt (Hình 2) chịu được áp lực tối đa 3,5 Mpa. Máy bơm tạo được áp lực tối đa 3 Mpa, nó cho phép khống chế cũng như đo sự thay đổi áp suất và thể tích với độ chính xác 0,1%. Mẫu thí nghiệm đặt ở chính giữa buồng áp lực, được tách cách ly khỏi chất lỏng trong bình nhờ một màng chống thấm bằng vật liệu Neoprene có chiều dày 0,3 mm. Dầm ngang của thiết bị di chuyển lên xuống theo hộp điều tốc và trục thẳng đứng kiểu ren rất ổn định, không tạo sốc và có thể đạt tới vận tốc nhỏ một cách chính xác 10^{-6} m/s. Dầm ngang sẽ liên kết với piston gia tải của buồng áp và tạo ứng suất thẳng đứng lên mẫu thử. Tải trọng tối đa của dầm ngang là 50 kN, tương ứng với ứng suất tác dụng lên mẫu là 40 Mpa.

Ứng suất thẳng đứng được đo bằng đầu đo lực trong, gắn vào đầu piston, ngập trong chất lỏng của buồng áp lực. Đầu đo lực có dải hoạt động lên đến 8 kN, tương ứng với ứng suất thẳng đứng 6,3 Mpa, sai số nhỏ hơn 0,1%.



Hình 1 : Thiết bị cơ bản máy nén 3 trục



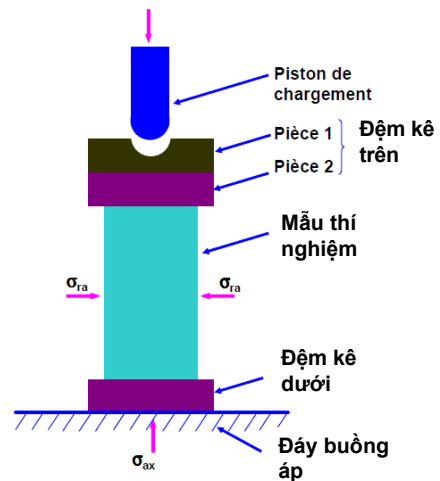
Hình 2 : Sơ đồ buồng áp lực

1.2 THIẾT KẾ ĐỆM KÊ MẪU

Trong nghiên cứu này sử dụng loại đệm kê vừa cho phép xoay vừa cho phép dịch chuyển ngang so với piston. Loại đệm kê động này đảm bảo được sự tiếp xúc tốt nhất giữa mẫu và đệm kê ngay từ khi bắt đầu thí nghiệm. Sự song song của bề mặt đệm kê và mặt mẫu được đảm bảo nhờ cấu tạo trục xoay. Với hai chế độ thí nghiệm nén và giãn sẽ sử dụng hai kiểu cấu tạo đệm kê trên khác nhau. Trong khi đó đệm kê dưới cho hai chế độ thí nghiệm là như nhau. Đệm kê dưới có dạng hình trụ có đường kính 43mm nằm trên đáy của buồng áp lực.

a) Đệm kê trên cho thí nghiệm nén (Hình 3)

Đệm kê trên bao gồm hai nửa làm bằng vật liệu inox có đường kính 43mm. Nửa phía trên có một lỗ bán cầu. Bề mặt tiếp xúc hai nửa trên và dưới của đệm kê được làm rất nhẵn để giảm tối đa ma sát tiếp xúc. Khi gia tải, piston sẽ tì đầu tròn vào lỗ bán cầu của nửa trên đệm kê. Nửa trên này có thể quay xung quanh đầu piston. Bề mặt tiếp xúc của hai nửa đệm kê được bôi trơn nhằm cho phép một sự dịch chuyển ngang tương đối giữa chúng.



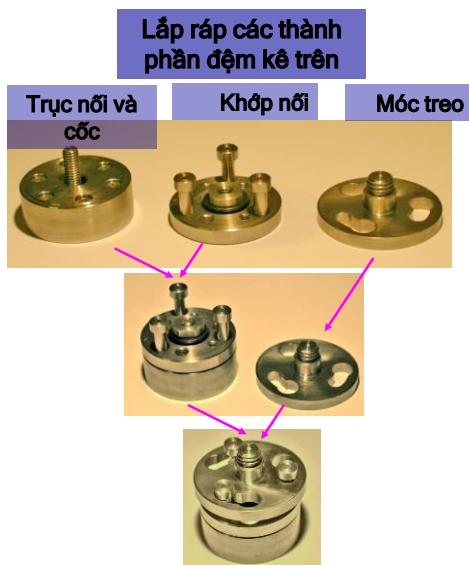
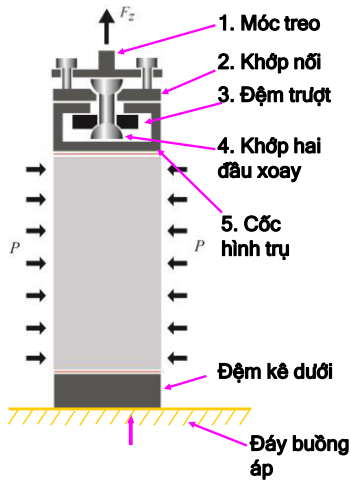
Hình 3 : Sơ đồ mẫu và đệm kê trong thí nghiệm nén

b) Đệm kê trên cho thí nghiệm kéo (Hình 4)

Trong thí nghiệm giãn, piston dịch chuyển lên trên và kéo đệm kê nhằm giảm ứng suất dọc trong mẫu. Đệm kê trên được thiết kế bao gồm 4 phần: một cốc hình trụ có đường kính 40 mm, một trục nối với hai đầu

xoay, một đệm trượt nằm giữa một đầu trục và cốc hình trụ, một khớp nối.

Trục nối hai đầu xoay kết nối giữa cốc và khớp nối cho phép một sự xoay tương đối giữa chúng. Đệm trượt sẽ cho phép một sự dịch chuyển ngang tương đối giữa cốc và khớp nối. Khớp nối sẽ treo vào piston nhờ vào 3 vít ở phía trên.



Hình 4 : Sơ đồ cấu tạo và lắp ráp đệm kê trong thí nghiệm giãn

1.3 KỸ THUẬT GIẢM MA SÁT BẰNG VẬT LIỆU BÔI TRƠN

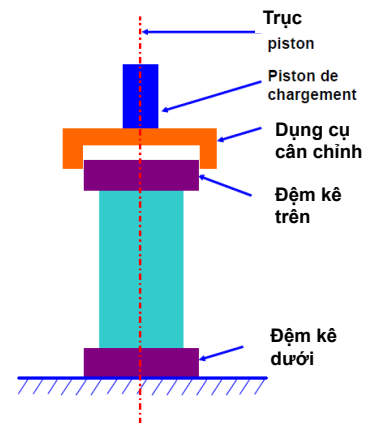
Ma sát tiếp xúc giữa bàn nén và mẫu ngăn cản biến dạng ngang của mẫu, làm rối loạn trường ứng suất và biến dạng. Hiện tượng này có thể dẫn đến sự tăng cao cường độ mẫu một cách giả tạo cũng như làm nhiễu loạn sự phá hoại mẫu do hiệu ứng biên. Để giảm ma sát, chúng tôi sử dụng vật liệu bôi

trơn mang mã hiệu TCX1, một sản phẩm gốc hydrocarbures rắn và lỏng. Qua thí nghiệm cho thấy hệ số ma sát giữa hai bề mặt hợp kim nhôm khi bôi trơn bằng TCX1 là $\mu=0,016$. Sản phẩm này còn tốt hơn sản phẩm thường được sử dụng ở các phòng thí nghiệm là hỗn hợp axit stearic trộn với vaseline [16] có hệ số ma sát là 0,022.

Tuy nhiên, hợp chất TCX1 không được bôi trực tiếp lên mẫu đá vì nó có thể thẩm thấu vào đá gây ra các phản ứng hóa học. Do vậy một tấm teflon có chiều dày 0,1 mm được sử dụng để ngăn cách mẫu với chất bôi trơn. Tấm teflon này biến dạng trong quá trình gia tải cùng với mẫu giúp giảm thiểu được các hiệu ứng biên. Kỹ thuật giảm một cách hiệu quả ma sát tiếp xúc, cho phép tạo ra sự biến dạng đồng đều trong mẫu khi thí nghiệm.

1.4 ĐẢM BẢO SỰ ĐỒNG TRỤC GIỮA MẪU VÀ HỆ GIA TẢI

Mẫu thí nghiệm phải được cân chỉnh đồng trục với hệ gia tải thẳng đứng để ứng suất trong mẫu được phân bố đều. Nếu sự đồng trục không được đảm bảo, lực dọc đặt lệch tâm sẽ làm cho mẫu bị uốn, đệm kê sẽ bị trượt trên bề mặt mẫu trong quá trình thí nghiệm. Để đảm bảo sự đồng trục, một dụng cụ dạng ống tube gắn cố định vào piston. Đường kính trong của ống tubes lớn hơn đường kính đệm kê 0,3 mm. Nguyên lý rất đơn giản, đệm kê cũng như mẫu sẽ được cân chỉnh đồng trục nếu đệm kê lọt được vào trong ống tube (Hình 5).



Hình 5 : Sơ đồ nguyên lý dụng cụ cân chỉnh mẫu bằng dụng cụ dạng tube

1.5 THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐO BIẾN DẠNG TRONG

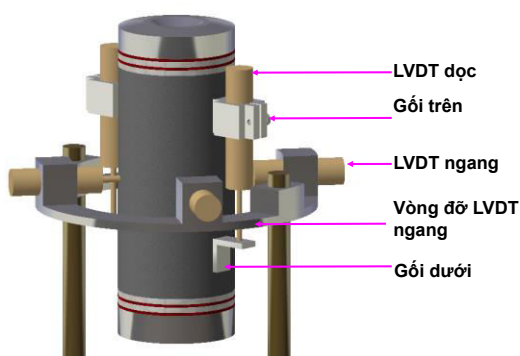
Để đo biến dạng, đề tài sử dụng các sensor chuyển vị dạng LVDT. Sở dĩ chúng được lựa chọn vì các lý do như: nhiều lựa chọn về giới hạn đo, rất ít ảnh hưởng bởi sự thay đổi áp lực và nhiệt độ, ổn định với giao động điện từ, ổn định số đo với thời gian [37]. Các sensor LVDT sử dụng ở đây sản xuất bởi hãng RDPE cho phép đo với độ chính xác rất cao, sai số < 0,1%, giới hạn đo là 5mm.

Hệ thống đo biến dạng bao gồm 2 LVDT dọc và 4 LVDT ngang hướng tâm. Hai cấu hình bố trí LVDT được sử dụng. Các LVDT đứng có thể dán trực tiếp lên mẫu thử (cấu hình 1, hình 6,7,8) hay gắn lên một vòng kim loại tỳ lên mẫu thử (cấu hình 2, hình 9,10).

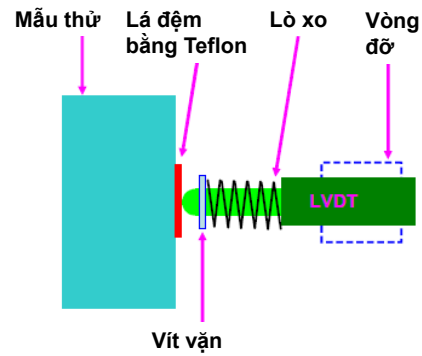
a). Cấu hình 1 (Hình 6,7,8)

Với mỗi sensor LVDT dọc, cần có hai gối đỡ trên và dưới dán trực tiếp lên màng kín bao quanh mẫu. Gối đỡ trên nhằm cố định thân LVDT, phần lõi di động của LVDT tỳ xuống gối đỡ dưới. Các gối đỡ làm bằng hợp kim nhôm, dán lên màng kín bằng keo cyanoacrylate. Hai LVDT dọc được đặt trên hai đường sinh đối diện qua tâm mẫu. Do các gối đỡ LVDT này không gắn trực tiếp lên bề mặt mẫu nên không ảnh hưởng đến sự ứng xử của mẫu trong quá trình thí nghiệm. Cấu hình 1 này đã được kiểm nghiệm thành công trong các dự án nghiên cứu của Bésuelle [16].

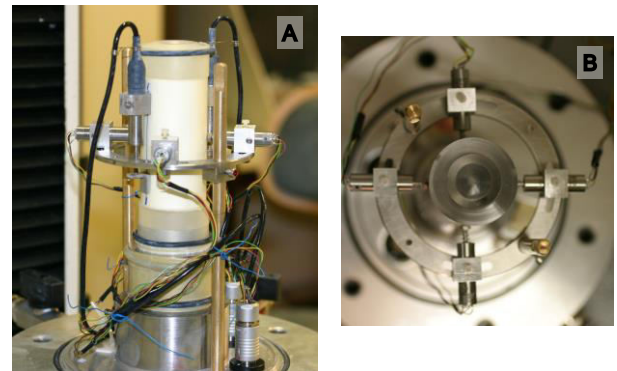
Vì lý do giới hạn thể tích lắp đặt trong buồng áp và hình dáng mẫu, cấu hình 1 chỉ áp dụng cho các thí nghiệm với mẫu hình trụ trong các thí nghiệm nén và giãn. Với mẫu thử dạng xương chó, chúng tôi sử dụng cấu hình 2.



Hình 6 : Sơ đồ bố trí LVDT của Cấu hình 1



Hình 7 : Sơ đồ bố trí LVDT ngang



Hình 8 : Bố trí LVDT thực tế trên mẫu theo cấu hình 1. A: Nhìn tổng thể; B: Nhìn từ trên xuống

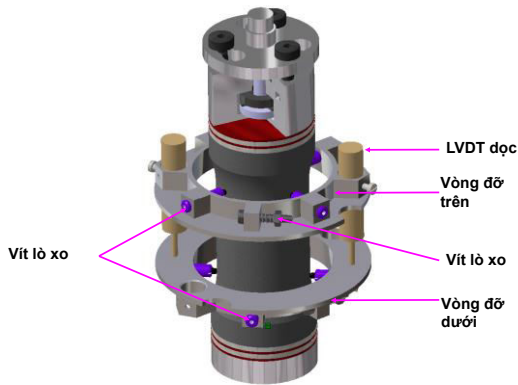
b). Cấu hình 2 (Hình 9,10)

Trong trường hợp mẫu xương chó (xem phần 1.7), phần đường kính cố định ở giữa mẫu thử rất ngắn, cấu hình 1 không còn phù hợp. Lúc này cần áp dụng cấu hình 2 chiếm ít không gian hơn, để bố trí hơn.

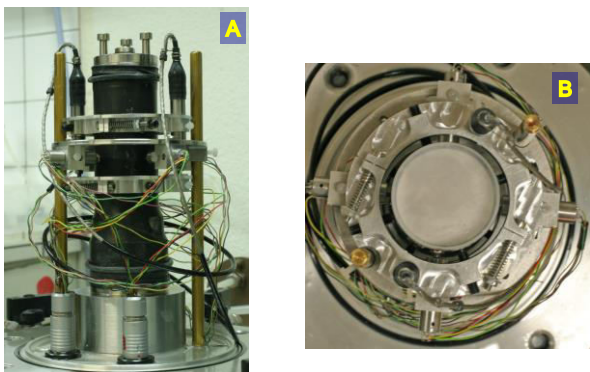
Trong cấu hình 2, các LVDT thẳng đứng được lắp đặt trên hai vòng đỡ hợp kim treo trên mẫu. Vòng đỡ phía trên giữ phần thân của LVDT, vòng đỡ phía dưới đỡ phần lõi của LVDT. Các vòng này bao gồm hai nửa ghép lại nối với nhau bằng vít lò xo nên hoàn toàn không cản trở sự biến dạng mẫu. Các vòng đỡ được treo và cố định lên thân mẫu nhờ vào bốn vít lò xo. Tại vị trí tiếp giáp đầu các lò xo và mẫu được lót một tấm đệm nhôm nhằm hạn chế sự tập trung ứng suất lên mẫu. Độ cứng của các lò xo vít được lựa chọn sao cho các vòng hợp kim được cố định tốt lên mẫu nhưng không gây ra ảnh hưởng đáng kể cho biến dạng ngang của mẫu. Kiểu cấu hình 2 này đã được áp dụng thành công trong các

ngiên cứu của Sulem và Ouffroukh [23].

Cả trong cấu hình 1 và 2, 4 LVDT ngang được gắn trên một vòng hợp kim có định vào 2 thanh gắn vào đáy buồng áp lực. Các LVDT ngang hướng vào tâm mẫu đặt trên 2 trục vuông góc ở cao độ giữa chiều cao mẫu (Hình 7).



Hình 9 : Sơ đồ bố trí LVDT trong cấu hình 2



Hình 10 : Bố trí LVDT thực tế trên mẫu theo cấu hình 2. A: Nhìn tổng thể; B: Nhìn từ trên xuống

1.6 MỘT SỐ CÔNG THỨC TÍNH TOÁN

Hình vẽ 11 thể hiện vị trí các sensor gắn trên mẫu. Khoảng cách giữa các gối tựa của LVDT dọc là L. Bốn điểm 1,2,3,4 nằm ở giữa mẫu là những điểm tỳ của các lõi LVDT ngang.

a) Tính toán ứng suất

- Ứng suất thẳng đứng : $\sigma_{zz} = P + \frac{F_{zz}}{S}$, trong đó P là áp lực buồng, F_{zz} là lực dọc tác dụng lên mẫu, S là diện tích mẫu.
- Ứng suất ngang : $\sigma_{ra} = P$,
- Ứng suất lệch : $q = |\sigma_{zz} - \sigma_{ra}|$,
- Trong thí nghiệm nén 3 trục :

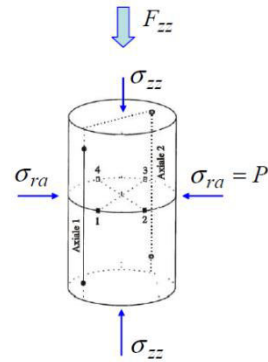
$$\sigma_1 = \sigma_{zz}, \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{ra} = P;$$

Trong thí nghiệm giãn ba trục :

$$\sigma_3 = \sigma_{zz}, \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{ra} = P;$$

- Ứng suất Von mise :

$$\tau = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right) s_{ij} \cdot s_{ij}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}}$$



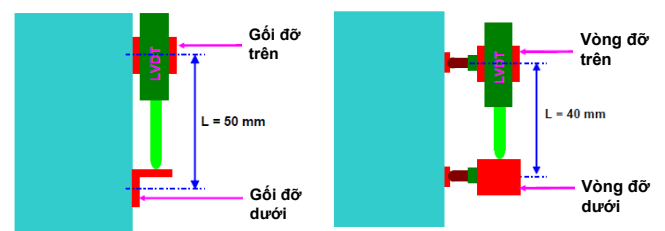
Hình 11 : Sơ đồ bố trí các điểm đo và biến dạng

b) Tính toán biến dạng

- Biến dạng dọc thành phần :

$$\varepsilon_{zz}^{(1,2)} = \frac{\Delta l_{LVDT(1,2)}}{L}$$

trong đó $\Delta l_{LVDT(1,2)}$ là các chuyển vị tương đối đo được bởi các LVDT 1 và 2. L là khoảng cách giữ hai gối đỡ dán trên màng kín bao xung quanh mẫu trong cấu hình 1 hay khoảng cách giữa hai vòng đỡ trong cấu hình 2 (Hình 12).



Hình 12 : Chiều dài L trong công thức tính biến dạng dọc. Hình trái : L = 50 mm cho cấu hình 1, Hình phải: L= 40mm cho cấu hình 2

- Biến dạng dọc trung bình:

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\varepsilon_{zz}^{(1)} + \varepsilon_{zz}^{(2)}}{2}$$

- Độ vênh hai biến dạng dọc :

$$\Delta \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{zz}^{(1)} - \varepsilon_{zz}^{(2)}$$

- Các biến dạng ngang thành phần :

$$\varepsilon_{ra}^{(1)} = \frac{\Delta l_{LVDT(3)} \Delta l_{LVDT(4)}}{D}$$

$$\varepsilon_{ra}^{(2)} = \frac{\Delta l_{LVDT(5)} \Delta l_{LVDT(6)}}{D}$$

- Biến dạng ngang trung bình :

$$\varepsilon_{ra} = \frac{\varepsilon_{ra}^{(1)} + \varepsilon_{ra}^{(2)}}{2}$$

- Độ vênh hai biến dạng ngang : $\Delta \varepsilon_{ra} = \varepsilon_{ra}^{(1)} - \varepsilon_{ra}^{(2)}$;

1.7 VẬT LIỆU VÀ MẪU THỬ NGHIỆM GRAM1

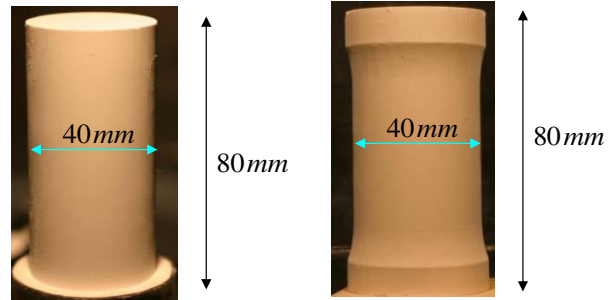
Việc lựa chọn thí nghiệm để tiến hành không những chỉ để thử nghiệm sự hoạt động của máy và các thiết bị đo mà còn khẳng định, tìm ra các đặc điểm ứng xử của vật liệu, đặc biệt sự phụ thuộc vào lộ trình ứng suất như đã nêu trong chương 1.

Vật liệu được lựa chọn là một loại đá nhân tạo được định danh là GRAM1 sản xuất bởi Phòng thí nghiệm GeosciencesAzur trong khuôn khổ dự án Geo-FracNet. Vật liệu có thành phần chủ yếu là hạt oxit titan TiO_2 này được xem là loại vật liệu tương tự đá vôi và đá cát kết. Trong các nghiên cứu của Chemenda [30], ông đã chứng minh rằng GRAM1 thỏa mãn các quy luật về tương đồng vật lý, một mô hình có chiều dày 1 cm vật liệu GRAM1 có thể mô hình cho khối đá vôi tự nhiên có chiều dày 1m. Việc sử dụng GRAM1 cho phép rất nhiều lợi thế so với đá tự nhiên:

- Độ cứng của GRAM1 nhỏ hơn đá tự nhiên hàng trăm lần và cũng nhỏ hơn rất nhiều lần đối với độ cứng phần gia tải của thiết bị. Cường độ của mẫu nhỏ hơn hàng trăm lần so với đá tự nhiên, do vậy chỉ cần sử dụng các thí bị gia tải tương đối nhẹ, thao tác đơn giản hơn và tăng cường được độ chính xác các dụng cụ đo;
- Các mẫu GRAM1 được sản xuất trong phòng thí nghiệm theo một quy trình rất chặt chẽ. Do vậy các mẫu thử rất đồng nhất và có tính lặp lại rất cao. Điều này cho phép giảm thiểu tối đa số lượng các thí nghiệm cần tiến hành.

Có hai loại mẫu được sử dụng. Mẫu hình trụ với đường kính 38 mm, chiều cao 76 mm dùng cho thí nghiệm nén. Mẫu xương chó có đường kính nhỏ nhất 40 mm, đường

kính lớn nhất thay đổi từ 40 đến 45 mm (Hình 13). Chiều dài mẫu phần có đường kính cố định là 40 mm. Việc xác định hình dáng và kích thước của mẫu xương chó cũng đã được thí nghiệm tỷ mỉ sao cho hình dáng của mẫu không gây ra tập trung ứng suất, ứng xử của mẫu phải giống như ứng xử của mẫu hình trụ.



Hình 13 : Mẫu hình trụ và mẫu xương chó

1.8 QUY TRÌNH THÍ NGHIỆM

Trước hết, mẫu chịu một áp lực thủy tĩnh P , áp lực này tăng dần từ 0 Mpa với tốc độ 25 kPa/min tới giá trị yêu cầu. Sau đó P sẽ được giữ nguyên và ứng suất σ_{zz} sẽ được tác dụng khi piston chuyển động xuống dưới hoặc lên trên với vận tốc 10^{-6} m/s. Các vận tốc gia tải nêu trên được lựa chọn sau các thí nghiệm sơ bộ nhằm xác định sự ảnh hưởng của vận tốc gia tải tới ứng xử của vật liệu. Với vận tốc nhỏ hơn 10^{-5} m/s, sự thay đổi vận tốc sẽ không ảnh hưởng đến ứng xử của vật liệu.

Các thí nghiệm, trong quá trình biến dạng đồng đều, nếu độ lệch của các biến dạng thành phần vượt quá 10% biến dạng trung bình sẽ bị loại bỏ. Với mỗi điều kiện thí nghiệm tối thiểu 2 thí nghiệm được tiến hành, nếu độ lệch ứng suất và biến dạng tại điểm phá hoại không chênh nhau quá 5% thì các thí nghiệm được xem là thực hiện tốt.

Sau khi mẫu bị phá hoại, xuất hiện các vết nứt, hoặc đã đạt đến một biến dạng hay ứng suất kỳ vọng, trước hết ứng suất lệch được giảm với tốc độ rất chậm cho đến 0. Tiếp đến áp lực bù cũng giảm một cách từ từ đến 0 để tránh làm hư hại hiện trạng mẫu, cho phép thực hiện các thí nghiệm tiếp theo liên quan đến vi cấu trúc của mẫu, của vết nứt hay băng biến dạng hình thành trong mẫu. Trong trường hợp mẫu dễ bị tách rời, sau khi

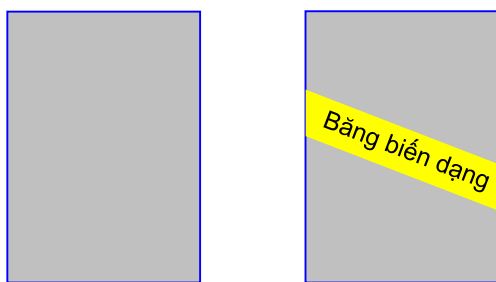
giảm ứng suất lệch cần bơm vào trong mẫu chất lỏng dạng Epoxy có tác dụng đông kết mẫu trước khi lấy mẫu ra khỏi buồng áp lực.

2. CÁC KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

2.1 XÁC ĐỊNH ĐIỂM RỄ NHÁNH

Các thí nghiệm nén và giãn ba trục được thực hiện dưới các áp lực buồng P từ 0 đến 1,5 Mpa. Như đã đề cập ở trên, trong giai đoạn đầu của quá trình gia tải lệch (tăng ứng suất lệch), biến dạng của mẫu là đồng đều. Sau đó sự biến dạng đồng đều này sẽ mất đi, thay vào đó biến dạng sẽ tập trung vào trong một dải hẹp và phát triển thành vết nứt lớn, phá hủy mẫu (Hình 14). Thời điểm chuyển đổi từ biến dạng đồng đều sang bằng biến dạng gọi là thời điểm rẽ nhánh.

Để phát hiện thời điểm rẽ nhánh có nhiều kỹ thuật khác nhau. Có thể dùng phương pháp siêu âm mẫu liên tục, phương pháp này rất tốn kém và phức tạp. Ngoài ra người ta còn dùng phương pháp nghe âm và định vị không gian vết nứt qua âm thanh rất nhỏ khi các vị vết nứt trong mẫu phát triển, tuy nhiên phương pháp này đòi hỏi phòng cách âm và cũng rất tốn kém phức tạp. Hai phương pháp khác đơn giản và rẻ tiền hơn : dùng camera cực nhanh theo dõi trường biến dạng và phương pháp đo đa điểm.

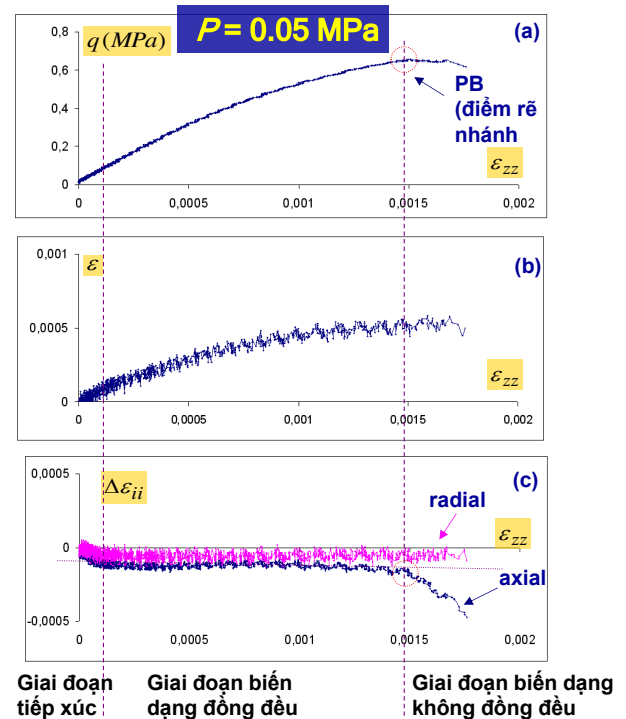


Hình 14 : Biến dạng trong mẫu chuyển từ đồng đều (hình trái) trong giai đoạn đầu gia tải sang biến dạng tập trung trong dải biến dạng hẹp (hình phải)

Phương pháp đo đa điểm được ứng dụng trong nghiên cứu này. Trong giai đoạn biến dạng đồng đều, các sensor lắp đặt ở các

vị trí khác nhau phải đo được các biến dạng bằng nhau. Tại thời điểm rẽ nhánh, các số đo sẽ không còn bằng nhau nữa và thời điểm xuất hiện độ lệch đo giữa các sensor chính là thời điểm rẽ nhánh. Kỹ thuật này đã được áp dụng trong nhiều nghiên cứu [16,23,24].

Để phát hiện điểm rẽ nhánh, ta sử dụng đồng thời 3 đường cong (q, ε_{zz}), ($\varepsilon, \varepsilon_{zz}$), ($\Delta\varepsilon_{ra,zz}, \varepsilon_{zz}$). Ví dụ, trong thí nghiệm nén tại $P = 0.05$ Mpa, điểm rẽ nhánh nằm liền ngay trước đỉnh ứng suất, tại vị trí vẽ vòng tròn trên hình 15.



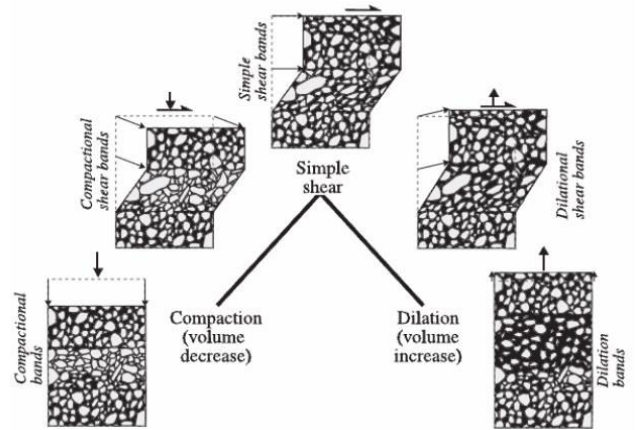
Hình 15 : Các giai đoạn khác nhau của biến dạng trong thí nghiệm tại $P = 0,05$ Mpa và vị trí điểm rẽ nhánh

Như chúng ta thấy trên các đường cong ($\Delta\varepsilon_{ra,zz}, \varepsilon_{zz}$) bao gồm 3 giai đoạn. Giai đoạn đầu tiên tương ứng với thời điểm piston bắt đầu đè lên đệm kê, tác dụng lực dọc xuống mẫu thử. Dù bề mặt mẫu đã được làm ngang phẳng tối đa nhưng không thể tuyệt đối cho nên số đo các điểm khác nhau có một độ lệch nhỏ. Tuy nhiên, do cấu tạo của đệm kê cho phép xoay và trượt, đồng thời tẩm lót Teflon giữa mẫu và đệm kê tương đối mềm, sự không tuyệt đối nhẵn, phẳng của bề mặt mẫu được điều chỉnh nhanh chóng. Ở giai

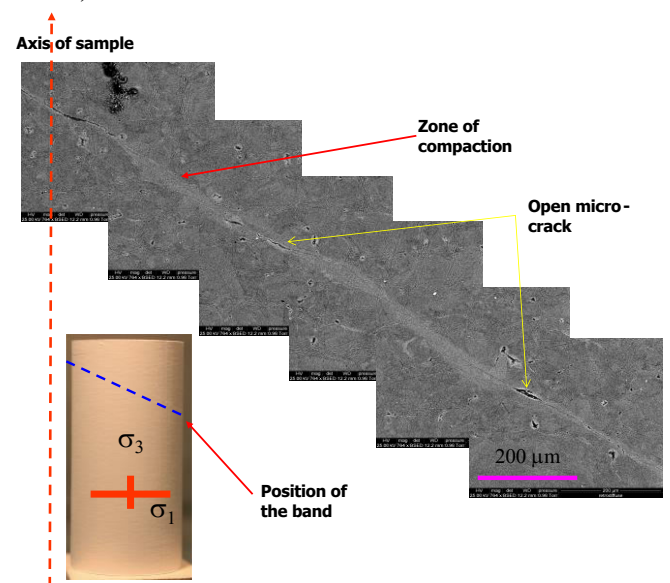
đoạn tiếp theo, trong giai đoạn biến dạng đồng đều, số đo các điểm đo là giống nhau, hoặc nếu có sự khác nhau thì cũng rất nhỏ và phát triển một cách tuyến tính. Kể từ điểm rẽ nhánh, sự khác nhau giữa các điểm đo tăng đột biến và không tuyến tính. Lúc này biến dạng của mẫu đã chuyển sang không đồng đều, tập trung chủ yếu trong vết nứt hay băng biến dạng.

Việc xác định điểm rẽ nhánh bằng đo đa điểm nêu trên còn được hỗ trợ, khẳng định bằng phương pháp sử dụng kính hiển vi điện tử. Sau khi đã xác định được giá trị biến dạng tại điểm rẽ nhánh bằng phương pháp đo đa điểm, hai thí nghiệm tiếp theo sẽ được tiến hành. Một thí nghiệm sẽ được dừng lại liền trước điểm rẽ nhánh xác định ở trên và một thí nghiệm khác sẽ được dừng lại liền sau điểm rẽ nhánh. Tiến hành quan sát các mặt cắt dọc mẫu dưới kính hiển vi, phần lớn cho thấy sự trùng khớp với kết quả xác định điểm rẽ nhánh bằng phương pháp đo đa điểm. Nếu dừng trước điểm rẽ nhánh, biến dạng trong mẫu vẫn đồng đều, không có vết nứt hay băng biến dạng. Nếu dừng sau, rõ ràng có băng biến dạng trong mẫu. Ngoài ra, nhờ vào kính hiển vi điện tử, ta còn biết được vi cấu trúc của vết nứt, băng biến dạng. Trường hợp mật độ vật chất trong băng biến dạng nhỏ hơn bên ngoài băng, ta sẽ có băng biến dạng giãn, ngược lại nếu mật độ vật chất trong băng lớn hơn bên ngoài băng ta sẽ có băng nén chặt. Nếu mật độ vật chất như nhau bên trong và bên ngoài băng, chỉ số sự xáo trộn, dịch chuyển các hạt trong băng ta sẽ có băng cắt thuần túy, ngoài ra ta còn có các loại băng là hỗn hợp như nén chặt-cắt, giãn -cắt (Hình 16).

Sự xuất hiện các loại băng giãn, nén chặt, cắt thuần túy của vật liệu phụ thuộc vào điều kiện ứng suất và lộ trình gia tải, các nghiên cứu liên quan đến vật liệu GRAM1 được trình bày trong các công bố của Si-H. Nguyen và của Chemenda [34-36]. Ở đây, chúng ta không đi sâu vào vấn đề này mà chỉ đưa ra một ví dụ hỗ trợ cho vấn đề chính của đề tài. Các hình ảnh của một băng nén chặt – cắt của thí nghiệm giãn 3 trục thực hiện ở $P = 1.2$ Mpa thể hiện trong Hình 17.



Hình 16 : Các loại băng biến dạng (Fossen, 2007)



Hình 17 : Băng nén chặt – cắt quan sát ở thí nghiệm giãn tại $P = 1.2$ Mpa

a) Thí nghiệm nén

Với các thí nghiệm nén, khi áp lực buồng tăng lên, điểm rẽ nhánh càng cách xa đỉnh ứng suất. Khi áp lực buồng tăng lên đến $P = 0.4$ Mpa, điểm rẽ nhánh không thể hiện rõ rệt, không còn đỉnh ứng suất nữa mà ứng suất dọc tăng lên liên tục theo biến dạng. Khi áp lực buồng $P = 0.9$ Mpa hoặc cao hơn, hầu như không còn dấu hiệu của điểm rẽ nhánh. Độ lệch của các điểm đo thành phần rất nhỏ cho dù biến dạng dọc đã đạt đến trị số lớn (10%). Như vậy chúng ta thấy, khi điểm rẽ nhánh có thể xác định, điểm này thường xuyên nằm trước đỉnh ứng suất, trong khoảng 87% đến 100% giá trị ứng suất đỉnh (Bảng 1). Điều này tương hợp với kết quả của Besuelle [16] thực

hiện trên đá cát kết Vosges với tỷ lệ so với ứng suất đỉnh là 75 đến 100%, hay của Ouffroukh [38] với tỷ lệ 70 đến 95%. Khi tăng áp lực buồng P , biến dạng càng ít cục bộ (đồng đều hơn), do vậy điểm rẽ nhánh khó phát hiện rõ nét hơn. Đến các áp lực buồng P rất cao (từ 0.9 đến 1.2 Mpa), điểm rẽ nhánh xem như biến mất, không xác định được.

Bảng 1 : Bảng vị trí điểm rẽ nhánh (PB) trong thí nghiệm nén ở các áp lực buồng P khác nhau

Mã số thí nghiệm	P (MPa)	q_{pic} (MPa)	q_{PB} (MPa)	q_{PB} / q_{pic} x100%	ϵ_{zz}^{pic}	ϵ_{zz}^{PB}
Co-88	0,05	0,655	0,649	99,08	0,00151	0,001476
Co-65	0,05	0,6834	0,677	99,06	0,00167	0,00158
Co-87	0,1	0,6925	0,6892	99,52	0,00163	0,0016
Co-19	0,1	0,6935	0,675	97,33	0,00165	0,00155
Co-85	0,15	0,767	0,758	98,83	0,00165	0,00159
Co-79	0,15	0,72	0,708	98,33	0,00172	0,00159
Co-90	0,2	0,815	0,8	98,16	0,00228	0,00214
Co-82	0,2	0,88	0,877	99,66	0,0025	0,00238
Co-83	0,2	0,837	0,804	96,06	0,0025	0,0021
Co-78	0,25	0,887	0,831	93,69	0,0049	0,0026
Co-77	0,25	0,935	0,885	94,65	0,00575	0,003
Co-23	0,3	0,983	0,95	96,64	0,0061	0,0036
Co-76	0,3	1,003	0,976	97,31	0,0055	0,0038
Co-63	0,35	1,0028	0,963	96,03	0,0055	0,00385
Co-20	0,4	1,027	0,945	92,02	0,008	0,004
Co-74	0,4	1,079	0,936	86,75	0,0079	0,004
Co-108	0,45	1,047	1,007	96,18	0,0095	0,0044
Co-121	0,5	1,05	1,01	96,19	0,01	
Co-63	0,5	1,07	1,01	94,39		0,00674

b) Thí nghiệm giãn

Trong các thí nghiệm giãn, với $P \leq 1.0$ Mpa, điểm rẽ nhánh rất gần hoặc trùng với đỉnh ứng suất. Với $1.1 \text{ Mpa} \leq P \leq 1.3 \text{ Mpa}$, điểm rẽ nhánh thể hiện không rõ ràng như trong các thí nghiệm có P bé hơn. Với $P \geq 1.4$ Mpa, điểm rẽ nhánh thể hiện rất không rõ ràng. Cũng như trong các thí nghiệm nén, điểm rẽ nhánh thường xuyên nằm trước đỉnh ứng suất, trong khoảng 97% đến 100% giá trị ứng suất đỉnh (Bảng 2).

3.2 SỰ PHÁ HOẠI MẪU

a) Thí nghiệm nén

Khi áp lực buồng $P = 0$, các vết nứt của mẫu là những đường song song, bề mặt vết nứt có vân dạng hình cánh chim. Đây là loại vân nứt đặc trưng của phá hoại dòn loại 1 khi vật liệu bị nứt thuần túy do ứng suất kéo. Khi áp lực buồng P nằm trong khoảng 0.1 đến

0.2 Mpa, vết nứt của mẫu là một mặt phẳng xiên duy nhất, độ nghiêng ψ của vết nứt so với phương ứng suất lớn nhất σ_1 (trong trường hợp này là phương đứng) tăng lên cùng với P .

Khi áp lực buồng P nằm trong khoảng 0.25 đến 0.3 Mpa, nhiều băng biến dạng (không phải là vết nứt hở, vật liệu vẫn liên mạch, liên tục) xiên, đan chéo nhau xuất hiện. Khi áp lực buồng P nằm trong khoảng 0.4 đến 0.75 Mpa, nhiều băng rời rạc uốn cong theo phương ngang hoặc nghiêng với góc lớn xuất hiện trên bề mặt mẫu (Hình 18). Khi áp lực buồng $P \geq 0.9$ Mpa, bề mặt mẫu vẫn phẳng nhẵn, không xuất hiện bất kỳ dấu vết của vết nứt hay băng biến dạng nào dù biến dạng dọc đã đạt đến 10%.

Bảng 2 : Bảng vị trí điểm rẽ nhánh (PB) trong thí nghiệm giãn ở các áp lực buồng P khác nhau

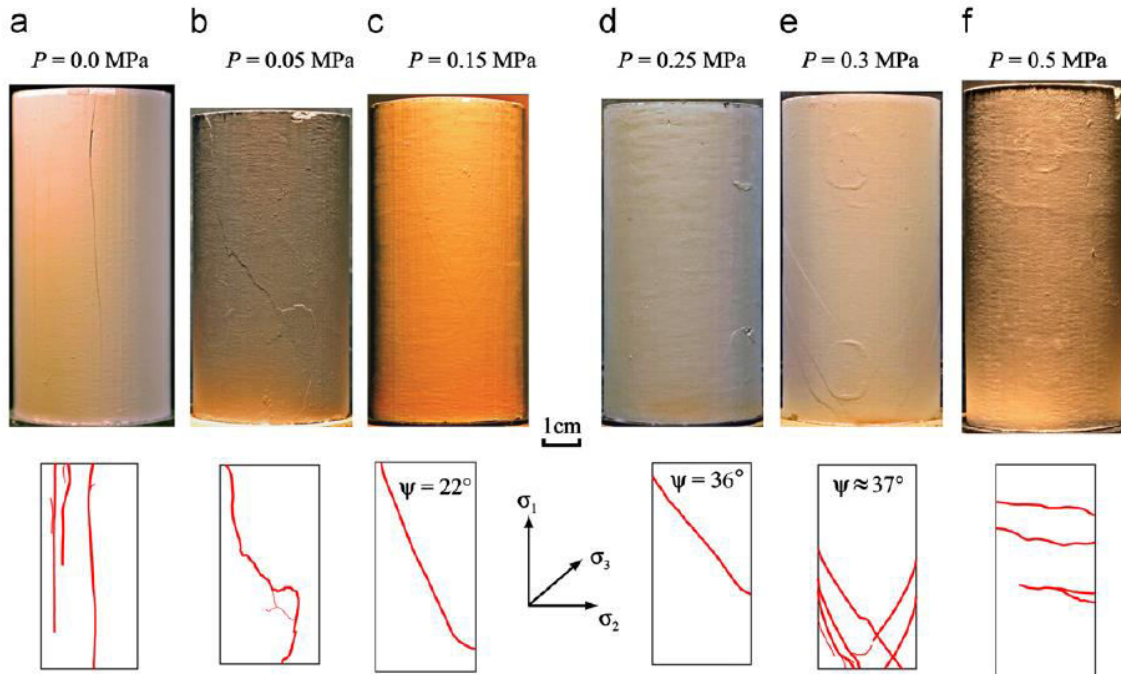
Mã số TN	P	q_{pic}	q_{pb}	$q_{pb}/q_{pic} \times (100\%)$	ϵ_{zz}^{pic}	ϵ_{zz}^{pb}
Ex-160	0,4	0,456	0,452	99,12	0,0007459	0,00073
Ex-157	0,5	0,548	0,548	100,00	0,00998	0,00998
Ex-171	0,5	0,5417	0,533	98,39	0,00873	0,0086
Ex-156	0,6	0,63	0,615	97,62	0,00128	0,0012
Ex-172	0,6	0,643	0,643	100,00	0,00128	0,00128
Ex-165	0,65	0,678	0,678	100,00	0,00133	0,00133
Ex-95	0,675	0,644	0,64	99,38	0,00146	0,00141
Ex-81	0,7	0,649	0,637	98,15	0,00141	0,00134
Ex-58	0,7	0,69	0,652	94,49	0,001568	0,001335
Ex-76	0,7	0,646	0,63	97,52	0,00136	0,00125
Ex-53	0,8	0,723	0,723	100,00	0,00142	0,00142
Ex-154	0,8	0,752	0,751	99,87	0,001734	0,00169
Ex-47	0,9	0,748	0,752	100,53	0,00182	0,001794
Ex-100	0,9	0,801	0,801	100,00	0,0021	0,0021
Ex-54	1	0,806	0,762	94,54	0,002	0,00165
Ex-4a4	1	0,864	0,829	95,95	0,003	0,003
Ex-110	1	0,841	0,829	98,57	0,0024	0,00226
Ex-103	1,1	0,909	0,904	99,45	0,00316	0,00282
Ex-131	1,2	0,966	0,965	99,90	0,0045	0,00446
Ex-a5	1,2	0,958	0,957	99,90	0,0049	0,00461
Ex-99	1,3	1,013	1,0009	98,81	0,006	0,0043
Ex-a1	1,3	1,033	1,0009	96,89	0,0043	0,00426
Ex-105	1,4	1,07	1,06	99,07	0,00678	0,0042
Ex-57	1,5	1,056	1,01	95,64	0,007	0,00348

b) Thí nghiệm giãn

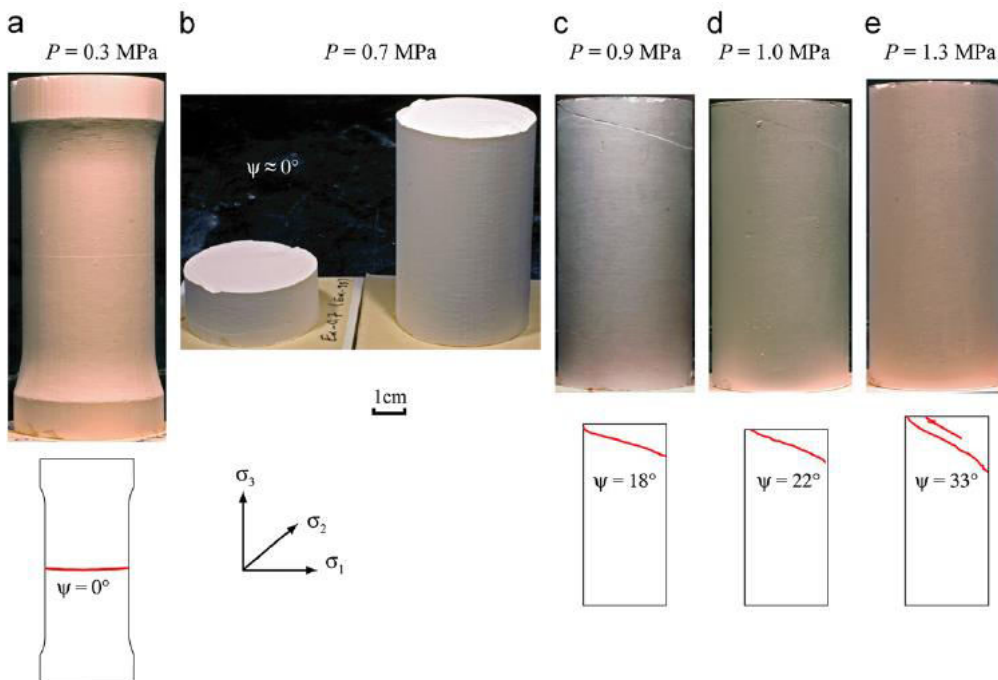
Với $P \leq 0.65$ Mpa, vết nứt (hở) hoặc băng biến dạng (kín, vật liệu vẫn liên tục) nằm ngang. Các vết nứt hoặc băng gần như một vòng tròn hoàn hảo tạo với phương đứng một góc 90° , điều này chứng tỏ các thí nghiệm được thực hiện trong điều kiện hoàn hảo. Với $0.7 \leq P \leq 0.65$ Mpa, một băng biến dạng xiên được nhìn thấy trên bề mặt mẫu tại

thời điểm phá hoại. Góc nghiêng ψ của băng biến dạng so với phương ngang (so với phương ứng suất tối đa σ_1) tăng cùng với P . Với $P = 1.4$ Mpa, nhiều băng biến dạng xiên đan chéo nhau xuất hiện trên bề mặt mẫu. Các

băng xiên này phân bố cách nhau khá đều đặn, khoảng 5mm (Hình 19). Với $P = 1.5$ Mpa, hoàn toàn không có băng biến dạng hay vết nứt được quan sát thấy trên bề mặt mẫu dù biến dạng dọc đã đạt giá trị lớn.



Hình 18 : Hình dạng vết nứt/băng biến dạng của các thí nghiệm nén ở P khác nhau



Hình 19 : Hình dạng vết nứt/băng biến dạng của các thí nghiệm giãn ở P khác nhau

3.3 SỰ CHUYỂN DỊCH DÒN – ĐÈO

a) Thí nghiệm nén

Các đường cong (q, ε_{zz}) , $(\varepsilon, \varepsilon_{zz})$ ở các áp lực buồng P khác nhau được vẽ lên cùng trục tọa độ (Hình 20). Phân tích các đường cong ta thấy:

Trên đường cong (q, ε_{zz}) :

Đỉnh ứng suất cũng như biến dạng tại đỉnh ứng suất tăng lên cùng với áp lực buồng P ;

Với $0 \leq P \leq 0.3$ Mpa, sau đỉnh ứng suất, hoặc ứng suất bị giảm đột ngột hoặc có nhiều đợt giảm nhỏ chứng tỏ sự phát triển không ổn định của sự phá vỡ;

$P = 0.35$ Mpa, sau đỉnh ứng suất, ứng suất giảm dần một cách tịnh tiến, không đột ngột;

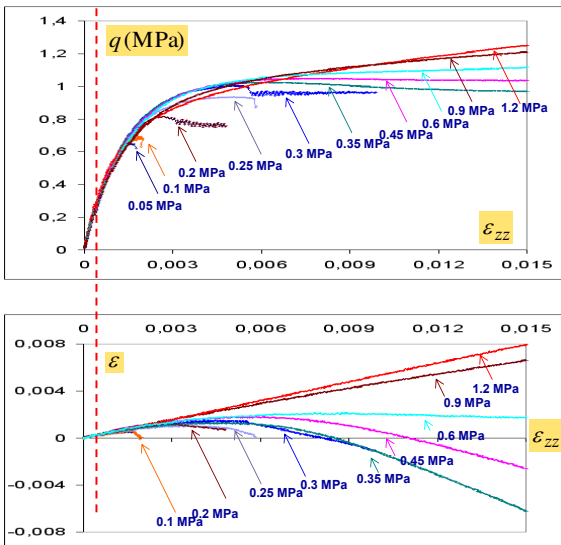
Với $P \geq 0.4$ Mpa, không còn tồn tại đỉnh ứng suất trong vùng biến dạng thí nghiệm ($\varepsilon_{zz} < 0.1$);

Trên đường cong $(\varepsilon, \varepsilon_{zz})$:

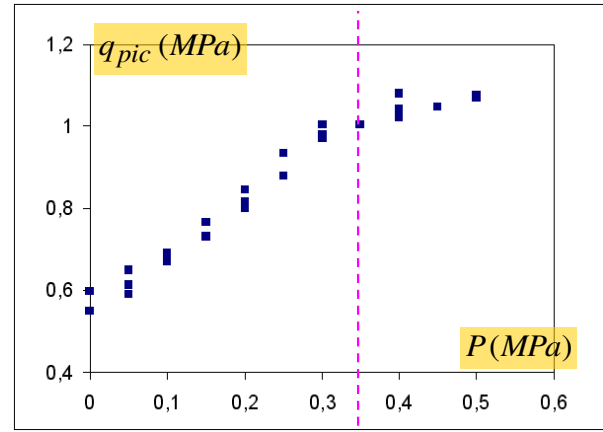
Biến dạng thể tích ε bắt đầu tăng lên (giảm thể tích) khi ε_{zz} tăng lên. Sau đó tùy vào áp lực buồng P mà ε giảm xuống (tăng thể tích) với $P \leq 0.5$ Mpa, hay ổn định với $P = 0.6$ Mpa, hoặc tiếp tục tăng lên với $P \geq 0.75$ Mpa.

Trên đường cong (q_{pic}, P) (Hình 21):

Có thể phân biệt hai phần : với $P \leq 0.35$ Mpa, q_{pic} tăng lên một cách tuyến tính với P . Với $P > 0.35$ Mpa, q_{pic} tăng lên với P nhưng chậm hơn rất nhiều.



Hình 20 : Các đường cong (q, ε_{zz}) , $(\varepsilon, \varepsilon_{zz})$ ở các áp lực buồng P khác nhau

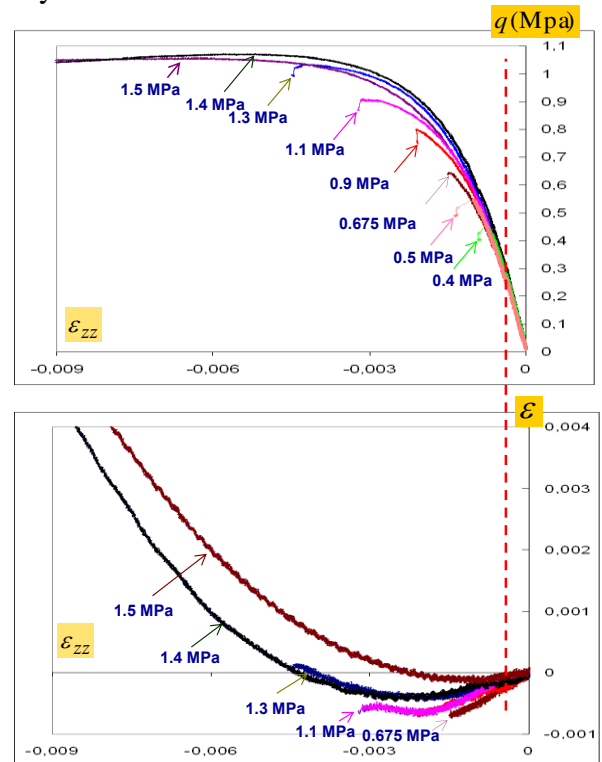


Hình 21 : Đường cong (q_{pic}, P) của các thí nghiệm nén

Phân tích các đường cong (q, ε_{zz}) , $(\varepsilon, \varepsilon_{zz})$, (q_{pic}, P) cũng như hình thức phá hoại mẫu, từ đó phân chia ra chế độ ứng xử của vật liệu phụ thuộc vào áp lực buồng P (Bảng 3).

b) Thí nghiệm giãn

Các đường cong (q, ε_{zz}) , $(\varepsilon, \varepsilon_{zz})$ ở các áp lực buồng khác nhau được vẽ lên cùng trục tọa độ (Hình 22). Phân tích các đường cong ta thấy:



Hình 22 : Các đường cong (q, ε_{zz}) , $(\varepsilon, \varepsilon_{zz})$ ở các áp lực buồng P khác nhau

Trên đường cong (q, ε_{zz}):

Đỉnh ứng suất cũng như biến dạng tại đỉnh ứng suất tăng lên cùng với áp lực buồng P;

Với $P \leq 1.3$ Mpa, sau đỉnh ứng suất, ứng suất bị giảm đột ngột;

Với $1.4 \text{ Mpa} \leq P \leq 1.5$ Mpa, sau đỉnh ứng suất, ứng suất giảm dần một cách tịnh tiến, không đột ngột;

Trên đường cong ($\varepsilon, \varepsilon_{zz}$):

Với $P \leq 1.0$ Mpa, biến dạng thể tích ε luôn giảm (mẫu tăng thể tích) khi ε_{zz} giảm.

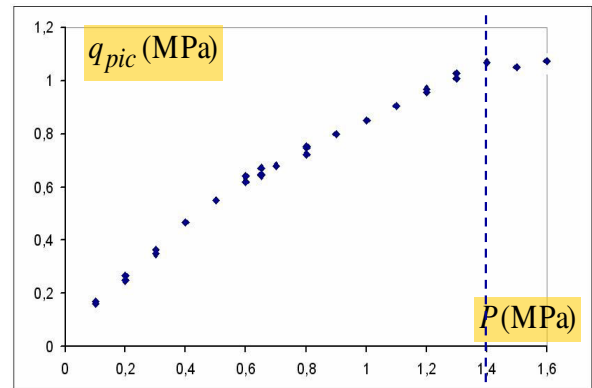
Với $1.1 \text{ Mpa} \leq P \leq 1.2$ Mpa, ε lúc đầu giảm, sau đó lại cố định hay tăng lên khi ε_{zz} giảm.

Với $1.3 \text{ Mpa} \leq P \leq 1.5$ Mpa, ε lúc đầu giảm, sau đó tăng lên khi ε_{zz} giảm.

Trên đường cong (q_{pic}, P), (Hình 23):

Phân tích các đường cong (q, ε_{zz}), ($\varepsilon, \varepsilon_{zz}$), (q_{pic}, P) cũng như hình thức phá hoại mẫu, từ đó phân chia ra chế độ ứng xử của vật

Có thể phân biệt hai phần : với $P \leq 1.4$ Mpa, q_{pic} tăng lên một cách tuyến tính với P. Với $P > 1.4$ Mpa, q_{pic} trở nên hầu như không tăng lên với P.



Hình 23 : Đường cong (q_{pic}, P) của các thí nghiệm giãn

liệu phụ thuộc vào áp lực buồng P, tương tự như trong thí nghiệm nén (Bảng 4):

Bảng 3 : Phân chia ra chế độ ứng xử thí nghiệm nén phụ thuộc vào áp lực buồng P

Chế độ ứng xử P (Mpa)	Ứng xử sau ứng suất đỉnh	Vị trí điểm rẽ nhánh	Phụ thuộc q_{pic} vào P	Loại vết nứt/băng biến dạng và góc ψ (°)
Chế độ dòn $P \leq 0.15$ MPa	Ứng suất giảm đột ngột	Trong vùng giãn nở vl	Lớn	Nhiều vết nứt thẳng đứng ($P=0$) hay 1 vết băng xiên duy nhất ($\psi < 30^\circ$)
Chuyển đổi dòn – dẻo $0.2 \text{ MPa} \leq P \leq 0.35$ MPa	Ứng suất giảm từ từ, hoặc giảm nhiều đợt nhỏ	Trong vùng nén chặt vật liệu	Lớn	Một băng xiên ($P = 0,2$ Mpa) hoặc nhiều băng xiên đan chéo nhau $35^\circ \leq \psi \leq 45^\circ$
Chế độ dẻo $P \geq 0.4$	Ứs ổn định hoặc tăng bền	Trong vùng nén chặt vl	Bé	Nhiều băng xiên đan chéo nhau $\psi \geq 65^\circ$ hoặc biến dạng đồng đều

Bảng 4 : Phân chia ra chế độ ứng xử thí nghiệm giãn phụ thuộc vào áp lực buồng P

Chế độ ứng xử P (MPa)	Ứng xử sau ứng suất đỉnh	Vị trí điểm rẽ nhánh	Phụ thuộc q_{pic} vào P	Loại vết nứt/băng biến dạng và góc ψ (°)
Chế độ dòn $P \leq 1.1$ MPa	Ứng suất giảm đột ngột	Trong vùng giãn nở vl	Lớn	Nhiều vết nứt / băng biến dạng ngang với $P < 0.7$ Mpa, hay 1 băng xiên duy nhất với $P > 0.7$ ($\psi < 30^\circ$)
Chuyển đổi dòn – dẻo $1.2 \text{ MPa} \leq P \leq 1.4$ MPa	Ứng suất giảm đột ngột hoặc từ từ,	Trong vùng nén chặt vật liệu	Lớn	Một băng xiên duy nhất với $P = 1.2$ và 1.3 MPa và nhiều băng xiên đan chéo nhau với $P = 1.4$ Mpa ($35^\circ \leq \psi \leq 45^\circ$)
Chế độ dẻo $P \geq 1.5$ MPa	Ứs ổn định hoặc tăng bền	Trong vùng nén chặt vật liệu	Bé	Biến dạng đồng đều

2.4 SO SÁNH KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM NÉN VÀ GIÃN 3 TRỤC

Trong thí nghiệm nén 3 trục hai ứng suất ngang được giữ nguyên $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{ra} = P$, còn ứng suất dọc tăng lên và trở thành ứng suất lớn nhất $\sigma_1 = \sigma_{zz}$. Việc σ_{zz} tăng lên làm cho ứng suất trung bình tăng lên. Trong thí nghiệm giãn ba trục, hai ứng suất ngang cũng được giữ nguyên, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{ra} = P$, còn ứng suất dọc lại giảm xuống và trở thành ứng suất tối thiểu $\sigma_3 = \sigma_{zz}$. Việc σ_{zz} giảm xuống làm cho ứng suất trung bình giảm xuống.

Như vậy hai chế độ thí nghiệm nén và giãn có cùng ứng suất tối đa σ_1 và ứng suất tối thiểu σ_3 thì ứng suất trung gian σ_2 trong thí nghiệm nén là lớn hơn trong thí nghiệm giãn. Điều này cho phép phân tích ảnh hưởng của ứng suất trung gian σ_2 và của trạng thái ứng suất lệch.

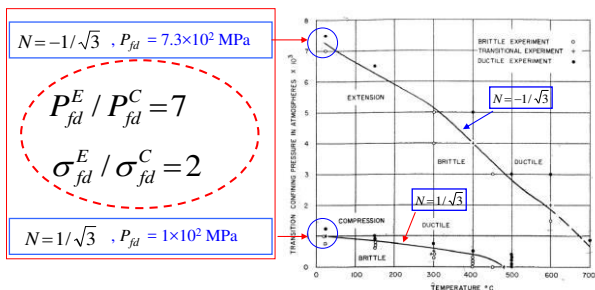
Trong các mô hình lý thuyết mô tả ứng xử của đá có tính đến sự rẽ nhánh [28-30], người ta thường dùng thông số N để biểu diễn trạng thái ứng suất lệch:

$$N = s_2/\bar{\tau}; \text{ với } \bar{\tau} = (1/2 s_{ij}s_{ij})^{1/2}$$

Giá trị N sẽ thay đổi trong khoảng giá trị $(-1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$. Ở đây có hai giá trị N ở hai cực, trong thí nghiệm nén $N = 1/\sqrt{3}$ và trong thí nghiệm giãn $N = -1/\sqrt{3}$.

a) Ảnh hưởng của N lên sự chuyển đổi dòn – dẻo

Trong hai chế độ thí nghiệm đều có sự chuyển đổi từ dòn sang dẻo của ứng xử vật



Hình 24 : So sánh áp lực buồng tại thời điểm chuyển đổi dòn dẻo giữa thí nghiệm nén và giãn của đá vôi Solnhofen [1] ở các nhiệt độ khác nhau. Ở đây ta lấy kết quả thí nghiệm ở nhiệt độ không khí để so sánh với các kết quả của GRAM1.

liệu khi áp lực buồng P tăng. Gọi áp lực buồng tại thời điểm chuyển đổi dòn dẻo trong thí nghiệm nén là P_{bdt}^C và trong thí nghiệm giãn là P_{bdt}^E . Như đã phân tích ở các phần trước, ta thấy:

- Với thí nghiệm nén :

$$0.2 \text{ Mpa} \leq P_{bdt}^C \leq 0.35 \text{ Mpa}$$

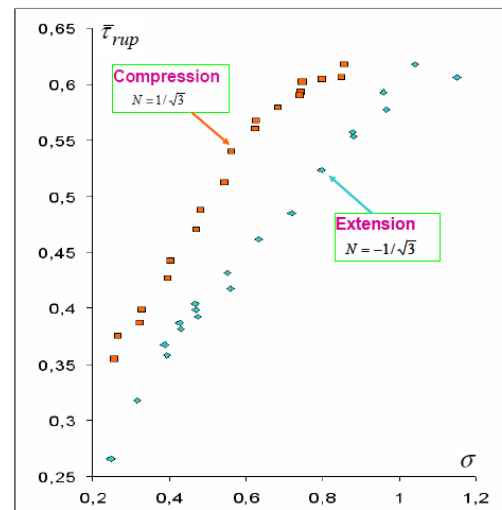
- Với thí nghiệm giãn :

$$1.2 \text{ Mpa} \leq P_{bdt}^E \leq 1.4 \text{ Mpa}$$

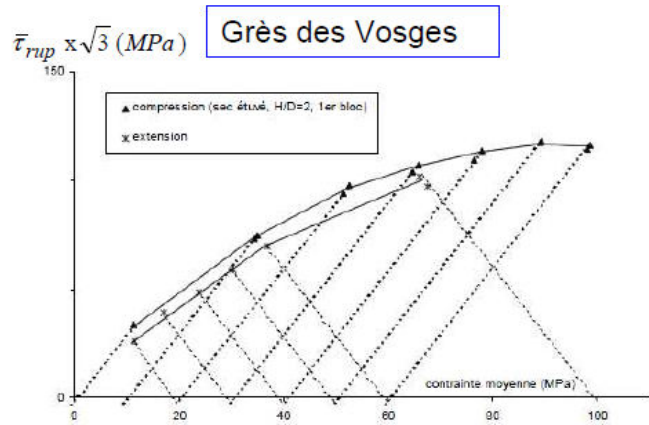
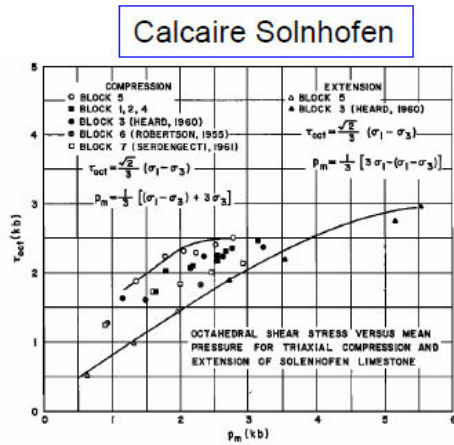
Như vậy tỷ lệ $P_{bdt}^E/P_{bdt}^C \approx 5$. Kết quả này trên vật liệu đá nhân tạo GRAM1 cũng tương hợp với đá vôi Solnhofen [1] có $P_{bdt}^E/P_{bdt}^C = 7$. Nếu ta dùng ứng suất trung bình σ để so sánh thì tỷ lệ này ở GRAM1 là 1,7 và ở đá vôi Solnhofen là 2 (Hình 24).

b) Ảnh hưởng của N lên cường độ vật liệu và góc nghiêng của vết nứt/băng biến dạng

Hình vẽ 25 và hình vẽ 26 thể hiện sự so sánh các đường cong $(\bar{\tau}_{rup}, \sigma)$ giữa thí nghiệm nén và giãn thực hiện trên vật liệu GRAM1 và các đá tự nhiên. Chúng ta nhận thấy $\bar{\tau}_{rup}$ tăng lên khi σ tăng, tuy nhiên đường của thí nghiệm nén ($N = 1/\sqrt{3}$) cao hơn so với thí nghiệm giãn ($N = -1/\sqrt{3}$).

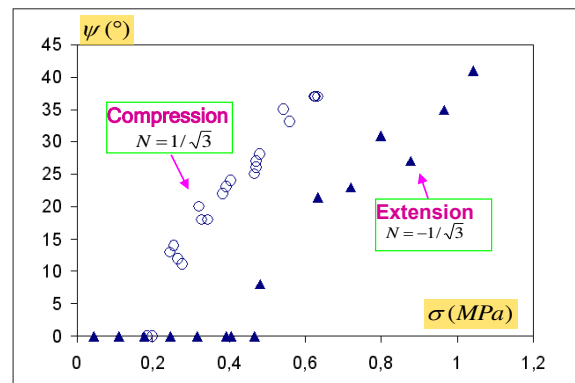


Hình 25 : So sánh $(\bar{\tau}_{rup}, \sigma)$ giữa thí nghiệm nén và giãn của vật liệu GRAM1

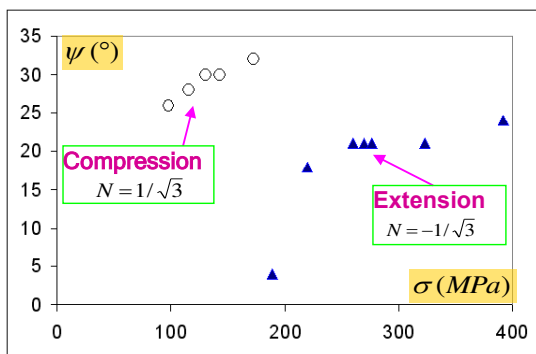


Hình 26 : So sánh ($\bar{\tau}_{rup}, \sigma$) giữa thí nghiệm nén và giãn của đá vôi (hình trái, Handin [39]) và của đá cát kết (hình phải, Besuelle [21])

Hình vẽ 27 và 28 thể hiện sự so sánh các đường cong (ψ, σ) giữa thí nghiệm nén và giãn thực hiện trên vật liệu GRAM1 và các đá tự nhiên. Những đường cong này cũng cho thấy xu hướng tăng góc ψ khi σ tăng và ψ lớn hơn trong thí nghiệm nén ($N = 1/\sqrt{3}$).



Hình 27 : So sánh (ψ, σ) giữa thí nghiệm nén và giãn trên vật liệu GRAM1

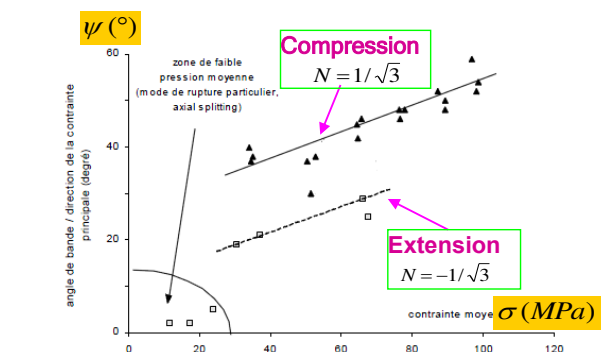


Hình 28 : So sánh (ψ, σ) giữa thí nghiệm nén và giãn của đá vôi (hình trái, Handin [39]) và đá cát kết [21])

3. KẾT LUẬN

Trong đề tài nghiên cứu này chúng tôi đã đạt được những kết quả quan trọng như sau:

Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo để cải biến máy nén 3 trục cơ bản chỉ tiến hành được thí nghiệm nén 3 trục thành thiết bị có thể thực hiện được cả thí nghiệm nén lẫn thí nghiệm



giãn nhằm nghiên cứu sự ảnh hưởng của lộ trình gia tải, ảnh hưởng của trạng thái ứng suất lệch đến ứng xử của vật liệu đá. Thiết bị đã được tối ưu về dụng cụ đo chính xác, giảm tối đa ma sát tiếp xúc mẫu – đệm kê, đảm bảo đồng trục mẫu – hệ gia tải. Điểm đặc biệt nhất ở đây là các đệm kê cho phép xoay và dịch chuyển áp dụng cho thí nghiệm nén và giãn.

Nhờ vào các dụng cụ đo chính xác và nguyên tắc đo đa điểm đã xác định được điểm rẽ nhánh, tức thời điểm chuyển từ biến dạng đồng đều sang biến dạng tập trung trong vết nứt hay các băng biến dạng. Các điểm này trong tất cả các thí nghiệm có sự rẽ nhánh (áp lực P không quá cao) đều nằm trước ứng suất đỉnh. Bắt đầu từ điểm rẽ nhánh, các mô hình lý thuyết dựa trên giả thuyết biến dạng đồng đều không còn phù hợp nữa.

Khi tăng giá trị áp lực buồng P , có một sự chuyển đổi dần-dẻo cho cả chế độ thí nghiệm nén và kéo. Sự chuyển đổi này thể hiện trên nhiều khía cạnh, đó là : sự có sang không có sự sụt giảm ứng suất đột ngột sau khi đạt ứng suất đỉnh, sự phá hoại chuyển từ một vết nứt nghiêng sang nhiều băng biến dạng xiên đan chéo và cuối cùng là biến dạng đồng đều được giữ nguyên mà không có sự rẽ nhánh, ...vv;

Sự ảnh hưởng của ứng suất trung gian σ_2 , hay của lộ trình ứng suất, hoặc một cách định lượng thông qua thông số trạng thái ứng suất N được thể hiện rõ khi so sánh kết quả của hai dạng thí nghiệm nén và giãn. Các thí nghiệm cho thấy áp lực buồng khi xảy ra chuyển đổi dần dẻo của thí nghiệm giãn cao hơn nhiều so với thí nghiệm nén, $P_{bdt}^E/P_{bdt}^C \approx 5$. Cùng một giá trị ứng suất trung bình như nhau thì thí nghiệm nén có độ bền phá hủy (tính theo ứng suất lệch) cao hơn so với thí nghiệm giãn. Tương tự như vậy, góc ψ hợp bởi vết nứt và ứng suất tối đa σ_I , trong thí nghiệm nén cũng lớn hơn so với thí nghiệm kéo ở cùng ứng suất trung bình.

Các kết quả trong phần nghiên cứu này sẽ mở đầu cho các nghiên cứu sâu hơn về sự ứng xử của vật liệu đá. Ví dụ như sự phụ thuộc vi cấu trúc của vết nứt, băng biến dạng vào điều kiện gia tải, thiết lập các hàm số mô tả ứng xử của đá trong đó có kể đến sự ảnh hưởng của ứng suất trung gian σ_2 , của thông số trạng thái ứng suất lệch N , dự báo thời điểm rẽ nhánh, ...vv.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Heard, H. C., transitions from brittle fracture to ductile flow in Solenhofen limestone as a function of temperature, confining pressure

and interstitial fluid pressure. In Griggs, J., Handin, J. E., editors. *Rock Deformation. Geological Society of America: Memoir 79*, 1960. p. 193-226.

- [2] Handin, J., Heard, H. C. and Magouirk, J. N., Effects of the Intermediate Principal Stress on the Failure of Limestone, Dolomite, and Glass at Different Temperatures and Strain Rates. *J Geophys Res*, 1967;72(2):611-640.
- [3] Mills LL, Zimmerman RM. Compressive strength of plain concrete under multiaxial loading conditions. *ACI J* 1970;67(10):802-7.
- [4] Mogi, K., 1971. Fracture and flow of rocks under high triaxial compression. *Journal of Geophysical Research* 76, 1255-1269.
- [5] Ottosen, N., A failure-criterion for concrete. *J Eng Mech Div*, 1977; **ASCE 103** EM4:527-535.
- [6] Chang, C., Haimson, B.C., 2000. True triaxial strength and deformability of the KTB deep hole amphibolite. *Journal of Geophysical Research* 105, 18999-19014.
- [7] Haimson, B., Chang, C., 2000. A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 17, 285-296.
- [8] Willam, K.J. and Warnke E.P., Constitutive models for the triaxial behavior of concrete. *In: Proceedings of the International Assoc. for Bridge and Structural Engineering*, vol. 19, 1975. p. 1-30.
- [9] Desai, C.S. and Salami, M.R., A constitutive model and associated testing for soft rock. *Int J Rock Mec. Min Sci*, 1987;
- [10] Lade P.V. and Kim M.K., Single hardening constitutive model for soil, rock and concrete. *Int J Solids Struct*, 1994;32(14):1963-1978
- [11] Wong, T.-F., David C. and Zhu W., The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: mechanical deformation. *J Geophys Res*, 1997;102:3009-3025.
- [12] Baud, P., Vajdova, V. and Wong, T.-f., Shear-enhanced compaction and strain localization: Inelastic deformation and

- constitutive modeling of four porous sandstones. *J Geophys Res*, 2006;111, B12401, doi:10.1029/2005JB004101.
- [13] Vajdova, V., P. Baud, and T.-F. Wong, Compaction, dilatancy, and failure in porous carbonate rocks. *J Geophys Res*, 2004; 109(B05204).
- [14] Brace WF. Brittle fracture of rocks. In: Judd WR, editor. State of Stress in the Earth's Crust. New York: Elsevier; 1964. p. 111–80.
- [15] Zhu W, Montesi LGJ, Wong TF. Shear-enhanced compaction and permeability reduction: triaxial extension tests on porous sandstone. *Mech Mater* 1997; 25:199–214.
- [16] Bésuelle, P., Desrues, J., and Raynaud, S., Experimental characterisation of the localisation phenomenon inside a Vosges sandstone in a triaxial cell. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2000;37(8):1223-1237.
- [17] Bobich, J. K., Experimental analysis of the extension to shear fracture in Berea sandstone. *Master of science thesis*, Texas A&M University, 2005.
- [18] Baud, P., Schubnel A. and Wong, T.-f, Dilatancy, compaction and failure mode in Solnhofen limestone, *J Geophys Res*, 2000;105:19,289–19,303.
- [19] Baud P, Schubnel A, Dilatancy Wong TF. compaction and failure mode in Solnhofen limestone. *J Geophys Res*, 2000;105(B8):19289–303.
- [20] Ramsey, M. J., and F. M. Chester, Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture, *Nature*, 2004;428: 63-66.
- [21] Bésuelle, P., Compacting and dilating shear bands in porous rock: Theoretical and experimental conditions. *J Geophys Res*, 2001;106(B7):13435-13442.
- [22] Van Mier, J. G. M. and van Vliet, M. R. A., Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art. *Eng Fract Mech*, 2002;69(2):235-247.
- [23] Sulem J. and Ouffroukh, H., Shear banding in drained and undrained triaxial tests on a saturated sandstone: Porosity and permeability evolution. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2006;43(2):292-310. ISSN 1365-1609, DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.07.001.
- [24] Santarelli, F.J., Etude expérimentale de la bifurcation dans les roches. *Rev Fr Géotechnique*, 1990; 50:61–70.
- [25] Tatsuoka F, Kim Y-S. Deformation of shear zone in sedimentary soft rock observed in triaxial compression. In: Chambon R, Desrues J, Vardoulakis I, editors. *Localisation and bifurcation theory for soils and rocks*. Rotterdam: Balkema, 1994, p.181–7.
- [26] Mogi K. Effect of the intermediate principal stress on rock failure. *J Geophys Res* 1967;72:5117–31.
- [27] Chen WF, Han DJ. *Plasticity for Structural Engineers*. New York: Springer; 1988.
- [28] Rudnicki, J. W. and Rice J. R., Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials. *J Mech Phys Solids*, 1975;23:371-394.
- [29] Vardoulakis I, Sulem, J. 1995. Bifurcation analysis in geomechanics. *Blackie Academic and Professional*, pp. 462, New York.
- [30] Chemenda, A. I., The formation of shear-band/fracture networks from a constitutive instability: Theory and numerical experiment, *J Geophys Res*, 2007;112,B11404, doi:10.1029/2007JB005026.
- [31] Chemenda, A. I., The formation of tabular compaction-band arrays: Theoretical and numerical analysis, *J Mech Phys Solids*, 2009;57:851-868.
- [32] Olsson WA, Holcomb DJ. Compaction localization in porous rock. *Geophys Res Lett* 2000;27:3537–40.
- [33] Fortin J, Stanchits S, Dresen G, Gue'guen Y. Acoustic emission and velocities associated with the formation of compaction bands in sandstone. *J Geophys Res*, 2006;111:B10203, doi:10.1029/2005JB003854
- [34] Chemenda, A. I. and Si-Hung Nguyen, Experimental evidences of transition from mode I cracking to dilatancy banding, *Comptes Rendus Mecanique*, 2011, 339:219-225
- [35] Chemenda, A. I., Nguyen, Si-H., Petit J.P., Ambre, J.,. Mode I cracking versus dilatancy banding: Experimental constraints on the mechanisms of extension fracturing, *J*

Geophys. Res. 2011, 116, B04401, doi:10.1029/2010JB008104.

- [36] Nguyen, Si-H., Chemenda, A., and J. Ambre, 2011. Influence of the loading conditions on the mechanical response of granular materials as constrained from experimental tests on synthetic rock analogue material, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 48, 103-115, doi: 10.1016/j.ijrmms.2010.09.010.
- [37] Scholey G.K. A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial

testing of soil specimen. *Geotech. Test. J.* 1995, 18(2): 137-156

- [38] Ouffroukh H. Comportement hydromecanique d'une roche granulaire et localisation des deformations, 2004. These de doctorat ENPC.
- [39] Handin J. Effect of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite, and glass at different temperature and strain rate. *J. Geophys. Res.* 1967, 72:611-640.