



MÔ HÌNH HÓA TRẠNG THÁI PHÁ HOẠI CỦA BÊ TÔNG CÓ TÍNH ĐÀN NHÓT DẸO CHỊU ẢNH HƯỞNG CỦA ÁP LỰC BÓ

Lê Việt Dũng¹

Tóm tắt: Bài báo giải quyết vấn đề mô hình hóa trạng thái phá hoại của bê tông có tính chất phi tuyến đàn dẻo nhớt bị giảm yếu khi chịu tải và chịu ảnh hưởng của áp lực bó. Mô hình xây dựng được lập trình bằng ngôn ngữ Fortran, tích hợp trong tính năng mở UMAT của chương trình tính toán theo phương pháp phần tử hữu hạn Abaqus. Các thông số của mô hình được xác định thông qua các thí nghiệm kéo nén mẫu có vòng lặp trễ. Tính khả thi của mô hình được kiểm duyệt thông qua việc so sánh kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm của thí nghiệm Brazilian.

Từ khóa: Bê tông dẻo; tính chất đàn dẻo nhớt bị giảm yếu; mô hình phá hoại $C_e - C_{\sigma}$; áp lực bó; abaqus.

Summary: This paper deals with the modelling of the failure state of damageable viscous elasto-plastic concrete, sensible to the confined pressure. This model is implanted in the subroutine UMAT of FEM logical Abaqus, written by the language Fortran. The model parameters are identified by the simple cycle tensile and compressive tests. The reliability of this model was analysed by the comparison between the modelling and experimental results of Brazilian test.

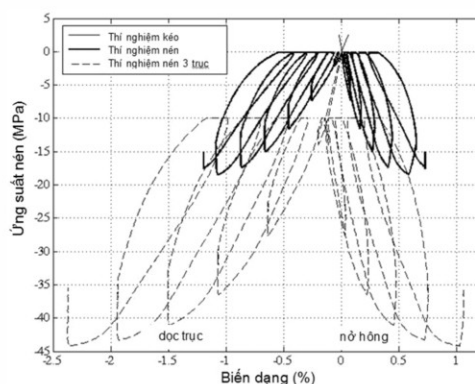
Keywords: Plastic concrete; damage viscous elasto-plastic behavior; $C_e - C_{\sigma}$ failure criterion; confined pressure; abaqus.

Nhận ngày 25/6/2015, chỉnh sửa ngày 10/7/2015, chấp nhận đăng 30/9/2015



1. Đặt vấn đề

Từ những năm 90, một loại bê tông có đặc tính bất đối xứng giống bê tông thường, dòn khi kéo, đàn nhớt dẻo khi nén, được nghiên cứu sử dụng trong cấu kiện chịu lực bao che các nguyên liệu năng lượng tại Pháp. Loại bê tông này được sản xuất theo phương pháp nén nhiệt ở áp lực cao sau khi trộn các hạt cấp phối nhỏ, mịn với chất kết dính có trộn phụ gia dẻo với hàm lượng nhỏ vài phần trăm. Tính chất chịu lực kém khi kéo, tốt khi nén của vật liệu được quan sát ban đầu trong Hình 1, với thí nghiệm kéo nén thuần túy và nén lặp trong thí nghiệm nén 3 trục [6].



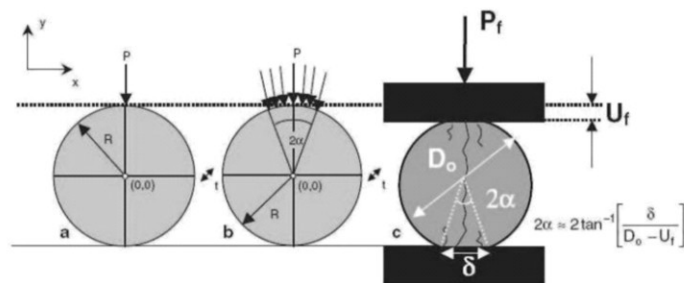
Hình 1. Kết quả thí nghiệm kéo nén lặp thuần túy và nén 3 trục [6]

¹TS, Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng. E-mail: dunglv@nuce.edu.vn.

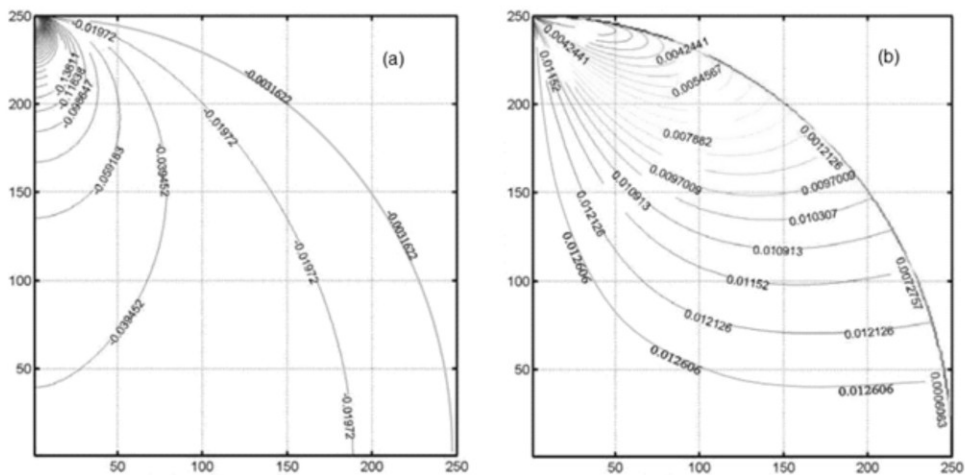
Tính chất lưu biến, đàn nhớt dẻo khi nén của vật liệu, phụ thuộc vào độ lớn của áp lực bó đã được phân tích rõ trong nghiên cứu thực nghiệm [7,8], thông qua các thí nghiệm từ biến, chùng ứng suất và kéo nén với tốc độ gia tải khác nhau. Đặc tính trên của vật liệu được mô phỏng bằng mô hình lưu biến Maxwell cải tiến, gồm các nhánh lưu biến Maxwell mắc song song với nhánh đàn dẻo. Tuy nhiên, nghiên cứu thực nghiệm trên các mẫu chịu kéo thuần túy cho kết quả tương đối phân tán, đặc biệt trong việc xác định giới hạn bền của vật liệu [6].

Trong nghiên cứu thực nghiệm cường độ chịu kéo của bê tông, hai loại thí nghiệm thường được dùng là thí nghiệm uốn 3 điểm và thí nghiệm Brazilian. Tuy nhiên, để đánh giá được mức độ ảnh hưởng của áp lực bó đến sự hình thành và phát triển khe nứt, thí nghiệm Brazilian thường được sử dụng.

Năm 1895, Hertz [3] đã đề xuất một công thức toán học cho phép xác định trạng thái ứng suất đàn hồi trong mẫu trụ có tiết diện tròn chịu tải trọng chèn P tác động theo phương bán kính trục đứng (Hình 2). Nghiên cứu này cho phép quan sát sự phân bố ứng suất kéo chính và ứng suất nén chính trong mặt cắt tiết diện của mẫu theo lý thuyết của Hertz. Kết quả mô phỏng cho thấy ứng suất kéo chính lớn nhất tập trung ở tâm mẫu (Hình 3). Theo phương ngang, tồn tại các dải ngang ở gần tâm lõi cho sự phân bố ứng suất kéo chính có giá trị gần như không thay đổi. Chính ứng suất này là tác nhân làm xuất hiện và phát triển khe nứt trong mẫu.



Hình 2. Sơ đồ thí nghiệm nén chèn mẫu của Hertz [3]



Hình 3. Sự phân bố trường ứng suất nén chính (a) và kéo chính (b) trong mặt cắt đĩa khi chịu tải trọng đơn vị, khi tính theo công thức của Hertz [3]

Vị trí xuất hiện khe nứt ban đầu trong thí nghiệm Brazilian phụ thuộc nhiều vào diện tiếp xúc giữa bàn ép và mặt đỉnh mẫu thí nghiệm. Goldrein [4] đã chỉ ra rằng nếu bề rộng của diện truyền tải nhỏ hơn 0,27 lần đường kính mẫu thì cho phép quan sát khe nứt ban đầu hình thành ở tâm mẫu, tránh sự hình thành khe nứt cục bộ ở vùng biên tiếp xúc giữa bàn ép và mẫu. Trong trường hợp này, kết quả phân tích thu được cho sai số trong khoảng 10% so với thực nghiệm. Quan sát thực nghiệm trên cũng được thấy trong các nghiên cứu của Awaji và Sato [3], Hondros [2] với giả thiết tuyến tính như Hertz.

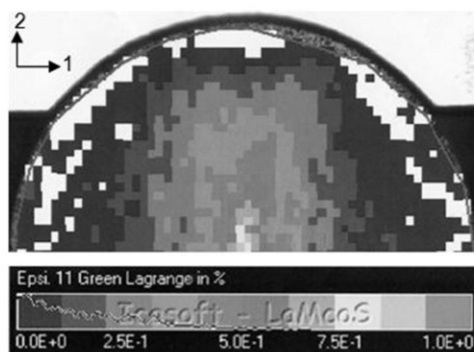
Tuy nhiên, trong trường hợp vật liệu có tính chất phi tuyến, việc phân tích trạng thái ứng suất trong mẫu ở trạng thái giới hạn bằng quan sát thực nghiệm ít được đề cập, nhất là việc sử dụng mô hình mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Do đó, mục đích của bài báo này là xây dựng mô hình nứt trong mô hình lưu biến Maxwell cải tiến, phát triển bởi Lê [6,8], nhằm phân tích bài toán phi tuyến này.



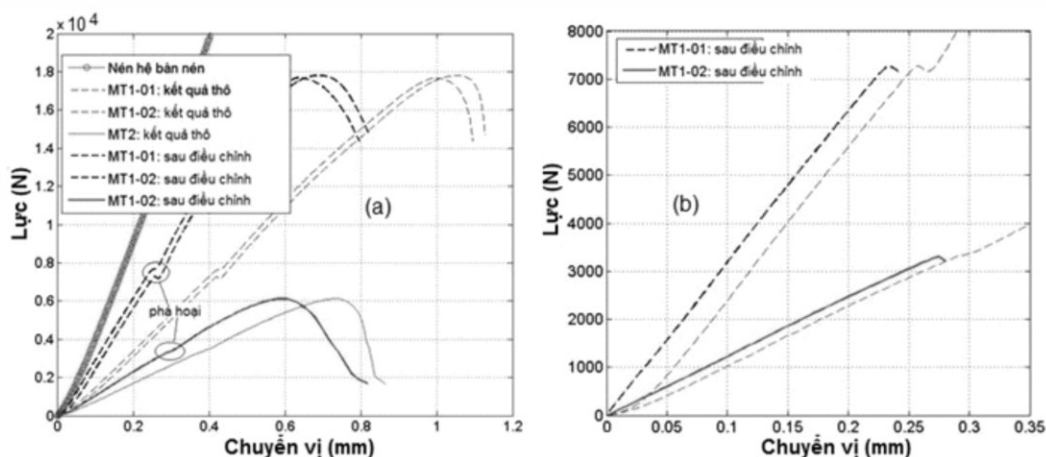
2. Phân tích thực nghiệm

Trong thí nghiệm nén chèn Brazilian, nhằm tránh sự phá hoại cục bộ sớm ở vị trí tiếp xúc giữa bàn nén phẳng và mẫu trụ, đệm cao su thường được bố trí ở vị trí tiếp xúc nhằm phân đều tải trọng tác động trên đỉnh mẫu. Tuy nhiên, việc bố trí đệm cao su này lại có nhược điểm là khó cân chỉnh tương quan giá trị đo giữa tải trọng và biến dạng ở giữa mẫu tại thời điểm ban đầu, nhất là khi áp dụng vào bài toán mô phỏng.

Trong nghiên cứu này, để khắc phục vấn đề trên, kết hợp phân tích mô phỏng, hệ bàn nén cong có bán kính 25,6 mm được sử dụng [6]. Nhằm phân tích ảnh hưởng của áp lực bó, hai mẫu trụ đường kính 50mm, độ dày lần lượt là 25mm (mẫu MT1) và 10mm (mẫu MT2) được nghiên cứu. Hai phương pháp đo đồng thời được sử dụng: (i) đo biến dạng mẫu bằng phương pháp phân tích ảnh số cho kết quả như Hình 4; (ii) đo biến dạng mẫu bằng hệ thống đầu đo gắn vào hệ giá ép cho kết quả đo như Hình 5.



Hình 4. Quan sát biến dạng mẫu trong thí nghiệm Brazilian bằng phương pháp hiệu chỉnh hình ảnh kỹ thuật số: mức tải trọng $P_{nén} = 7200 \text{ N}$ với mẫu MT1

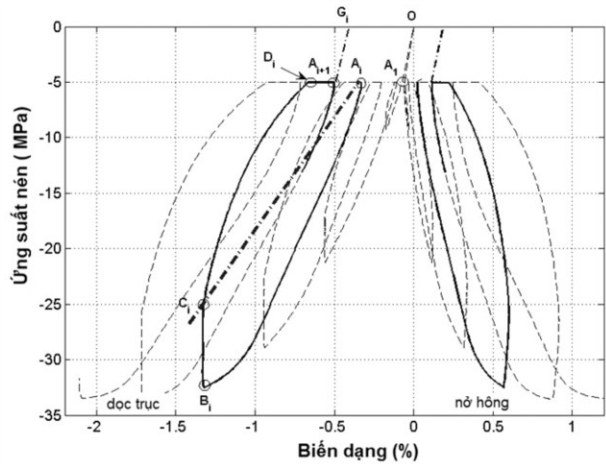


Hình 5. Đường cong lực - chuyển vị trong thí nghiệm Brazilian: “nét đứt” - mẫu dày 25 mm; “nét liền” - mẫu dày 10 mm

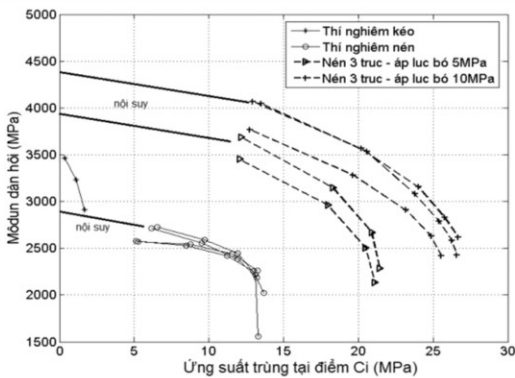
Từ kết quả đo thô, biến dạng của hệ giá ép được loại bỏ để thu được đường cong biến dạng thật của mẫu (Hình 5a). Điểm gãy khúc ban đầu quan sát trong Hình 5a trùng với thời điểm hình thành khe nứt ở tâm mẫu quan sát được bằng phương pháp hiệu chỉnh ảnh kỹ thuật số, do đó được đánh giá là thời điểm hình thành khe nứt ban đầu ở giữa mẫu. Thời điểm này sẽ được sử dụng như là thời điểm phá hoại mẫu trong bài toán mô phỏng.

Khi quan sát đường cong mảnh “lực - chuyển vị” của mẫu ở Hình 5b, nhận thấy ở ngay sau khi chất tải, có đoạn chuyển vị tăng nhanh khi lực ép nhỏ. Giai đoạn này được đánh giá là giai đoạn khur trạng thái “tiếp xúc ảo” ban đầu giữa hệ bàn nén và mẫu. Trạng thái “ảo” này được khur bằng phương pháp dịch chuyển tuyến tính đường biến dạng về gốc ban đầu. Kết quả hiệu chỉnh (Hình 5b) này được sử dụng để phân tích bài toán mô phỏng khe nứt.

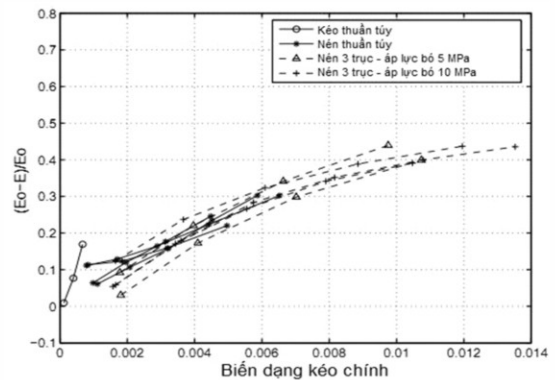
Trong nghiên cứu, sự phát triển khe nứt ở tỉ lệ vi mô (vi nứt) và tỉ lệ cấu kiện đã được phân tích. Thí nghiệm kéo nén với vòng lặp trễ được sử dụng để phân tích các vết vi nứt. Hình 6 giới thiệu một vòng lặp trễ trung gian “i” của thí nghiệm, gồm 4 giai đoạn: (i) giai đoạn chất tải A_B - (ii) giai đoạn chùng ứng suất B_C - (iii) giai đoạn giảm tải C_D - giai đoạn hồi phục biến dạng $D_{A_{i+1}}$. Độ cứng đàn hồi của vật liệu ở thời điểm chất tải thứ “i” được xác định bởi đường thẳng nối 2 điểm C_i và A_{i+1} . Sự giảm dần độ cứng đàn hồi sau mỗi vòng lặp trễ khi tải trọng tăng (Hình 7) cho phép xác định tính chất bị giảm yếu của vật liệu, các vết vi nứt trong vật liệu phát triển dần.



Hình 6. Các điểm đặc trưng xác định đặc tính vật liệu trong 1 vòng lặp trễ “chất tải - chùng ứng suất - giảm tải - hồi phục biến dạng”



Hình 7. Sự giảm yếu độ cứng đàn hồi theo trạng thái của ứng suất chùng tại điểm C_i sau mỗi vòng lặp trễ



Hình 8. Sự giảm yếu mô đun đàn hồi của vật liệu theo hàm của biến dạng kéo chính



3. Mô hình phá hoại $C_c - C_{\sigma}$

Nhiều nhà nghiên cứu chỉ ra rằng, nguyên nhân sự suy giảm độ cứng là do sự hình thành và phát triển các khe nứt ở tỉ lệ vi mô khi biến dạng kéo chính tăng lên. Mazars [5] đã lượng hóa sự phát triển vết vi nứt này qua thông số “d”, được định nghĩa theo sự suy giảm độ cứng của vật liệu:

$$d = (E_0 - E)/E_0 \quad (1)$$

trong đó: E_0 , E lần lượt là mô đun đàn hồi ban đầu và mô đun đàn hồi tức thời của vật liệu.

Với vật liệu nghiên cứu, việc xác định mô đun đàn hồi ban đầu E_0 rất phức tạp, do kết quả đo khi tải trọng bé cho độ phân tán cao (Hình 7). Một cách gần đúng, giá trị E_0 trong các trường hợp kéo nén khác nhau có thể được xác định bằng phương pháp nội suy bằng đường nét liền đậm như giới thiệu trong Hình 7.

Với các giá trị E_0 xác định được, sự phát triển của thông số nứt “d” theo công thức (1) nêu trên được định lượng theo biến dạng kéo chính lớn nhất như thể hiện trong Hình 8.

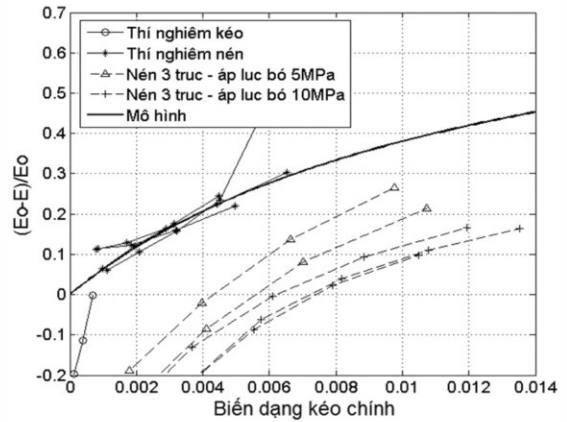
Kết quả thực nghiệm cho thấy sự biến thiên của “d” theo biến dạng kéo chính là khác nhau trong hai trường hợp kéo nén. Mặc dù theo Hình 7, mô đun đàn hồi ban đầu E_0 của vật liệu phụ thuộc vào mức độ áp lực bó, quan sát ở Hình 8 cho thấy áp lực bó chỉ ảnh hưởng đến cường độ nén của vật liệu, mà không ảnh hưởng đến xu thế phát triển nứt trong các trường hợp thí nghiệm nén khác nhau, được minh chứng bởi độ chụm của chuỗi các đường cong (Δ , +, x) trong hình vẽ.

Với nhận xét trên, sự phát triển của đại lượng nứt “d” được định nghĩa theo hàm của biến dạng kéo chính lớn nhất $\varepsilon_{\max}^+$ theo công thức (2):

$$d = (d_1 \varepsilon_{\max}^+ + d_2) \left(1 - \frac{1}{1 + d_3 \varepsilon_{\max}^+} \right) \quad (2)$$

trong đó: các thông số d_i ($i = 1, 2, 3$) được xác định sao cho đường cong d có dạng như trong Hình 9, phù hợp với kết quả đo ở thí nghiệm nén thuần túy.

Trong nghiên cứu về cơ chế phá hoại của bê tông, nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng bê tông sẽ bị phá hoại do nén khi đại lượng “ d ” đạt giá trị khoảng 0,7. Tuy nhiên, nếu dùng một giá trị giới hạn duy nhất của đại lượng “ d ” thì không phản ánh được ảnh hưởng của áp lực bó đến cường độ chịu kéo, nén của vật liệu nghiên cứu. Do đó, cơ chế phá hoại của vật liệu được nghiên cứu phân tích trong Hình 10, ở đó sự phát triển biến dạng ngang của mẫu (theo phương kéo chính) trong thí nghiệm kéo nén với vòng lặp trễ phát triển đến trạng thái phá hoại. Kết quả thực nghiệm cho thấy thời điểm phá hoại mẫu khi nén phụ thuộc vào hai đại lượng chính là biến dạng nở hông (phương kéo chính) và độ lớn áp lực bó P .



Hình 9. Mô phỏng sự phát triển vết nứt “ d ” theo thí nghiệm nén thuần túy

Nhằm loại bỏ ảnh hưởng của tính nhớt của vật liệu (ảnh hưởng của tốc độ gia tải), cơ chế phá hoại tuyến tính theo biến dạng dương lớn nhất ($\varepsilon_{\max}^+$) và ứng suất chùng (P_c) tại điểm C_c cuối của gia đoạn chùng ứng suất (Hình 6) được thiết lập theo công thức sau:

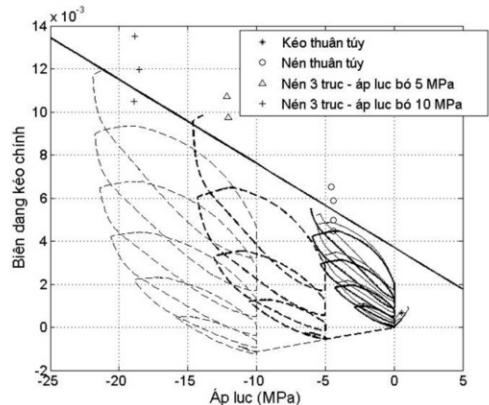
$$C_c = \varepsilon_{\max}^+ + k_1 P_c - k_2 \quad (3)$$

trong đó: k_1 và k_2 là các hằng số được xác định sao cho đường C_c mô phỏng được các điểm phá hoại quan sát trong Hình 10, với tiêu chí lấy theo điểm phá hoại bất lợi nhất. Cụ thể $k_1 = 3,9 \cdot 10^{-4}$; $k_2 = 3,7 \cdot 10^{-3}$.

Tuy nhiên, khi đối chiếu với thực nghiệm trong Hình 10, mô hình phá hoại C_c cho thấy tính khả thi cho bài toán chịu nén, nhưng lại không bao hàm được trạng thái phá hoại của vật liệu trong trường hợp chịu kéo. Do đó, cơ chế phá hoại C_c theo ứng suất kéo hiệu dụng lớn nhất được bổ sung cho mô hình, cụ thể:

$$C_\sigma = \left\langle \frac{\sigma_{r,\max}^+}{1-d} \right\rangle - [\sigma_{gh}] \quad (4)$$

trong đó: $\sigma_{r,\max}^+$ biểu thị giá trị ứng suất kéo lớn nhất ở cuối trạng thái chùng ứng suất (điểm C_c trong Hình 6); $[\sigma_{gh}]$ là thông số mô hình, biểu thị trạng thái giới hạn cho phép của ứng suất kéo. Trong nghiên cứu này, $[\sigma_{gh}] = 2,1$ MPa.



Hình 10. Mô hình phá hoại C_c



4. Bài toán áp dụng

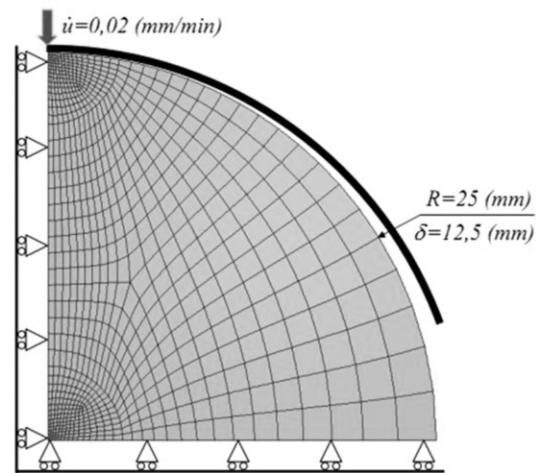
Mô hình phá hoại $C_c - C_\sigma$ này được áp dụng cho mô hình lưu biến Maxwell cải tiến [6], nhằm mô phỏng sự hình thành và phát triển khe nứt trong mẫu trụ chịu tải trọng nén chệch P như giới thiệu trong mục 2 ở trên.

Mô hình này được lập trình bằng ngôn ngữ FORTRAN, tích hợp trong code mở Subroutine UMAT của chương trình tính theo phương pháp phần tử hữu hạn ABAQUS.

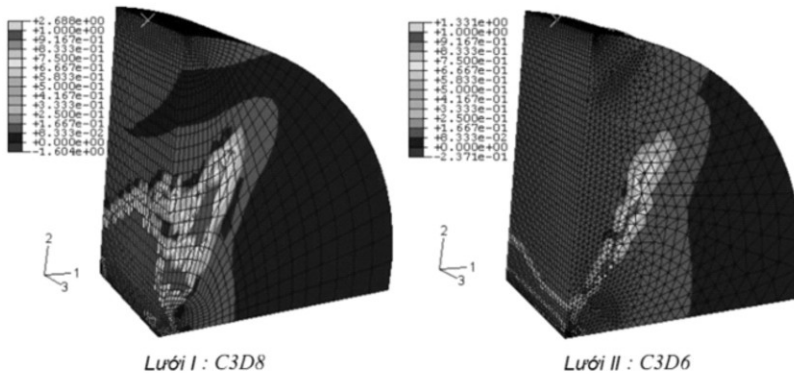
Hai mẫu trụ MT1 và MT2 có cùng đường kính 50mm (xem phần 2) được nghiên cứu. Vật liệu sử dụng có mô đun đàn hồi ban đầu $E_0 = 2900$ MPa, hệ số Poisson $\nu = 0,2$. Giới hạn bền của vật liệu được kiểm soát bởi mô hình phá hoại $C_c - C_\sigma$. Sự giảm yếu độ cứng của vật liệu trong quá trình chịu tải được đặc trưng bởi thông số d biểu diễn theo phương trình (2).

Hình 11 giới thiệu ví dụ chia lưới phần tử cho 1/8 khối mẫu với các điều kiện biên cho bài toán đối xứng. Hệ bàn nén được mô phỏng dạng cong như đã đề cập ở phần 2 và do đó yếu tố trượt tại điểm tiếp xúc giữa bàn nén và mẫu được bỏ qua. Kết quả mô phỏng được quan sát đến giai đoạn phá hoại, dưới tác dụng ép của bàn nén với tốc độ di chuyển 0,02 mm/phút.

Sự lan truyền khe nứt từ tâm mẫu được quan sát trong nghiên cứu mô phỏng cho 2 trường hợp chia lưới C3D6 và C3D8 khác nhau được phân tích trong Hình 12. Kết quả mô phỏng phản ánh tương đối rõ nét sự lan truyền này phù hợp với quan sát thực nghiệm. Ban đầu, khe nứt lan truyền từ tâm theo phương đứng, sau phát triển mở rộng dần theo phương vuông góc với ứng suất kéo chính.



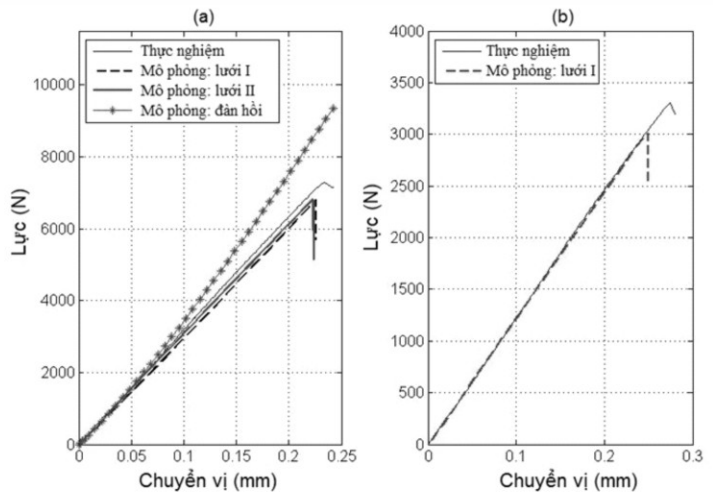
Hình 11. Chia lưới phần tử trong ABAQUS của thí nghiệm Brazilian: 1/8 khối mẫu



Hình 12. Sự lan truyền khe nứt từ tâm của mẫu trụ MT1 trong thí nghiệm Brazilian

Kết quả so sánh mô phỏng với thực nghiệm trong Hình 13 cho thấy tính khả thi của mô hình đề xuất, cụ thể trong Hình 13a đối với mẫu MT1 nhận thấy: (i) Bài toán đàn hồi theo lý thuyết của Hertz được mô phỏng theo đường dấu sao “*” cho độ dốc lớn hơn nhiều so với kết quả thực nghiệm. Sau khi kể đến tính chất phi tuyến của vật liệu, kết quả mô phỏng thu được cho phép mô phỏng gần như chính xác kết quả đo thực nghiệm và kết quả mô phỏng này không bị ảnh hưởng bởi việc chọn phần tử chia lưới trong tính toán; (ii) Điểm phá hoại diễn ra sớm hơn và gần sát với thực nghiệm.

So sánh kết quả mô phỏng với thực nghiệm của mẫu MT2 ở Hình 13b cũng cho cùng nhận xét ở trên, với điểm phá hoại diễn ra sớm hơn một chút so với thực nghiệm. Sự sai lệch này có thể được lý giải bởi tiêu chí xác định các hệ số k_1 và k_2 của đường C_ε (phương trình 4), ở đó các hệ số này được xác định dựa trên kết quả thí nghiệm kéo nén mẫu thuần túy với tiêu chí thiên về an toàn chọn điểm phá hoại bất lợi nhất, thay vì chọn giá trị trung bình.



Hình 13. So sánh kết quả đo lực - chuyển vị bằng thực nghiệm và mô phỏng cho thí nghiệm Brazilian: Mẫu MT1 (a) - Mẫu MT2(b)


5. Kết luận

Nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng sự hình thành và phát triển khe nứt trong thí nghiệm nén chế mẫu trụ bê tông có tính chất đàn nhớt dẻo, có tính bị giảm yếu trong quá trình chịu tải được đề cập trong bài báo này.

Phân tích kết quả thực nghiệm trên các thí nghiệm kéo nén thông thường và kéo nén với vòng lặp trễ dưới các mức áp lực bó khác nhau cho phép xây dựng các đường cong lý thuyết mô phỏng sự phát triển khe nứt ở tỉ lệ vi mô trong quá trình chất tải. Một mô hình phá hoại $C\varepsilon - C\sigma$ được thiết lập cho phép xét đến đồng thời các yếu tố ứng suất kéo chính, biến dạng kéo lớn nhất và ảnh hưởng của áp lực bó đến trạng thái phá hoại của vật liệu. Tính khả thi của mô hình phá hoại này được kiểm chứng thông qua bài toán mô phỏng sự phá hoại của mẫu trụ trong thí nghiệm Brizilian. Kết quả mô phỏng gần như tương đồng với kết quả thực nghiệm.

Tài liệu tham khảo

1. A. Dragon (2002), *Continuum damage mechanics applied to quasi-brittle materials*, *Continuum damage mechanics of materials and structures*, Editions, Olivier ALLIX and Francois Hild, 165-203.
2. G. Hondros (1959), "The evolution of poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference of concrete", *Autralian journal of Applied science*, 10, 243-268.
3. H. Awaji and S. Sato (1979), "Diametral compressive testing method", *Journal of Engineering and Materials Technology*, 101, 139-147.
4. H. D. Goldrein (2000), *Monitoring of the effects of ageing on the mechanical properties of polymer bonded explosives*, A Report on Workshop, U.S. Army Research Office 9-11, Robert W. Shaw.
5. J. Mazars (1986), "A description of micro- and macro scale damage of concrete structure", *Journal of Engineering Structure Mechanics*, 25(5/6), 729-737.
6. Le Viet Dung (2007), *Modélisation et Identification du comportement plastique visco-élastique endommageable d'un matériau agrégataire*, Thèse de doctorant, Université Francois-Rabelais de Tours, France.
7. M. Gratton, V-D Le, A. Frachon, M. Caliez and D. Picart (2006), "Mechanical behaviour of a visco-elastic plastic granular material: Experimental procedure and modelling", *Journal of WSEAS Transactions on Computers*, ISSN: 1109-2750, Issue 1, Vol. 5, 149-156.
8. Viet Dung Le, M. Gratton, M. Caliez, A. Frachon, D. Picart (2010), "Experimental mechanical characterization of plastic-bonded explosives", *Journal of Material Science (DOI 10.1007/s10853-010-4655-5)*, ISSN: 0022-2461, Issue 21, Vol. 45, 5802-5813.