TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Nghiên cứu các thông số của mô hình phá hủy bê tông do dẻo cho vật liệu bê tông cường độ cao dùng phần mềm Abaqus để mô phỏng

Studying the parameters of the concrete damaged plasticity model for high-performance concrete material using the Abaqus software for simulation

➢ **THS Nguyễn Quyết Thành**
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
Email: thanhnq@vimaru.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO
Chuyên mục: Khoa học công nghệ
Ngày nhận bài: 16/3/2026
Ngày sửa bài: 26/3/2026
Ngày chấp nhận đăng: 08/4/2026
Ngày xuất bản Online: 22/6/2026
Tác giả liên hệ:
Email: thanhnq@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bê tông cường độ cao ngày càng được sử dụng nhiều trong các công trình xây dựng. Mô hình được sử dụng phổ biến cho vật liệu này là mô hình phá hủy bê tông do dẻo. Để tìm hiểu các thông số của mô hình phá hủy bê tông do dẻo CDP, tác giả đã dựa vào một dữ liệu thực nghiệm của một thí nghiệm nén một trục bê tông cường độ cao. Dựa vào mô hình CDP tích hợp vào phần mềm mô phỏng Abaqus, tác giả đã thay đổi các thông số của mô hình để đưa ra bộ 36 kết quả mô phỏng. Các kết quả mô phỏng sau đó được đem ra so sánh với dữ liệu thực nghiệm và cho thấy sự tương đồng. Ngoài ra, để tìm ra bộ thông số tối ưu cho bộ kết quả mong muốn, hệ số tương quan R được đưa ra để đánh giá. Việc so sánh giữa kết quả mô phỏng và dữ liệu thực nghiệm cho phép xác định và tìm ra các thông số tối ưu cho mô hình CDP với vật liệu bê tông cường độ cao, dùng phần mềm Abaqus để mô phỏng.

Từ khóa: Phá hủy bê tông do dẻo; bê tông cường độ cao; ứng suất - biến dạng.

ABSTRACT

High-performance concrete has been increasingly used at many construction sites. The most widely adopted model for simulating this material is the concrete damage plasticity model. To determine parameters of the concrete damage plasticity (CDP) model, the author used experimental data from uniaxial compressive testing of high-performance

concrete. Using this model integrated into the Abaqus simulation software, the author varied several factors and obtained 36 sets of simulation results. The simulation results from the model were then compared with the experimental data, showing good agreement. Furthermore, to get the optimum set of factors, the correlation coefficient R was used for comparison. Comparing the simulation results and the experimental data allowed the determination and identification of optimal coefficients for high-strength concrete with the CDP model by using the Abaqus simulation software.

Keywords: Concrete damage plasticity; high-performance concrete; stress - strain.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông là loại vật liệu được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng bởi tính bền vững và khả năng sẵn có của nó [1]. Với mỗi một cấp bê tông khác nhau, khả năng chịu lực của vật liệu này lại khác nhau. Khả năng chịu lực của từng kết cấu phụ thuộc vào nhiều yếu tố như: Thành phần của vật liệu bê tông, hình dạng và kích thước của cấu kiện... Trong quá khứ đã từng xuất hiện nhiều mô hình được đề xuất để mô tả ứng xử của bê tông khi chịu các loại tải trọng khác nhau trong một thời gian dài, như mô hình đàn hồi và mô hình dẻo. Những mô hình này không thể thu được ứng xử thật của bê tông khi chúng bỏ qua đặc tính giòn của bê tông, khi bê tông bắt đầu xuất hiện vết nứt và khi vỡ vụn. Vì vậy, chúng ta cần xây dựng một mô hình bê tông chịu trách nhiệm về các ứng xử thông thường này. Do đó, sự xuất hiện của mô hình bê tông phá hủy do dẻo (Concrete Damage Plasticity model, CDP) ra đời nhằm khỏa lấp những mặt hạn chế trên.

Ngày nay, mô hình bê tông phá hủy do dẻo (CDP) là một trong những mô hình được sử dụng rộng rãi trong giới học thuật nhằm mô phỏng ứng xử của bê tông. Mô hình này dựa vào lý thuyết của Drucker-Prager và được xây dựng bởi Lubliner và cộng sự vào năm 1989 [2]. Sau đó, mô hình CDP này tiếp tục được phát triển bởi Lee và Fenves vào năm 1998 [3].

Các mô hình dẻo và phá hủy là đặc biệt hữu dụng cho các loại vật liệu có đặc tính ma sát và dính bám như bê tông và xi măng, bởi các mô hình này có thể mô tả khá giống ứng xử của vật liệu khi chúng chịu kéo và nén. Sự tổ hợp của mô hình dẻo và phá hủy thường dựa vào đặc tính độ cứng đẳng hướng kết hợp với các thông số phá hủy đẳng hướng hay dị hướng. Phá hủy dị hướng là sự khác nhau về cường độ và độ cứng theo các hướng khác nhau trong vật liệu bê tông. Phá hủy đẳng hướng, ngược lại, là độ cứng và cường độ giống nhau theo các hướng khác nhau trong bê tông. Với nghiên cứu này, chúng ta xem xét sự phá hủy đẳng hướng.

Gần đây, mô hình phá hủy bê tông do dẻo (CDP) được sử dụng rộng rãi trong phần mềm Abaqus để mô phỏng bê tông. Nhóm tác giả Lê Minh [4] sử dụng mô hình CDP để mô phỏng và dự đoán ứng xử của bê tông cường độ cao, với các cấp bê tông C60, C80, C110 dưới các điều kiện tải trọng tĩnh và động khác nhau. Kết quả của bài báo chứng tỏ rằng mô hình CDP đã cho những kết quả khá gần với dữ liệu thực nghiệm, với cả điều kiện tải trọng tĩnh và động, với độ tin cậy khá cao.

Với phần mềm Abaqus, có vài thông số chúng ta cần phải khai báo trong mô hình phá hủy bê tông do dẻo (CDP) [5, 6], bao gồm: Góc trương nở, tỷ số giữa ứng suất dẻo nén hai phương ban đầu với ứng suất dẻo nén một phương ban đầu…; những thông số này khá quan trọng và chúng ảnh hưởng tới kết quả đầu ra. Nhiệm vụ chính của bài báo này là lựa chọn các thông số trên để đưa vào phần mềm Abaqus, mô phỏng thí nghiệm, xuất kết quả và so sánh với dữ liệu thực nghiệm để tìm các thông số tối ưu.

2. PHƯƠNG PHÁP

Ở trong phần lý thuyết dẻo, tensor biến dạng ε thường được phân tách thành hai thành phần là tensor biến dạng đàn hồi ε^e và tensor biến dạng dẻo ε^p:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (1)$$

Trong đó, tensor biến dạng đàn hồi theo công thức:

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

Với E là tensor độ cứng đàn hồi (hay còn gọi là mô-đun đàn hồi) và σ là tensor ứng suất. Tensor biến dạng dẻo ε^p là những biến dạng không thể phục hồi được (hay gây ra vết nứt).

Từ hai công thức trên, ta có: $\sigma = E : (\varepsilon - \varepsilon^p)$ (3)

Sự hư hỏng của một vật rắn được định nghĩa là sự xuống cấp của vật liệu về độ cứng và cường độ. Khi sự hư hỏng gắn liền với sự xuống cấp về độ cứng thì độ cứng được viết theo chỉ số xuống cấp độ cứng:

$$C = (1-d)C_0 \quad (4)$$

Trong đó: d là chỉ số đại diện cho sự xuống cấp; C_0 là tensor độ cứng ban đầu; C là tensor độ cứng. Dựa vào công thức trên, tensor độ cứng đàn hồi Young được viết dưới dạng sau:

$$E = (1-d)E_0 \quad (5)$$

Với E_0 là tensor độ cứng đàn hồi ban đầu.

Mối quan hệ giữa tensor ứng suất danh định σ và tensor ứng suất hiệu quả $\bar{\sigma}$ có thể được viết theo chỉ số xuống cấp d như sau:

$$\sigma = (1-d)\bar{\sigma} \quad (6)$$

Số hạng (1 - d) được hiểu là hiệu giữa diện tích mặt cắt ngang và diện tích hư hỏng trên diện tích mặt cắt ngang. Khi không có hư hỏng, tức là d = 0, thì ứng suất hiệu quả $\bar{\sigma}$ bằng ứng suất danh định σ. Một cách tổng quan, các chỉ số hư hỏng (hay xuống cấp, d_c và d_t) là đại diện cho sự xuống cấp của độ cứng đàn hồi dưới tác dụng của tải trọng nén và kéo.

Trong mô hình phá hủy bê tông do dẻo CDP, đường cong ứng suất - biến dạng của thí nghiệm chịu nén, ta cần biết ứng suất nén σ_c, biến dạng không đàn hồi ε^{in} và chỉ số xuống cấp nén d_c. Nhìn chung, biến dạng không đàn hồi thì bằng tổng biến dạng ε trừ đi biến dạng đàn hồi ε^{el}. Cuối cùng, biến dạng dẻo ε^{pl} được tính theo biến dạng không đàn hồi ε^{in} theo các công thức sau đây [7, 8, 9]:

$$\varepsilon^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (7)$$

$$\varepsilon^{in} = \varepsilon - \varepsilon^{el} \quad (8)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (9)$$

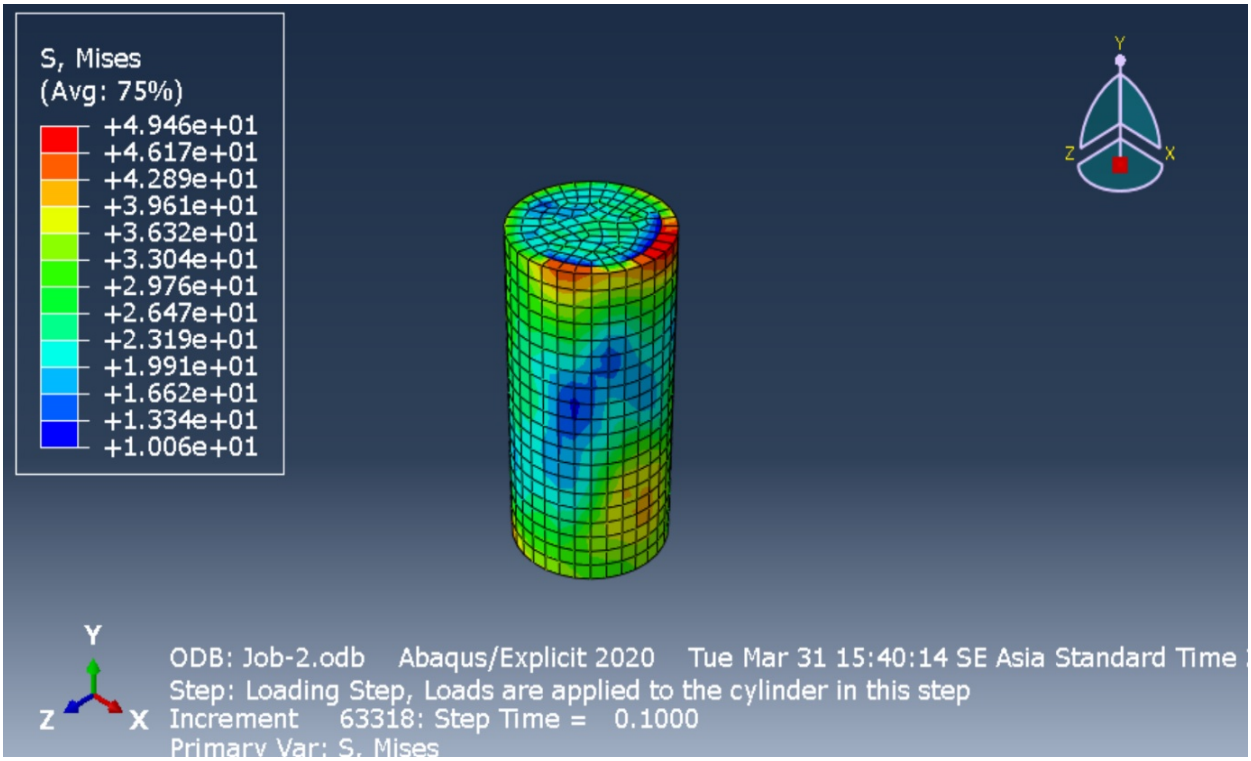
$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^{in} - \left(\frac{d_c}{1-d_c}\right)\left(\frac{\sigma_c}{E_0}\right) \quad (10)$$

Trong đó: σ_{cu} là ứng suất nén giới hạn.

Khi khai báo trong phần mềm Abaqus, ψ là góc trương nở được đo trong mặt phẳng p - q tại áp lực cao. Trong nghiên cứu này, giá trị ψ được lấy là (30^0 - 40^0). Độ lệch tâm của bề mặt dẻo ε được lấy với giá trị là 0,1. Tỷ số giữa ứng suất dẻo nén hai phương ban đầu với ứng suất dẻo nén một phương ban đầu $\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$ là (1 - 2). Tỷ số giữa ứng suất bất biến thứ hai trên kinh tuyến kéo và nén K có giá trị là 2/3. Cuối cùng, tham số độ nhớt lấy giá trị là 0.

3. THÍ NGHIỆM

Các dữ liệu thực nghiệm của bài báo này được lấy từ nhóm tác giả [10], với một kết quả thực nghiệm về bê tông chịu nén một trục cường độ cao, sau đó vật liệu được mô phỏng bằng Abaqus cho thí nghiệm chịu uốn. Tác giả dựa vào dữ liệu thực nghiệm này để mô phỏng thí nghiệm chịu nén một trục, với mẫu là bê tông cường độ cao đạt cường độ giới hạn là 51,2 MPa có hình dạng mẫu là hình trụ với đường kính là 150 mm và chiều cao là 300 mm, dùng phần mềm Abaqus để mô phỏng dựa vào mô hình phá hủy bê tông do dẻo CDP, thay đổi các thông số là góc trương nở ψ nhận các giá trị 30^0, 32^0, 34^0, 36^0, 38^0, 40^0; thay đổi tỷ số ứng suất dẻo nén hai phương ban đầu với ứng suất dẻo nén một phương ban đầu $\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$ với các giá trị lần lượt là 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 và 2,0. Ở đây, các giá trị ψ và $\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$ sẽ được xác định dựa vào việc so sánh giữa dữ liệu thực nghiệm và kết quả mô phỏng. Trong phần mềm Abaqus, phần tử được dùng để mô phỏng mẫu vật liệu là phần tử C3D8R. Đây là kiểu phần tử khối tám nút với ba bậc tự do và ba chuyển vị theo ba phương tại mỗi nút. Kích thước của mỗi cạnh phần tử khối dùng trong mô phỏng là 15 mm.



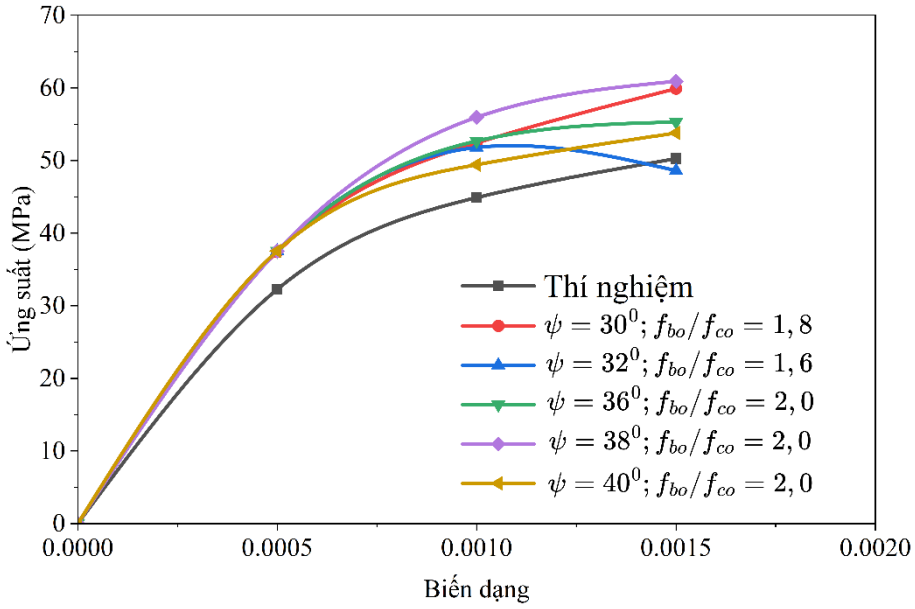
Hình 1. Kết quả mô phỏng thí nghiệm nén một trục mẫu hình trụ bằng phần mềm Abaqus

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Với các giá trị ψ và σ_{b0}/σ_{c0} thay đổi, tác giả đã thực hiện mô phỏng 36 lần thí nghiệm nén mẫu bê tông một trục cường độ cao bằng phần mềm Abaqus, sau đó so sánh với dữ liệu thực nghiệm của mẫu bê tông. Để tìm ra các thông số tối ưu nhất, tác giả dựa vào hệ số tương quan R (correlation coefficient) để đánh giá và so sánh giữa các kết quả. Hệ số R chỉ ra mối quan hệ tuyến tính giữa giá trị thực nghiệm và giá trị mô phỏng. Giá trị R càng gần 1 thì kết quả mô phỏng càng gần với thực nghiệm nhất. Hệ số R được tính theo công thức dưới đây:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\sigma_{\text{exp}}^{i} - \overline{\sigma}_{\text{exp}})(\sigma_{\text{p}}^{i} - \overline{\sigma}_{\text{p}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(\sigma_{\text{exp}}^{i} - \overline{\sigma}_{\text{exp}})^{2}\sum_{i=1}^{N}(\sigma_{\text{p}}^{i} - \overline{\sigma}_{\text{p}})^{2}}} \quad (11)$$

Trong đó: σ_{exp}^{i} là ứng suất thực nghiệm tại điểm thứ i (MPa); $\overline{\sigma}_{\text{exp}}$ là ứng suất trung bình thực nghiệm của các điểm i (MPa); σ_{p}^{i} là ứng suất do mô phỏng tại điểm thứ i (MPa), $\overline{\sigma}_{\text{p}}$ là ứng suất trung bình do mô phỏng của các điểm i (MPa) và N là tổng các điểm i dữ liệu.



Hình 2. So sánh quan hệ ứng suất - biến dạng của thí nghiệm và vài mẫu mô phỏng tiêu biểu

Từ các kết quả tính R trên, giá trị hệ số tương quan lớn nhất là 0,99977 đạt được với tổ hợp dữ liệu: ψ = 30^0 và σ_{b0}/σ_{c0} = 1,8.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày mô hình phá hủy bê tông do dẻo CDP, đưa ra kết quả khảo sát ứng xử chịu nén một trục của các mẫu vật liệu bê tông hình trụ, có sử dụng phần mềm Abaqus để mô phỏng dựa trên mô hình CDP. Các thông số của mô hình phá hủy bê tông do dẻo CDP bao gồm: Góc trương nở ψ, tỷ số giữa ứng suất dẻo nén hai phương ban đầu với ứng suất dẻo nén một phương ban đầu σ_{b0}/σ_{c0}, độ lệch tâm của bề mặt dẻo ε, tỷ số giữa ứng suất bất biến thứ hai trên kinh tuyến kéo và nén K và cuối cùng là tham

số độ nhớt. Từ việc so sánh giữa các kết quả mô phỏng và dữ liệu thực nghiệm, thông qua hệ số tương quan R để đánh giá và so sánh, các thông số này được tối ưu cho bê tông cường độ cao có giới hạn cường độ là 51,2 MPa, với hai giá trị của ψ và σ_{b0}/σ_{c0} lần lượt là 30^0 và 1,8. Ba giá trị còn lại của bộ thông số cho Abaqus được lấy theo giá trị mặc định.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số: DT25-26.91.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] X. B. Nguyen and T. T. Nguyen. Using the Simplified Concrete Damage Plasticity Model in Studying the Penetration Depth in Concrete. Defect Diffus. Forum, vol. 415, pp. 109-114, Apr. 2022, doi: 10.4028/p-81pkw0.

[2] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller and E. Oñate. A plastic-damage model for concrete. Int. J. Solids Struct., vol. 25, no. 3, pp. 299-326, 1989, doi: 10.1016/0020-7683(89)90050-4.

[3] J. Lee and G. L. Fenves. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. J. Eng. Mech., vol. 124, no. 8, pp. 892-900, Aug. 1998, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).

[4] H.- Le Minh, S. Khatir, M. Abdel Wahab and T. Cuong-Le. A concrete damage plasticity model for predicting the effects of compressive high-strength concrete under static and dynamic loads. J. Build. Eng., vol. 44, p. 103239, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103239.

[5] M. Fakeh, A. Jawdhari and A. Fam. Recommended concrete damage plasticity parameters and constitutive models for UHPC in ABAQUS. Eng. Struct., vol. 333, p. 120154, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.engstruct.2025.120154.

[6] Quang B. T. Mô phỏng ứng xử uốn của dầm bê tông tính năng siêu cao sử dụng mô hình phá hoại dẻo. Tạp chí Xây dựng, 2025.

[7] M. Z. M. Bosro et al. Damage plasticity model for green concrete material. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 1347, no. 1, p. 012075, Jun. 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1347/1/012075.

[8] A. H. Al-Zuhairi, A. H. Al-Ahmed, A. A. Abdulhameed, and A. N. Hanoon. Calibration of a New Concrete Damage Plasticity Theoretical Model Based on Experimental Parameters. Civ. Eng. J., vol. 8, no. 2, pp. 225-237, Feb. 2022, doi: 10.28991/CEJ-2022-08-02-03.

[9] M. Hafezolghorani, F. Hejazi, R. Vaghei, M. S. B. Jaafar and K. Karimzade. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete. Struct. Eng. Int., vol. 27, no. 1, pp. 68-78, Feb. 2017, doi: 10.2749/101686616X1081.

[10] B. L. Wahalathantri, D. P. Thambiratnam, and S. Fawzia. A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using Abaqus. Proc. First Int. Conf. Eng. Des. Dev. Built Environ. Sustain. Wellbeing, pp. 260-264, 2011.