

Chẩn đoán vùng nứt trong dầm bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với mô hình ma trận nhằm lần

Phạm Minh Nhân^{1,2}, Nguyễn Chí Thiện^{1,2}, Lê Thanh Cao^{1,2,3}, Đinh Duy Vũ^{1,2}, Lê Bá Tùng^{1,2}, Hồ Đức Duy^{1,2*}

¹Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh

²Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh

³Khoa Xây dựng, Trường Đại học Nha Trang

Ngày nhận bài 14/7/2022; ngày chuyển phân biện 18/7/2022; ngày nhận phân biện 9/8/2022; ngày chấp nhận đăng 12/8/2022

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, một phương pháp chẩn đoán vùng nứt cho dầm bê tông cốt thép (BTCT) sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với mô hình ma trận nhằm lần được đề xuất. Phương pháp này được sử dụng để chẩn đoán vị trí và chiều dài vùng nứt cho dầm BTCT dưới tác dụng của tải trọng. Dầm được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS APDL. Để chứng minh sự phù hợp của mô hình với thực nghiệm, kết quả phân tích tĩnh học của dầm được so sánh với kết quả thực nghiệm và tính toán theo lý thuyết. Từ kết quả phân tích tần số dao động và dạng dao động tại các cấp tải trọng tác dụng khác nhau, phương pháp năng lượng biến dạng được áp dụng để tính chỉ số hư hỏng tại các vị trí trên dầm BTCT. Vùng nứt trong dầm được nhận dạng bằng cách so sánh chỉ số hư hỏng với ngưỡng hư hỏng được đề xuất. Sau đó, độ chính xác của phương pháp chẩn đoán được đánh giá bằng mô hình ma trận nhằm lần. Các kết quả thu được từ nghiên cứu cho thấy, phương pháp đề xuất có khả năng chẩn đoán vị trí và chiều dài vùng nứt trong dầm BTCT khi chịu tải với độ chính xác cao.

Từ khóa: chẩn đoán kết cấu, dầm bê tông cốt thép, ma trận nhằm lần, năng lượng biến dạng, vùng nứt.

Chỉ số phân loại: 2.1

Đặt vấn đề

Lĩnh vực theo dõi và chẩn đoán sức khỏe kết cấu (Structural health monitoring - SHM) nghiên cứu về các phương pháp phát hiện hư hỏng cấu kiện, kết cấu công trình để sửa chữa kịp thời, giúp giảm rủi ro có thể xảy ra khi gặp những điều kiện bất thường. Lĩnh vực này xuất hiện do bản chất của công trình xây dựng là có quy mô lớn, chi phí cao, yêu cầu tuổi thọ dài, dẫn đến cần hạn chế tối đa hư hỏng, sửa chữa hoặc thay thế. Với sự phát triển theo thời gian của ngành xây dựng, các công trình mới được xây dựng có kích thước ngày càng lớn nhằm tối ưu hóa công năng sử dụng. Điều này lại càng khẳng định tính cấp thiết, tính thực tiễn của công tác nghiên cứu và phát triển các kỹ thuật SHM. Trong lĩnh vực SHM, một nhóm phương pháp sử dụng các đặc trưng dao động đang nhận được nhiều sự quan tâm trong giới nghiên cứu nhờ có chi phí thấp và tính linh hoạt trong ứng dụng. Cơ sở của nhóm phương pháp này là sự xuất hiện của hư hỏng làm cho các đặc trưng động học (tần số dao động, dạng dao động) của cấu kiện hoặc kết cấu công trình bị thay đổi.

Việc áp dụng phương pháp chẩn đoán hư hỏng dựa trên tần số dao động đã bắt đầu xuất hiện trong giai đoạn 1970-1980 [1-3]. Nghiên cứu của J. Wang và P. Qiao (2008) [4] đã phát triển một phương pháp chẩn đoán vị trí và kích thước của vết nứt trên dầm dựa trên sự sai khác của dạng

dao động. Trong nghiên cứu này, mô hình cấu kiện dầm có vết nứt được phân tích động học để thu được dạng dao động, sau đó sự sai khác giữa dạng dao động ở trạng thái hư hỏng và trạng thái ban đầu được tính toán bằng phương pháp số. M. Pastor và cs (2012) [5] đã trình bày lại việc sử dụng chỉ số Modal assurance criterion (MAC) để đánh giá sự tương đồng giữa dạng dao động của mô hình thí nghiệm và mô hình phân tích, hoặc cùng một mô hình nhưng ở các trạng thái khác nhau. D. Capecchi và cs (2016) [6] đã thực hiện một nghiên cứu về chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng cho cấu kiện dầm hình vòm bằng phương pháp xem xét sự thay đổi tần số dao động, dạng dao động và đường cong dạng dao động của cấu kiện.

Song song với nhóm các phương pháp chẩn đoán hư hỏng bằng tần số dao động và dạng dao động, nhóm các phương pháp chẩn đoán hư hỏng sử dụng năng lượng biến dạng biểu kiến (Modal strain energy - MSE) cũng được nghiên cứu và phát triển [7-9]. Tiếp theo đó, T.V. Duy và cs (2016) [10] đã phát triển một phương pháp 2 bước chẩn đoán vị trí hư hỏng bằng MSE và mức độ hư hỏng bằng giải thuật tiến hóa cải tiến cho cấu kiện tấm vật liệu hỗn hợp nhiều lớp. D.D. Cong và cs (2019) [11] cũng phát triển một phương pháp MSE phối hợp 2 bước chẩn đoán hư hỏng cho kết cấu tấm, trong đó mức độ hư hỏng được xác định bằng thuật toán Jaya. Nghiên cứu cho thấy, việc chuẩn hóa chỉ số hư hỏng sau khi tính toán làm tăng hiệu quả chẩn đoán

*Tác giả liên hệ: Email: hoducduy@hcmut.edu.vn

Crack detection in reinforced concrete beams under various loadings using the modal strain energy method and confusion matrix model

Minh Nhan Pham^{1,2}, Chi Thien Nguyen^{1,2},
Thanh Cao Le^{1,2,3}, Duy Vu Dinh^{1,2},
Ba Tung Le^{1,2}, Duc Duy Ho^{1,2*}

¹Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT),
Vietnam National University Ho Chi Minh City

²Vietnam National University Ho Chi Minh City

³Faculty of Civil Engineering, Nha Trang University

Received 14 July 2022; revised 9 August 2022; accepted 12 August 2022

Abstract:

In this study, a damage detection method for reinforced concrete (RC) beams using the modal strain energy (MSE) method combined with a confusion matrix model is proposed. This method is used for identifying the crack zone position and length of RC beams under various loadings. The beam is modelled by ANSYS APDL software. To prove the finite element model's validity, the static properties of the model are compared with experimental data and theoretical calculation. From the natural frequencies and mode shapes at different load levels, a damage index is calculated using the MSE method. The crack zone is detected by comparing the damage index with a proposed damage threshold. Then, the damage detection method's accuracy is evaluated by the confusion matrix model. Finally, the results from this study show that the proposed method can detect the position and length of the crack zone in the RC beam under various loadings with high accuracy.

Keywords: confusion matrix, crack zone, damage detection, modal strain energy, reinforced concrete beam.

Classification number: 2.1

vị trí hư hỏng. S. Khatir và cs (2019) [12] đã trình bày một phương pháp chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng cho kết cấu dầm. Trong nghiên cứu đã chẩn đoán vị trí hư hỏng bằng phương pháp sự thay đổi tần số và chỉ số MSE chuẩn hóa, đồng thời chẩn đoán mức độ hư hỏng bằng thuật toán Teaching learning based optimization (TLBO). Sau đó, kết quả từ thuật toán TLBO được so sánh với hai thuật toán tối ưu đã được ứng dụng trong các nghiên cứu trước đây là Particle swarm optimization và Bat algorithm. L.T. Cao và cs (2020) [13] đã phát triển một phương pháp chẩn đoán hư hỏng cho cấu kiện tấm sử dụng phối hợp phương pháp MSE và thuật toán di truyền. Nghiên cứu này đã chỉ ra rằng, việc chỉ sử dụng thành phần chuyển vị đứng của dạng dao động vẫn đảm bảo chẩn đoán tốt vị trí hư hỏng, từ đó có thể giảm công tác thu thập dữ liệu phục vụ chẩn đoán trong thực tế. Đồng thời, nghiên cứu còn cho thấy mỗi dạng dao động nhạy với một số trạng thái hư hỏng nhất định, dẫn đến sự cần thiết phải sử dụng kết hợp các dạng dao động để có thể chẩn đoán hư hỏng một cách tổng quát.

Trước đây, các nghiên cứu sử dụng phương pháp số để chẩn đoán hư hỏng bằng phương pháp năng lượng biến dạng có đối tượng là cấu kiện dầm, dàn, sàn được mô phỏng bằng phần tử thanh hoặc phần tử tấm riêng lẻ với vật liệu đồng chất. Đồng thời, các nghiên cứu đã thực hiện khảo sát sự xuất hiện của hư hỏng khi cấu kiện không chịu tác dụng của tải trọng, điển hình là các hư hỏng đơn lẻ được mô phỏng bằng cách xóa hoặc giảm độ cứng phần tử. Trong lĩnh vực chẩn đoán hư hỏng hiện đang thiếu những nghiên cứu áp dụng phương pháp chẩn đoán cho kết cấu xuất hiện hư hỏng dưới tác dụng của tải trọng. Một thiếu sót khác trong các nghiên cứu về phương pháp năng lượng biến dạng là cần có một mô hình đánh giá, xác định độ chính xác, cũng như đặc điểm và tính ứng dụng thực tiễn của phương pháp chẩn đoán.

Mục tiêu chính của nghiên cứu này là phát triển phương pháp năng lượng biến dạng nhằm xác định vị trí và chiều dài vùng nứt xảy ra trong kết cấu dầm BTCT dưới tác dụng của tải trọng. Nghiên cứu này thực hiện cả bài toán thuận và ngược. Đối với bài toán thuận, một dầm BTCT được mô phỏng theo phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) sử dụng phần mềm ANSYS APDL [14] để phân tích ứng xử của dầm tương ứng với các cấp tải trọng khác nhau. Đối với bài toán chẩn đoán ngược, phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với mô hình đánh giá ma trận nhầm lẫn được phát triển để chẩn đoán vị trí và chiều dài vùng nứt trong dầm. Kết quả phân tích tần số dao động và dạng dao động của dầm tương ứng với từng cấp tải trọng bài toán thuận được sử dụng làm thông số đầu vào cho phương pháp chẩn đoán. Sau đó, kết quả chẩn đoán từ bài toán ngược được kiểm chứng với kết quả của bài toán thuận nhằm đánh giá tính khả thi của phương pháp chẩn đoán được đề xuất.

Phương pháp năng lượng biến dạng

Công thức đánh giá

Nghiên cứu của J.T. Kim và cs (2003) [7] đã đề xuất các công thức nhằm tính toán chỉ số hư hỏng cho kết cấu dầm đồng chất thông qua việc theo dõi sự thay đổi của năng lượng biến dạng. Dựa trên phương pháp đã được nêu [7], những nội dung sau đây sẽ trình bày các công thức nhằm áp dụng phương pháp năng lượng biến dạng cho việc chẩn đoán hư hỏng dầm BTCT.

Xét một cấu kiện dầm BTCT được mô phỏng theo phương pháp PTHH. Mô hình dầm gồm các phần tử bê tông khối 8 nút và các phần tử cốt thép thanh 2 nút. Dầm có tiết diện không đổi. Các giá trị tung độ của dạng dao động được lấy tại nút phần tử. Chỉ số hư hỏng tại vị trí thứ j của dầm được xác định theo công thức sau:

$$\beta_{ij} = \frac{1 + \sum_i^{nm} \gamma_{ij}^*}{1 + \sum_i^{nm} [\gamma_i g_i + \gamma_{ij}]} \quad (1)$$

trong đó: chỉ số hư hỏng β_{ij} được tính tại vị trí thứ j tương ứng với dạng dao động thứ i ; γ_i là độ thay đổi tương đối độ cứng dầm trong dạng dao động thứ i ; g_i là hệ số không thứ nguyên, thể hiện sự thay đổi của tham số dạng dao động thứ i ; nm là số dạng dao động sử dụng trong chẩn đoán.

$$g_i \cong \frac{1}{nm} \left(\frac{f_i^{*2} - f_i^2}{f_i^2} \right) \quad (2)$$

trong đó: f_i là tần số của dạng dao động thứ i . Độ thay đổi tương đối độ cứng dầm tại vị trí thứ j trong dạng dao động thứ i là γ_{ij} . Dấu * thể hiện cho giá trị tại trạng thái có sự xuất hiện hư hỏng. Giá trị γ_{ij} và γ_{ij}^* được tính toán theo công thức sau:

$$\gamma_{ij} = \int_j [\Phi_{ij}''(x)]^2 dx \quad (3)$$

$$\gamma_{ij}^* = \int_j [\Phi_{ij}^{*''}(x)]^2 dx \quad (4)$$

trong đó: Φ_{ij} là dạng dao động thứ i tại vị trí thứ j ; Φ_{ij}'' là độ cong dạng dao động thứ i tại vị trí thứ j .

Với dạng dao động là kết quả thu được từ việc phân tích động học kết cấu, miền giá trị của Φ_{ij} có tính chất là rời rạc và không liên tục. Để xác định gần đúng độ cong dạng

dao động trong trường hợp trên, nghiên cứu này sử dụng phương pháp sai phân trung tâm bậc hai, được trình bày trong công thức sau:

$$\Phi_{ij}'' = \frac{\Phi_{i,j-1} - 2\Phi_{i,j} + \Phi_{i,j+1}}{(x_j - x_{j-1})(x_{j+1} - x_j)}, \quad (j = 2 \rightarrow np - 1) \quad (5)$$

trong đó: x_j là tọa độ nút thứ j trên dầm; np là tổng số lượng nút trên dầm được sử dụng nhằm xác định dạng dao động.

Khi thực hiện tính toán độ cong dạng dao động tại hai nút biên, giá trị dạng dao động tại các điểm nằm ngoài phạm vi của dầm phụ thuộc vào điều kiện biên. Trong trường hợp hai đầu dầm có điều kiện biên tự do, $\Phi_{i,0}$ và $\Phi_{i,np+1}$ được xác định theo nguyên tắc phản xứng như sau:

$$\Phi_{i,0} = -\Phi_{i,2} \quad (6)$$

$$\Phi_{i,np+1} = -\Phi_{i,np-1} \quad (7)$$

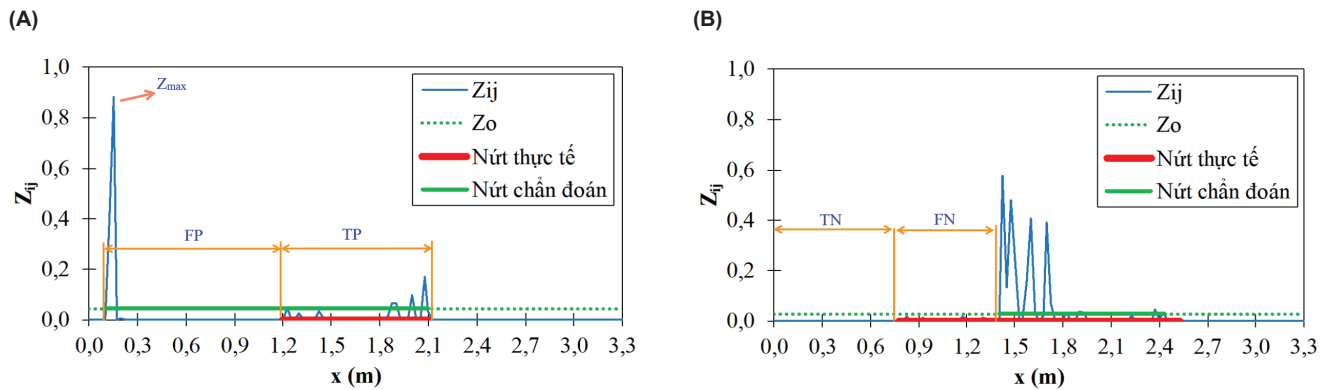
Sau khi tính toán chỉ số hư hỏng tại các vị trí trên dầm, β_{ij} được chuẩn hóa theo công thức sau:

$$Z_{ij} = \frac{\beta_{ij} - \bar{\beta}_i}{\sigma_{\beta_i}} \quad (8)$$

trong đó: Z_{ij} là chỉ số hư hỏng được chuẩn hóa tương ứng với dạng dao động thứ i tại vị trí thứ j ; $\bar{\beta}_i, \sigma_{\beta_i}$ lần lượt là giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của chỉ số hư hỏng tương ứng với dạng dao động thứ i .

Ngưỡng hư hỏng đề xuất

Ngưỡng hư hỏng là một đường chuẩn song song với trục hoành của biểu đồ chỉ số hư hỏng, được dùng để xác định vị trí và chiều dài vùng hư hỏng trong dầm [15]. Trong nghiên cứu này, ngưỡng hư hỏng có giá trị $Z_0 = 5\% Z_{ij,max}$ được áp dụng. Trong đó, $Z_{ij,max}$ là giá trị lớn nhất của chỉ số hư hỏng đã được chuẩn hóa. Vùng nứt được chẩn đoán là vùng có điểm bắt đầu tại vị trí có chỉ số hư hỏng $Z_{ij} > Z_0$ lần đầu tiên và kết thúc tại vị trí có chỉ số $Z_{ij} < Z_0$ lần cuối cùng (hình 1). Khi áp dụng phương pháp chẩn đoán trong thực tế, vẫn có trường hợp chỉ số hư hỏng Z_{ij} tại vùng dầm không bị nứt có giá trị lớn hơn 0. Việc đề xuất một ngưỡng hư hỏng Z_0 nhất định nhằm loại bỏ đi vùng nhiễu, hạn chế sự sai lệch của phương pháp trong việc phân biệt vùng hư hỏng và vùng không hư hỏng.



Hình 1. Minh họa chẩn đoán vị trí và chiều dài vùng nứt. (A) Xác định giá trị tổ hợp FP (False positive) và tổ hợp TP (True positive); (B) Xác định giá trị tổ hợp TN (True negative) và tổ hợp FN (False negative).

Đánh giá độ chính xác của phương pháp chẩn đoán

Trong nghiên cứu này, mô hình đánh giá ma trận nhầm lẫn được sử dụng để đánh giá độ chính xác của kết quả chẩn đoán từ phương pháp năng lượng biến dạng [16]. Mô hình này có bản chất là một bảng phân phối tần số hai chiều trình bày kết quả phân loại của một bài toán. Xét dưới góc nhìn toán học, phương pháp chẩn đoán hư hỏng là một bài toán phân loại có hai giá trị là hư hỏng hoặc không hư hỏng. Để đánh giá phương pháp chẩn đoán, mô hình ma trận nhầm lẫn được áp dụng dưới dạng bài toán phân loại nhị phân (Binary classification). Khi đó, ma trận nhầm lẫn trình bày tần suất của 4 tổ hợp TP, TN, FP và FN (hình 2). True (đúng) nghĩa là kết quả chẩn đoán phù hợp với thực tế, false (sai) nghĩa là kết quả chẩn đoán sai so với thực tế. Positive nghĩa là đối tượng được phân loại có hư hỏng, negative nghĩa là đối tượng được phân loại không hư hỏng.

		Thực tế	
		Positive	Negative
Mô hình phân loại	Positive	TP	FP
	Negative	FN	TN

Hình 2. Minh họa về ma trận nhầm lẫn.

Ý nghĩa của 4 tổ hợp: TP là những vùng cấu kiện được phương pháp năng lượng biến dạng dự đoán chính xác là có hư hỏng; TN là những vùng cấu kiện được phương pháp năng lượng biến dạng dự đoán chính xác là không hư hỏng; FP là những vùng cấu kiện được phương pháp năng lượng biến dạng dự đoán là có hư hỏng, nhưng trong thực tế thì không hư hỏng; FN là những vùng cấu kiện được phương pháp năng lượng biến dạng dự đoán là không hư hỏng, nhưng trong thực tế thì có hư hỏng.

Các chỉ số được sử dụng để đánh giá tính chính xác của phương pháp chẩn đoán được tính toán từ ma trận nhầm lẫn như sau:

Accuracy (tính chính xác tổng thể): Chỉ số này đặc trưng cho tính chính xác tổng thể của phương pháp chẩn đoán, thể hiện tỷ lệ của tất cả trường hợp chẩn đoán đúng (không phân biệt có hư hỏng hay không) trên toàn bộ cấu kiện. Đây là tiêu chí phổ biến nhất khi đánh giá hiệu năng của các loại phương pháp chẩn đoán hay các mô hình phân loại, tuy nhiên giá trị thực dụng của chỉ số này không rõ ràng vì chỉ số Accuracy không có một mục tiêu cụ thể.

$$Accuracy = (TP + TN)/(TP + TN + FP + FN) \tag{9}$$

Precision (độ chính xác): Chỉ số này đặc trưng cho tỷ lệ những vùng hư hỏng thật được chẩn đoán là hư hỏng so với tất cả các vùng cấu kiện được phương pháp năng lượng biến dạng chẩn đoán là có hư hỏng (tức có bao nhiêu chẩn đoán “positive” là thật sự “true”).

$$Precision = TP/(TP + FP) \tag{10}$$

Recall (độ nhạy): Chỉ số này đặc trưng cho tỷ lệ chẩn đoán “positive” đúng do phương pháp năng lượng biến dạng đưa ra. Nói cách khác, chỉ số này phản ánh số vùng cấu kiện phương pháp chẩn đoán là bị hư hỏng đúng so với tất cả các vùng hư hỏng xảy ra trong thực tế.

$$Recall = TP/(TP + FN) \tag{11}$$

Specificity (độ chuyên biệt): Chỉ số này đặc trưng cho tỷ lệ chẩn đoán “negative” đúng do phương pháp năng lượng biến dạng đưa ra. Chỉ số này phản ánh số vùng không hư hỏng do phương pháp chẩn đoán đúng so với tất cả vùng không hư hỏng trong thực tế.

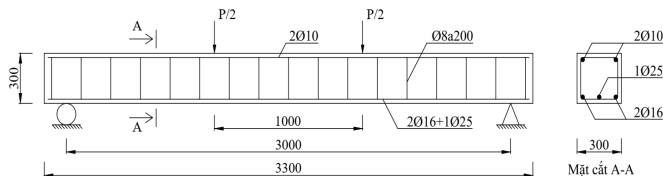
$$Specificity = TN/(TN + FP) \tag{12}$$

Balanced accuracy (tính chính xác cân bằng): Khi số vùng cấu kiện hư hỏng và không hư hỏng bị mất cân đối, một tiêu chí khác phù hợp hơn là Balanced accuracy (BAC) hay độ chính xác sau cân bằng.

$$BAC = (\text{Recall} + \text{Specificity})/2 \quad (13)$$

Mô phỏng số dầm BTCT

Trong nghiên cứu này, một dầm BTCT được thí nghiệm bởi S. Sasmal và S. Kalidoss (2015) [17] được mô phỏng. Đây là dầm BTCT một nhịp, có kích thước 300×300×3300 mm, khoảng cách hai gối tựa là 3000 mm. Tải trọng tác dụng lên dầm là hai lực tập trung, khoảng cách giữa mỗi điểm đặt lực với gối tựa là 1000 mm, thép lớp dưới 1Φ25 + 2Φ16, thép lớp trên 2Φ10, thép đai Φ8a200. Chi tiết về kích thước, điều kiện biên, vị trí gia tải, cốt thép trong dầm được thể hiện ở hình 3. Dầm được gia tải tăng dần cho đến khi bị phá hoại. Các thông số về vật liệu của dầm được liệt kê chi tiết ở bảng 1.

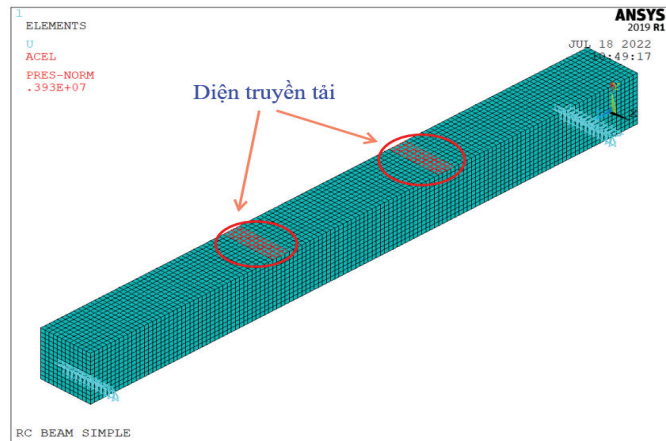


Hình 3. Sơ đồ dầm BTCT trong nghiên cứu.

Bảng 1. Đặc trưng vật liệu của dầm BTCT.

Đặc trưng	Bê tông	Cốt thép
Mô đun đàn hồi (N/m ²)	31,3×10 ⁹	200×10 ⁹
Khối lượng riêng (kg/m ³)	2400	7850
Hệ số Poisson	0,2	0,3
Cường độ chịu nén (MPa)	44,35×10 ⁶	-
Cường độ chịu kéo (MPa)	4,129×10 ⁶	-
Giới hạn chảy (MPa)	-	0,5×10 ⁹
Biến dạng cực hạn ϵ_{co}	0,0035	0,025

Nghiên cứu này sử dụng phần mềm ANSYS APDL [14] để mô phỏng dầm BTCT được khảo sát. Kết quả phân tích tĩnh học và động học được so sánh với kết quả thí nghiệm trong nghiên cứu của S. Sasmal và S. Kalidoss (2015) [17] và tính toán theo lý thuyết để xác nhận sự phù hợp của việc mô phỏng số so với thực nghiệm. Hình 4 thể hiện mô hình dầm trong ANSYS APDL. Vật liệu bê tông được mô phỏng bằng phần tử khối 8 nút SOLID65. Loại phần tử trên có khả năng biểu diễn biến dạng dẻo, nứt khi chịu ứng suất kéo và nén vỡ khi chịu ứng suất nén. Vật liệu của cốt thép dọc và cốt thép đai được mô phỏng bằng phần tử BEAM188. Các phần tử bê tông và cốt thép được liên kết với nhau tại các nút nhằm đảm bảo giả thiết liên kết hoàn toàn giữa bê tông và cốt thép.



Hình 4. Mô hình dầm BTCT trong phần mềm ANSYS APDL.

Phân tích kết cấu BTCT trong ANSYS APDL là phân tích phi tuyến đàn dẻo. Mô hình vật liệu bê tông phần nén được khai báo dựa trên đề xuất của D.C Kent và R. Park (1971) [18]. Cường độ chịu nén của bê tông được tính theo tiêu chuẩn ACI 318-19 [19]. Mô hình ứng xử kéo của vật liệu bê tông sử dụng mô hình tuyến tính của ANSYS APDL [14], có kể đến ứng xử của phần tử bê tông sau khi bị nứt. Cường độ chịu kéo nhập vào mô hình là cường độ chịu kéo khi uốn, với giá trị được tính theo công thức từ tiêu chuẩn ACI 318-19 [19]. Mô hình William và Warnke [14] được sử dụng để xác định sự phá hoại của vật liệu bê tông, trong đó có xét đến cả hai kiểu phá hoại do nứt và nén vỡ.

$$f'_c = \left(\frac{E_c}{4700} \right)^2 \text{ (MPa)} \quad (14)$$

$$f_r = 0,62\sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (15)$$

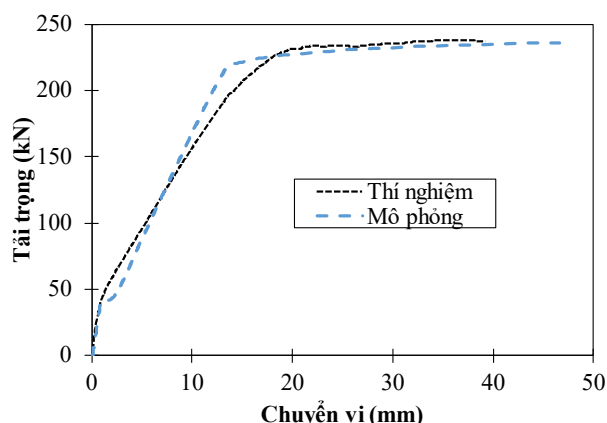
Vật liệu cốt thép được mô phỏng là vật liệu đàn dẻo tuyệt đối. Quan hệ giữa ứng suất kéo và biến dạng của thép được giả sử là song tuyến tính. Tải trọng tập trung được mô phỏng bằng 2 diện truyền tải phân bố đều có kích thước 300×100 mm, trọng tâm mỗi vùng gia tải cách gối tựa một khoảng 1000 mm. Dầm được chia lưới với kích thước mỗi phần tử là 25 mm.

Kết quả phân tích mô hình dầm BTCT bằng ANSYS APDL

Kết quả phân tích quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị

Hình 5 thể hiện biểu đồ quan hệ tải trọng và chuyển vị đứng tại giữa dầm, thu được từ thí nghiệm của S. Sasmal và S. Kalidoss (2015) [17] và kết quả mô phỏng ANSYS APDL. Mô hình dầm BTCT cũng có 3 giai đoạn làm việc là đàn hồi, đàn hồi dẻo và chảy dẻo. Kết quả này tương ứng với biểu đồ lực - chuyển vị thay đổi độ dốc 2 lần tại điểm dầm bắt đầu nứt và điểm cốt thép bắt đầu chảy dẻo. Tải trọng phá hoại của dầm thí nghiệm là 238 kN và của dầm mô phỏng là 236 kN, chênh lệch 0,84%. Có thể thấy, đường tải trọng - chuyển vị mô phỏng phù hợp với kết quả thực nghiệm. Vẫn có sự sai khác nhỏ giữa 2 biểu đồ, nguyên nhân là do

việc mô phỏng chưa biểu diễn được hoàn toàn đặc điểm của dầm BTCT thực tế. Cụ thể là 2 đặc điểm sau: một là, trong thí nghiệm uốn dầm BTCT, khi ứng suất của bê tông đạt giá trị f'_c , nếu tiếp tục tăng tải tác dụng và biến dạng tiếp tục tăng, bê tông sẽ có hiện tượng giảm ứng suất, còn phần tử bê tông trong mô hình PTHH dầm BTCT có ứng suất không đổi; thứ hai, liên kết giữa bê tông và cốt thép trong thực tế là không hoàn hảo như giả thiết mô phỏng.



Hình 5. Biểu đồ quan hệ tải trọng - chuyển vị của dầm BTCT.

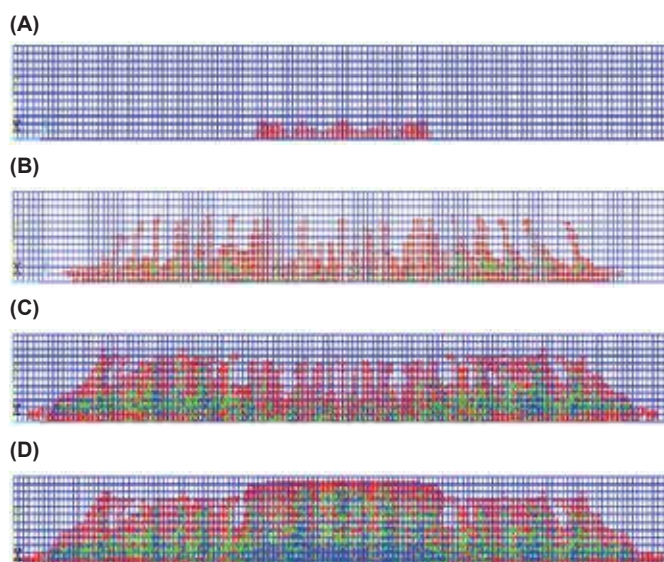
Kết quả phân tích vùng nứt của dầm BTCT khi gia tải

Hình 6 biểu diễn kết quả phân tích trạng thái hư hỏng của phần tử bê tông trong mô hình dầm BTCT tại một số cấp tải trọng. Tải trọng gây nứt của dầm BTCT mô phỏng là 41 kN. Tại cấp tải trọng trên, vùng hư hỏng xuất hiện giữa hai điểm đặt lực. Vùng nứt sau đó mở rộng về hai gối tựa khi tiếp tục tăng tải trọng tác dụng. Bảng 2 trình bày giá trị tải trọng gây nứt của dầm BTCT trong thực nghiệm, mô phỏng và tính toán theo lý thuyết. Tải gây nứt từ thực nghiệm của S. Sasmal và S. Kalidoss (2015) [17] được xác định bằng điểm trên biểu đồ quan hệ tải trọng - chuyển vị mà độ dốc bắt đầu thay đổi lần đầu tiên. Tải trọng gây nứt tính toán theo lý thuyết được xác định theo công thức dựa trên tài liệu của J.K. Wight và J.G. MacGregor (2011) [20]:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (16)$$

$$P_{cr} = \frac{6M_{cr}}{L} \quad (17)$$

trong đó: M_{cr} và P_{cr} lần lượt là mô men gây nứt và tải trọng gây nứt của dầm; f_r là cường độ chịu kéo của bê tông, xác định từ thí nghiệm uốn 3 điểm dầm bê tông đồng chất kích thước; I_g là mô men kháng uốn của tiết diện dầm, có kể đến việc quy đổi tiết diện thép chịu kéo thành tiết diện bê tông chịu kéo; y_t là khoảng cách từ trọng tâm tiết diện đã quy đổi đến thớ chịu kéo lớn nhất của tiết diện dầm; L là khoảng cách giữa hai gối tựa của dầm chịu uốn 4 điểm.



Hình 6. Kết quả vùng nứt của dầm BTCT trong mô phỏng. (A) Cấp tải 41 kN; (B) Cấp tải 128 kN; (C) Cấp tải 218 kN; (D) Cấp tải 236 kN.

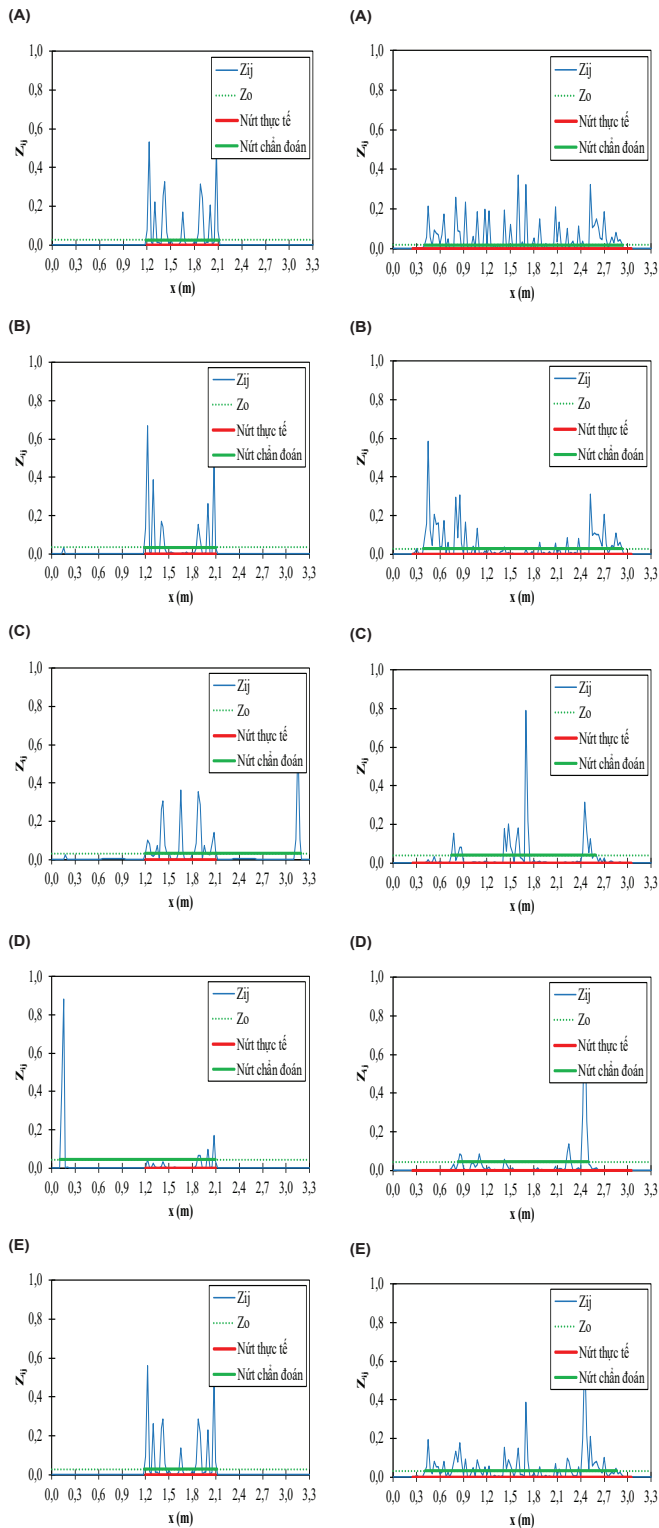
Bảng 2. So sánh tải trọng gây nứt giữa các phương pháp.

Phương pháp xác định	Tải trọng gây nứt kN	Độ chênh lệch so với [17] (%)
[17]	39,048	-
Nghiên cứu này	41	5
[20]	37,679	3,51

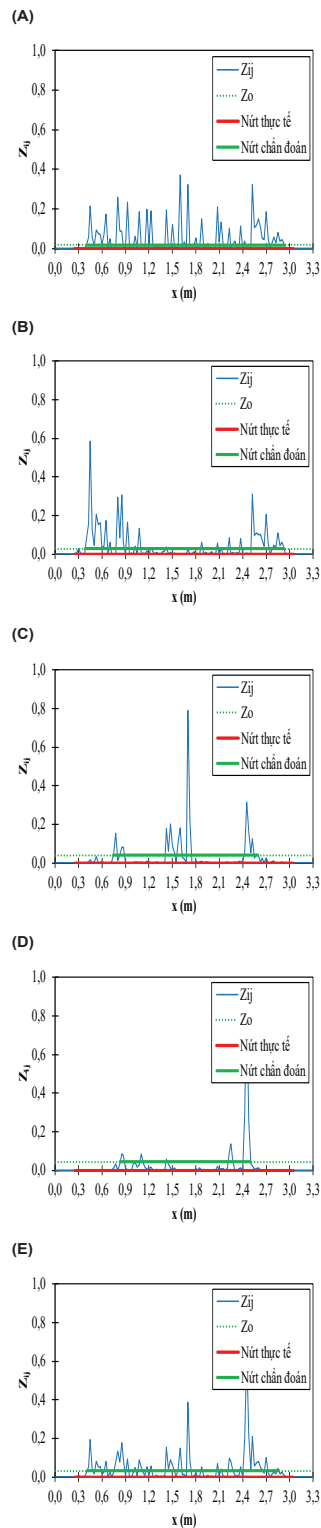
Kết quả bảng 2 cho thấy, tải trọng gây nứt của dầm BTCT trong mô phỏng và tính toán theo lý thuyết chênh lệch so với thực nghiệm là nhỏ hơn 5%. Từ đây có thể kết luận rằng, ứng xử nứt của mô hình dầm BTCT là phù hợp thí nghiệm và có thể được sử dụng để phục vụ cho công tác chẩn đoán hư hỏng.

Kết quả chẩn đoán chiều dài vùng nứt của dầm BTCT

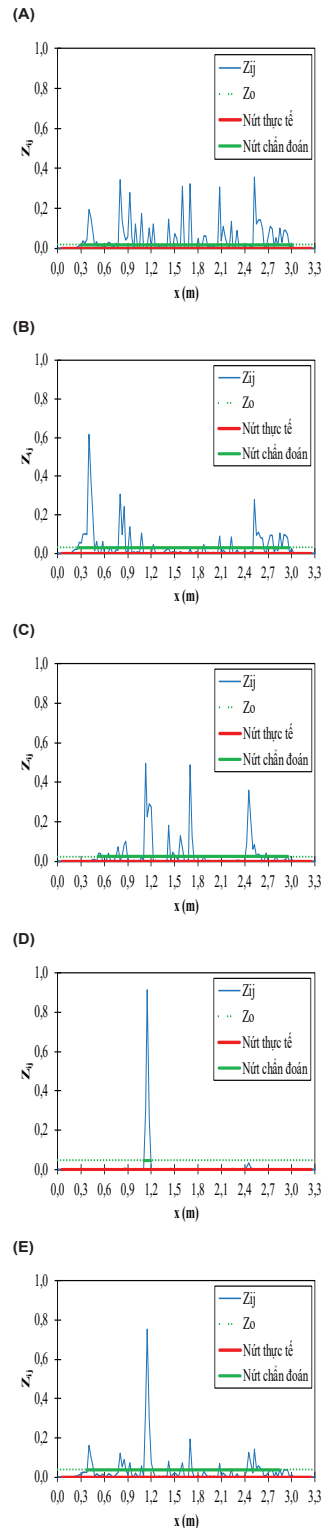
Bốn dạng dao động uốn đầu tiên của dầm BTCT được chọn nhằm sử dụng cho công tác chẩn đoán hư hỏng. Hình 7-10 biểu diễn các biểu đồ chẩn đoán vị trí, chiều dài vùng nứt sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng. Cần lưu ý rằng, dữ liệu đầu vào của phương pháp năng lượng biến dạng chỉ cần tần số dao động và dạng dao động tương ứng với các trạng thái của dầm. Trong nghiên cứu này, dữ liệu dạng dao động được lấy tại mặt dưới của dầm. Việc chẩn đoán được thực hiện tại các cấp tải trọng 41, 128, 218 và 236 kN. Trong đó, cấp tải trọng bắt đầu xuất hiện vết nứt là 41 kN, cấp tải trọng cốt thép bắt đầu chày dèo là 218 kN, cấp tải trọng dầm bị phá hoại là 236 kN. Các biểu đồ chẩn đoán cho thấy vùng hư hỏng được chẩn đoán là phù hợp với trạng thái hư hỏng của dầm BTCT chịu uốn trong thực tế. Vùng hư hỏng được chẩn đoán là nứt tập trung ở giữa nhịp dầm. Khi tải trọng tiếp tục tăng, vùng nứt được chẩn đoán mở rộng về phía hai gối tựa. Ngoài ra, kết quả chẩn đoán từ biểu đồ cho thấy, dạng dao động thứ ba và thứ tư có kết quả chẩn đoán kém chính xác hơn so với dạng dao động thứ nhất, thứ hai và khi sử dụng tổ hợp các dạng dao động.



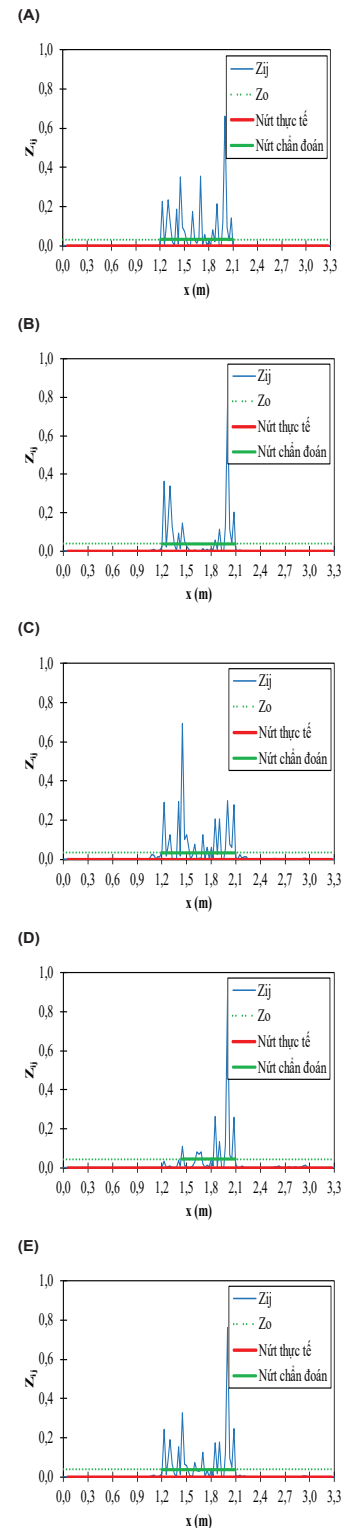
Hình 7. Biểu đồ chỉ số hư hỏng và kết quả chẩn đoán đối với cấp tải 41 kN. (A) Dạng dao động thứ nhất; (B) Dạng dao động thứ hai; (C) Dạng dao động thứ ba; (D) Dạng dao động thứ tư; (E) Tổng hợp bốn dạng dao động.



Hình 8. Biểu đồ chỉ số hư hỏng và kết quả chẩn đoán đối với cấp tải 128 kN. (A) Dạng dao động thứ nhất; (B) Dạng dao động thứ hai; (C) Dạng dao động thứ ba; (D) Dạng dao động thứ tư; (E) Tổng hợp bốn dạng dao động.



Hình 9. Biểu đồ chỉ số hư hỏng và kết quả chẩn đoán đối với cấp tải 218 kN. (A) Dạng dao động thứ nhất; (B) Dạng dao động thứ hai; (C) Dạng dao động thứ ba; (D) Dạng dao động thứ tư; (E) Tổng hợp bốn dạng dao động.



Hình 10. Biểu đồ chỉ số hư hỏng và kết quả chẩn đoán đối với cấp tải 236 kN. (A) Dạng dao động thứ nhất; (B) Dạng dao động thứ hai; (C) Dạng dao động thứ ba; (D) Dạng dao động thứ tư; (E) Tổng hợp bốn dạng dao động.

Bảng 3 tổng hợp kết quả độ chính xác chẩn đoán của phương pháp năng lượng biến dạng bằng mô hình ma trận nhầm lẫn tại một số cấp tải được khảo sát từ 41 đến 236 kN. Tại các cấp tải trọng từ 41 đến 168 kN, chỉ số chính xác tổng thể Accuracy luôn tốt và đạt trên 85%, trừ trường hợp sử dụng dạng dao động thứ ba và thứ tư. Khi tải trọng tác dụng tăng dần, vùng hư hỏng mở rộng làm cho chỉ số Accuracy giảm dần. Quan sát chỉ số Accuracy khi sử dụng tổ hợp dạng dao động, tại 41 kN chỉ số này có giá trị là 99,04% và khi tải trọng tác dụng tăng lên 168 kN thì chỉ số Accuracy còn 85,57%. Tại các cấp tải trọng khi cốt thép đã chảy dẻo và dầm sắp bị phá hoại là 218, 223 và 236 kN, chỉ số Accuracy của trường hợp tổ hợp dạng dao động đạt giá trị tương đối thấp, với các giá trị lần lượt là 77,99, 59,39 và 29,39%. Các kết quả vừa trình bày cho thấy, phương pháp năng lượng biến dạng có độ chính xác cao khi chẩn đoán vị trí và chiều dài vùng nứt cho cấu kiện dầm BTCT còn làm việc trong miền đàn hồi và miền đàn hồi dẻo. Phương pháp giảm hiệu quả khi áp dụng cho dầm BTCT làm việc trong giai đoạn cốt thép đã bắt đầu chảy dẻo. Tuy nhiên, mục đích của các phương pháp chẩn đoán hư hỏng kết cấu là phát hiện sớm hư hỏng ngay từ các giai đoạn làm việc ban đầu của kết cấu. Do đó, phương pháp năng lượng biến dạng vẫn thể hiện đúng chức năng của một phương pháp SHM khi sử dụng cho công tác chẩn đoán hư hỏng cho kết cấu công trình.

Nếu chỉ dựa trên giá trị chỉ số Accuracy để kết luận phương pháp năng lượng biến dạng là phù hợp để áp dụng trong việc chẩn đoán hư hỏng trong cấu kiện chịu tải trọng tác dụng là chưa đủ. Ví dụ đối với một cấu kiện dầm có vùng nứt nhỏ ở giữa nhịp và phương pháp đưa ra kết quả chẩn đoán là vùng nứt trên nằm tại vị trí khác. Vì kích thước vùng nứt trên nhỏ, chỉ số Accuracy vẫn có thể đạt giá trị lớn. Thông qua việc sử dụng kết hợp với chỉ số Precision và Specificity, mô hình ma trận nhầm lẫn có thể chứng minh được phương pháp năng lượng biến dạng là phù hợp để áp dụng trong chẩn đoán vị trí và kích thước vùng hư hỏng cho cấu kiện dưới tác dụng của tải trọng. Theo kết quả từ bảng 3, chỉ số Precision và Specificity luôn gần bằng 100%, ngoài trường hợp sử dụng dạng dao động thứ ba và thứ tư. Chỉ số Precision cao thể hiện có ít vị trí chẩn đoán là có nứt mà thực tế là không có nứt. Chỉ số Specificity cao thể hiện có ít vị trí thực tế là không nứt nhưng chẩn đoán là nứt. Với 2 chỉ số trên có giá trị lớn, phương pháp đề xuất thể hiện đặc điểm là vùng dầm được chẩn đoán có sự xuất hiện của vùng nứt luôn thật sự có tồn tại hư hỏng.

Bảng 3. Tổng hợp chỉ số đánh giá độ chính xác của phương pháp.

Tải trọng (kN)	Dạng dao động	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	Specificity (%)	Balanced accuracy (%)
41 (tải trọng dầm bắt đầu nứt)	1	99,03	96,55	100,00	98,66	99,33
	2	99,41	97,87	100,00	99,19	99,59
	3	66,75	45,06	100,00	54,29	77,14
	4	66,69	45,01	99,78	54,28	77,03
	Tổng hợp	99,04	96,59	100,00	98,67	99,34
47	1	96,27	100,00	92,97	100,00	96,48
	2	98,66	99,29	98,18	99,20	98,69
	3	78,12	100,00	58,74	100,00	79,37
	4	89,42	100,00	80,05	100,00	90,02
	Tổng hợp	98,73	99,67	97,93	99,63	98,78
56	1	96,96	100,00	95,39	100,00	97,70
	2	97,83	100,00	96,71	100,00	98,36
	3	85,57	100,00	78,11	100,00	89,05
	4	85,93	100,00	78,64	100,00	89,32
	Tổng hợp	97,33	100,00	95,94	100,00	97,97
97	1	95,97	100,00	94,93	100,00	97,47
	2	96,66	100,00	95,80	100,00	97,90
	3	87,13	100,00	83,82	100,00	91,91
	4	71,79	100,00	64,54	100,00	82,27
	Tổng hợp	95,69	100,00	94,58	100,00	97,29
128	1	91,90	100,00	90,46	100,00	95,23
	2	92,30	100,00	90,92	100,00	95,46
	3	71,26	100,00	66,13	100,00	83,06
	4	65,73	100,00	59,61	100,00	79,80
	Tổng hợp	89,54	100,00	87,67	100,00	93,84
168	1	92,64	100,00	91,77	100,00	95,88
	2	92,68	100,00	91,81	100,00	95,90
	3	84,46	100,00	82,61	100,00	91,31
	4	13,40	100,00	3,12	100,00	51,56
	Tổng hợp	85,57	100,00	83,85	100,00	91,93
218 (tải trọng cốt thép bắt đầu chảy dẻo)	1	85,06	100,00	84,60	100,00	92,30
	2	85,10	100,00	84,63	100,00	92,32
	3	76,88	100,00	76,16	100,00	88,08
	4	5,82	100,00	2,88	100,00	51,44
	Tổng hợp	77,99	100,00	77,30	100,00	88,65
223	1	30,48	100,00	28,31	100,00	64,16
	2	49,61	100,00	48,04	100,00	74,02
	3	76,01	100,00	75,26	100,00	87,63
	4	31,44	100,00	29,30	100,00	64,65
	Tổng hợp	59,39	100,00	58,12	100,00	79,06
236 (tải trọng dầm BTCT bị phá hoại)	1	29,27	100,00	27,62	100,00	63,81
	2	29,38	100,00	27,74	100,00	63,87
	3	29,65	100,00	28,01	100,00	64,01
	4	22,36	100,00	20,56	100,00	60,28
	Tổng hợp	29,39	100,00	27,74	100,00	63,87

Kết luận

Trong nghiên cứu này, một phương pháp chẩn đoán vị trí và chiều dài vùng nứt cho dầm BTCT dưới tác dụng của tải trọng sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với mô hình ma trận nhám lần được đề xuất. Những đóng góp chính nghiên cứu này mang lại là: (i) Đề xuất việc áp dụng phương pháp năng lượng biến dạng cho kết cấu dầm BTCT có hư hỏng hình thành do tác dụng của tải trọng; (ii) Đề xuất việc sử dụng mô hình ma trận nhám lần làm phương pháp đánh giá độ chính xác và chứng minh sự phù hợp của việc áp dụng phương pháp năng lượng biến dạng khi chẩn đoán hư hỏng cho kết cấu dầm BTCT chịu tải trọng tác dụng. Từ các kết quả nghiên cứu, các kết luận sau được rút ra:

Mô hình PTHH cho dầm BTCT có ứng xử phù hợp với dầm BTCT trong thực nghiệm. Đây là cơ sở để sử dụng kết quả mô phỏng số trong việc chẩn đoán hư hỏng cho cấu kiện thực tế có cùng kích thước, vật liệu và trạng thái. Việc sử dụng mô hình PTHH thay cho thực nghiệm có các ưu điểm là tiết kiệm chi phí, thời gian, thuận tiện trong khảo sát nhiều cấp tải trọng và dạng dao động.

Phương pháp năng lượng biến dạng cho kết quả chẩn đoán chính xác vị trí và chiều dài vùng nứt của dầm BTCT tại các cấp tải trọng khác nhau. Độ chính xác đạt được là trên 85% khi dầm làm việc trong giai đoạn đàn hồi. Khi dầm BTCT làm việc trong giai đoạn cốt thép đã bị chảy dẻo và xuất hiện vùng nứt rộng, độ chính xác của phương pháp có giảm. Tuy nhiên, phương pháp vẫn đảm bảo được tính hiệu quả khi thực hiện chức năng thường xuyên theo dõi trạng thái của dầm trong điều kiện làm việc bình thường. Đặc biệt, phương pháp có ý nghĩa trong việc theo dõi và phát hiện hư hỏng từ lúc mới hình thành, chưa gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến “sức khỏe” của kết cấu. Phương pháp đề xuất còn có ưu điểm là có độ tin cậy cao, thể hiện thông qua việc vùng nứt được chẩn đoán luôn tồn tại trong vùng hư hỏng thực tế với hai chỉ số Precision và Specificity luôn gần bằng 100%. Việc áp dụng mô hình đánh giá ma trận nhám lần đã thể hiện được tính hiệu quả khi vừa định lượng được độ chính xác, vừa định tính được sự hiệu quả của phương pháp chẩn đoán khi áp dụng đối với các kết cấu có hư hỏng xuất hiện dưới tác dụng của tải trọng. Các đặc điểm nêu trên cho thấy phương pháp đề xuất có tiềm năng lớn trong công tác chẩn đoán hư hỏng cho dầm BTCT trong thực tiễn.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] P. Cawley, R.D. Adams (1979), “The location of defects in structures from measurements of natural frequencies”, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, **14**(2), pp.4-57, DOI: 10.1243/03093247V142049.

[2] H. Sato (1983), “Free vibration of beams with abrupt changes of cross section”, *Journal of Sound and Vibration*, **89**(1), pp.59-64, DOI: 10.1016/0022-460X(83)90910-0.

[3] M.M.F. Yuen (1985), “A numerical study of the eigenparameters of a damaged cantilever”, *Journal of Sound and Vibration*, **103**(3), pp.301-310, DOI: 10.1016/0022-460X(85)90423-7.

[4] J. Wang, P. Qiao (2008), “On irregularity-based damage detection method for cracked beams”, *International Journal of Solids and Structures*, **45**(2), pp.688-704, DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2007.08.017.

[5] M. Pastor, M. Binda, T. Harcarik (2012), “Modal assurance criterion”, *Procedia Engineering*, **48**, pp.543-548, DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.551.

[6] D. Capecchi, J. Ciambella, A. Pau, F. Vestroni (2016), “Damage identification in a parabolic arch by means of natural frequencies, modal shapes and curvatures”, *Meccanica*, **51**(11), pp.2847-2859, DOI: 10.1007/s11012-016-0510-3.

[7] J.T. Kim, Y.S. Ryu, H.M. Cho, N. Stubbs (2003), “Damage identification in beam-type structures: Frequency-based method vs mode-shape-based method”, *Engineering Structures*, **25**(1), pp.57-67, DOI: 10.1016/S0141-0296(02)00118-9.

[8] M.H. Hu, S.T. Tu, F.Z. Xuan, et al. (2012), “Strain energy numerical technique for structural damage detection”, *Applied Mathematics and Computation*, **219**(5), pp.2424-2431, DOI: 10.1016/j.amc.2012.08.078.

[9] S.M. Seyedpoor (2012), “A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization”, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **47**(1), pp.1-8, DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2011.07.011.

[10] T.V. Duy, V.H. Huu, H.D. Trung, T.N. Thoi (2016), “A two-step approach for damage detection in laminated composite structures using modal strain energy method and an improved differential evolution algorithm”, *Composite Structures*, **147**, pp.42-53, DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.03.027.

[11] D.D. Cong, T.V. Duy, V.H. Huu, T.N. Thoi (2019), “Damage assessment in plate-like structures using a two-stage method based on modal strain energy change and Jaya algorithm”, *Inverse Problems in Science and Engineering*, **27**(2), pp.166-189.

[12] S. Khatir, M.A. Wahab, D. Boutchicha, T. Khatir (2019), “Structural health monitoring using modal strain energy damage indicator coupled with teaching-learning-based optimization algorithm and isogeometric analysis”, *Journal of Sound and Vibration*, **448**, pp.230-246, DOI: 10.1016/j.jsv.2019.02.017.

[13] L.T. Cao, B.V. Sỹ, H.Đ. Duy (2020), “Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với thuật toán di truyền”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội*, **14**(4V), tr.16-28, DOI: 10.31814/stee.nuce2020-14(4V)-02.

[14] Ansys (2019), *Ansys Documentation for Release 19.0*.

[15] T.C. Le, D.D. Ho, C.T. Nguyen, T.C. Huynh (2022), “Structural damage localization in plates using global and local modal strain energy method”, *Advances in Civil Engineering*, **2022**, DOI: 10.1155/2022/4456439, DOI: 10.1155/2022/4456439.

[16] G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani (2021), “An introduction to statistical learning”, *Springer Texts in Statistics*, Springer, 440pp.

[17] S. Sasmal, S. Kalidoss (2015), “Nonlinear FE simulations of structural behavior parameters of reinforced concrete beam with epoxy-bonded FRP”, *Journal of The Mechanical Behavior of Materials*, **24**(1-2), pp.35-46, DOI: 10.1515/jmbm-2015-0004.

[18] D.C. Kent, R. Park (1971), “Flexural members with confined concrete”, *Journal of the Structural Division*, **97**(7), DOI: 10.1061/JSDEAG.0002957.

[19] American Concrete Institute (2018), *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*.

[20] J.K. Wight, J.G. MacGregor (2011), *Reinforced Concrete - Mechanics and design*, 6th Edition, Prentice Hall Publisher, 1177pp.