

Chẩn đoán vùng nứt trong dầm bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng sử dụng phương pháp độ cong đường biến dạng

Hà Minh Tuấn¹, Trần Thanh Duy^{2,3,4}, Nguyễn Việt Tiến^{2,3,5}, Đặng Ngọc Thúy Vy^{2,3}, Trương Trần Đệ Nhất^{2,3}, Hồ Đức Duy^{2,3,*}



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

TÓM TẮT

Việc theo dõi và chẩn đoán kết cấu giúp phát hiện sớm những bất thường trong kết cấu, tạo điều kiện thuận lợi để sửa chữa hoặc thay thế những cấu kiện bị hư hỏng kịp thời, đánh giá tuổi thọ còn lại của công trình, hạn chế đến mức thấp nhất hậu quả có thể xảy ra. Ngày nay, khoa học công nghệ trong lĩnh vực xây dựng phát triển hết sức mạnh mẽ. Việc phát triển phương pháp chẩn đoán hư hỏng có tính hiệu quả và tin cậy là một vấn đề đáng chú ý trong các nghiên cứu hiện tại qua nhiều năm nay. Nghiên cứu này trình bày phương pháp chẩn đoán vị trí và chiều dài vùng nứt trong dầm bê tông cốt thép (BTCT) sử dụng thông số đầu vào là độ cong của đường biến dạng. Một thí nghiệm uốn 4 điểm của một dầm BTCT được mô phỏng lại bằng phần mềm ANSYS APDL. Kết quả mô phỏng được kiểm chứng bằng việc so sánh với kết quả thực nghiệm của nghiên cứu trước để chứng minh độ tin cậy của mô hình. Dựa trên dữ liệu đường biến dạng của dầm tương ứng với các cấp tải trọng tác dụng khác nhau, sự thay đổi độ cong của đường biến dạng tại các vị trí trên dầm BTCT được phân tích tương ứng với các cấp độ nứt khác nhau của dầm. Sau đó, một bộ chỉ số chẩn đoán dựa trên hiệu số độ cong của đường biến dạng được kiến nghị nhằm đánh giá độ chính xác của kết quả chẩn đoán. Kết quả từ nghiên cứu cho thấy phương pháp độ cong đường biến dạng có độ chính xác cao trong việc chẩn đoán vị trí và chiều dài vùng nứt trong dầm BTCT.

Từ khoá: chẩn đoán kết cấu, độ cong đường biến dạng, dầm bê tông cốt thép, phân tích phi tuyến, vùng nứt

GIỚI THIỆU

Việc theo dõi và chẩn đoán sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring: SHM) cung cấp các thông tin quan trọng cho việc quản lý và vận hành các công trình xây dựng. Hơn nữa, việc phát hiện sớm hư hỏng và có biện pháp bảo trì kịp thời sẽ nâng cao độ an toàn và tăng tuổi thọ cho công trình xây dựng. Ngoài ra, việc nghiên cứu phát triển các phương pháp xác định hư hỏng đóng một vai trò rất quan trọng trong lĩnh vực SHM. Ví dụ, nước biển, muối trong gió biển và môi trường mặn gây ra những hậu quả nghiêm trọng đối với các công trình cầu bê tông ven biển mà không được báo trước. Trong SHM của các cầu bê tông này, điều quan trọng là phải đánh giá mối quan hệ giữa khả năng làm việc của kết cấu và tình trạng hư hỏng để tiến hành bảo trì đúng lúc. Rytter¹ đã đề xuất ba cấp độ của quy trình xác định hư hỏng là chẩn đoán sự xuất hiện (cấp độ 1), vị trí (cấp độ 2) và mức độ của các hư hỏng bên trong kết cấu (cấp độ 3). Nói cách khác, mục đích chính của các phương pháp phát hiện hư hỏng là xác định sự xuất hiện, vị trí và mức độ nghiêm trọng của hư hỏng đó. Việc phát triển các phương pháp chẩn đoán hư hỏng kết cấu là một chủ

đề thu hút được sự chú ý của các nghiên cứu trong những năm gần đây. Trong đó, các đáp ứng tĩnh và động của kết cấu đóng vai trò quan trọng trong việc xây dựng các phương pháp chẩn đoán.

Một số nghiên cứu liên quan đến việc sử dụng đáp ứng động học để phát hiện hư hỏng của kết cấu đã được thực hiện trong những năm vừa qua¹⁻⁵. Trong đó, sự thay đổi của tần số dao động đã được ứng dụng để xác định sự suy giảm độ cứng kết cấu². Sự thay đổi dạng dao động³, dạng dao động chưa hoàn chỉnh^{4,5}, độ cong dạng dao động^{6,7} đã được sử dụng để khoanh vùng các hư hỏng. Bên cạnh đó, các nghiên cứu dựa trên phương pháp sử dụng năng lượng biến dạng đã được áp dụng để cải thiện việc định lượng hư hỏng. Năm 1995, Stubbs và cộng sự⁸ đã ứng dụng thành công phương pháp dựa trên việc giảm năng lượng biến dạng của dạng dao động trong việc chẩn đoán hư hỏng trên kết cấu dầm của công trình cầu ở bang New Mexico, Hoa Kỳ. Vào năm 2010, Kim và cộng sự⁹ đã đề xuất một phương pháp hỗn hợp dao động-trở kháng để phát hiện, phân loại hai dạng hư hỏng trong dầm cầu bằng bê tông cốt thép ứng suất trước: tổn hao lực căng và giảm độ cứng trong dầm.

¹Khoa Xây dựng, Trường Đại học Công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh, 475A đường Điện Biên Phủ, phường 25, quận Bình Thạnh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh, 268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

⁴Công ty TNHH Quốc tế T.Y.LIN Việt Nam, 60A đường Hoàng Văn Thu, phường 09, quận Phú Nhuận, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

⁵Công ty cổ phần Tư vấn Xây dựng Điện 4, 11 đường Hoàng Hoa Thám, phường Lộc Thọ, TP. Nha Trang, Tỉnh Khánh Hoà, Việt Nam

Liên hệ

Hồ Đức Duy, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh, 268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Email: hoducduy@hcmut.edu.vn

Trích dẫn bài báo này: Tuấn H M, Duy T T, Tiến N V, Vy Đ N T, Nhất T T Đ, Duy H Đ. Chẩn đoán vùng nứt trong dầm bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng sử dụng phương pháp độ cong đường biến dạng. *Sci. Tech. Dev. J. - Eng. Tech.*; 6(1):1786-1797.

Lịch sử

- Ngày nhận: 08-01-2023
- Ngày chấp nhận: 20-3-2023
- Ngày đăng: 31-3-2023

DOI:

<https://doi.org/10.32508/stdjet.v6i1.1075>



Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



Song song với các nghiên cứu dựa trên đáp ứng động học, các phương pháp phát hiện hư hỏng dựa trên việc sử dụng đáp ứng tĩnh học cũng đã thu hút được nhiều sự chú ý¹⁰⁻¹⁸; vì các đáp ứng tĩnh học có thể thu được một cách chính xác và nhanh chóng bằng các công cụ đo lường với chi phí thấp. Năm 1991, Sanayei và Onipede¹⁰ đã đề xuất phương pháp đánh giá các đặc tính của các phần tử kết cấu từ các dữ liệu thu được từ thí nghiệm tĩnh học như các tải trọng tĩnh được sử dụng và các chuyển vị đo đạc. Sau đó, Banan và cộng sự¹¹ đã đề xuất một thuật toán để ước tính các thuộc tính cấu thành phần tử của mô hình phần tử hữu hạn từ các chuyển vị đo được dưới tải trọng tĩnh đã biết. Bên cạnh đó, Wang và cộng sự¹² đã đề xuất một thuật toán phân loại hai giai đoạn để nhận biết các hư hỏng kết cấu bằng cách sử dụng sự khác biệt về tần số dao động và chuyển vị tĩnh học đo được. Năm 2005, một thuật toán xác định hư hỏng hai giai đoạn dựa trên việc sử dụng lý thuyết hệ thống xám và sự thay đổi độ cong đường biến dạng đo được để xác định vị trí hư hỏng của dầm công xôn đã được đề xuất bởi Chen và cộng sự¹³. Kết quả cho thấy rằng phương pháp phân tích dựa trên quan hệ xám có thể khoanh vùng các thiệt hại từ nhẹ đến trung bình và có thể xác định mức độ thiệt hại với độ chính xác hợp lý. Bảy năm sau, nghiên cứu của Abdo¹⁴ đã xác nhận rằng những thay đổi về độ cong đường biến dạng có thể được sử dụng như một chỉ số phát hiện vị trí hư hỏng hiệu quả đối với kết cấu dầm ngay cả đối với hư hỏng mức độ nhẹ. Năm 2013, một nghiên cứu khác của Yazdanpanah và Seyedpoor đã đánh giá hiệu quả của việc sử dụng độ cong đường biến dạng từ dữ liệu ứng xử tĩnh học để định vị và chẩn đoán mức độ nghiêm trọng của hư hỏng trong dầm Euler-Bernoulli¹⁵. Các kết quả số đã chứng minh rằng thông số độ cong đường biến dạng nhạy cảm với sự giảm độ cứng. Năm 2017, Ha và Fukada¹⁶ đã sử dụng trực tiếp dữ liệu chuyển vị nút để chẩn đoán hư hại bên trong kết cấu dầm bê tông ứng suất trước. Nhóm nghiên cứu đã đề xuất hai chỉ số, đó là chỉ số phát hiện sự xuất hiện của hư hỏng và chỉ số tìm ra vị trí của hư hỏng. Năm 2019, nghiên cứu của Ono và cộng sự¹⁷ đã đề xuất sử dụng Displacement-based Index (DBI) và hệ số quan hệ xám (GRC), trong đó các đường ảnh hưởng chuyển vị của các tấm sàn được sử dụng làm đầu vào trong quy trình đánh giá. Các nghiên cứu tham số được thực hiện bằng cách thay đổi các vị trí hư hỏng và các điều kiện biên của một mô hình cầu kích thước thực có chiều dài 36 m để xem xét các ảnh hưởng có thể có của chúng đối với hiệu quả của phương pháp đề xuất. Kết quả chỉ ra rằng một trong hai cách tiếp cận có thể phát hiện chính xác hư hỏng trong mô hình mô phỏng. Cùng năm, dữ liệu đường ảnh hưởng của chuyển vị thu được từ thí

nghiệm xe chạy cũng đã được Maki và cộng sự¹⁸ đã được sử dụng để chẩn đoán sự suy giảm về độ cứng của một công trình cầu nhịp 36 m trong thực tế. Sau đó, Won và cộng sự¹⁹ thực hiện giám sát chuyển vị bằng máy biến áp vi sai biến đổi tuyến tính (Linear Variable Differential Transformer - LVDT) để đánh giá hư hỏng dầm. Gần đây, Zhang và cộng sự²⁰ đã đề xuất phương pháp giám sát chuyển vị kết cấu dựa trên vùng nhận dạng kết hợp hệ thống mạng nơ-ron vào năm 2021.

Các phương pháp chẩn đoán thường được áp dụng trên dầm được mô phỏng bằng phần tử thanh và gán một vật liệu đồng chất. Việc chẩn đoán chỉ dừng ở việc khảo sát vị trí của một hoặc một vài hư hỏng đơn lẻ được tạo ra bằng cách xóa phần tử hoặc giảm độ cứng phần tử tương ứng tại vị trí đó. Nhưng trong thực tế, kết cấu dầm bê tông cốt thép (BTCT) luôn có ứng xử qua lại giữa bê tông và cốt thép, quan hệ giữa bê tông và cốt thép sẽ gây ra độ nhiễu nhất định cho các phương pháp chẩn đoán hư hỏng. Mục tiêu chính của nghiên cứu này là phát triển phương pháp xác định vị trí và chiều dài vùng bê tông có vết nứt xảy ra trong kết cấu dầm BTCT sử dụng dữ liệu đầu vào là độ cong của đường biến dạng. Cụ thể là, dầm BTCT được mô phỏng theo phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phần mềm ANSYS APDL có xét đến sự làm việc phi tuyến của bê tông và cốt thép. Sau đó, dầm được gia tải để phân tích ứng xử làm việc như trong thực tế. Dầm có nhiều cấp độ hình thành khe nứt khác nhau do tác dụng của tải trọng. Kết quả phân tích độ cong đường biến dạng của dầm tương ứng với từng trạng thái được sử dụng để xác định vị trí và chẩn đoán chiều dài vùng nứt. Để đánh giá độ chính xác của phương pháp chẩn đoán cho dầm BTCT, ngưỡng hư hỏng thích hợp và các chỉ số đánh giá mới cũng được đề xuất trong nghiên cứu này.

ĐỀ XUẤT CHỈ SỐ XÁC ĐỊNH VÙNG NÚT DỰA VÀO PHƯƠNG PHÁP ĐỘ CONG ĐƯỜNG BIẾN DẠNG

Độ cong đường biến dạng

Phương pháp chẩn đoán trong nghiên cứu này sử dụng dữ liệu độ cong đường biến dạng. Các giá trị chuyển vị ở các cấp tải khác nhau của dầm được thu thập dựa trên kết quả phân tích theo phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) sử dụng phần mềm ANSYS. Từ đó, giá trị độ cong của đường biến dạng được tính toán và xác định dựa trên phương pháp xấp xỉ trung tâm như sau⁶:

$$u_i'' = \frac{u_{i+1} - 2 \times u_i + u_{i-1}}{l^2} \quad (1)$$

trong đó: u_i'' là độ cong đường biến dạng tại vị trí thứ i ; u_i là chuyển vị tại nút thứ i ; u_{i+1} là chuyển vị tại nút thứ $i+1$; u_{i-1} là chuyển vị tại nút thứ $i-1$; l là chiều dài của phần tử. Đối với các nút ở 2 đầu biên của dầm, dữ liệu của nút $i-1$ là không có cho nút biên bên trái và dữ liệu của nút $i+1$ là không có cho nút biên bên phải. Đối với điều kiện biên tự do và biên liên kết khớp, nút biên không bị ràng buộc về chuyển vị xoay (xoay tự do). Hai giá trị nêu trên được để xuất xác định theo nguyên tắc phản xứng²¹ như sau:

Nút biên bên trái:

$$u_{i-1} = -u_{i+1} \quad (2)$$

Nút biên bên phải:

$$u_{i+1} = -u_{i-1} \quad (3)$$

Chỉ số hiệu số độ cong đường biến dạng

Dựa trên phương pháp hiệu số độ cong dạng dao động⁶, nghiên cứu này để xuất phương pháp dựa trên hiệu số độ cong đường biến dạng. Khi có sự hình thành khe nứt xảy ra bên trong kết cấu, độ cong của đường biến dạng sẽ có sự thay đổi. Độ cong đường biến dạng được xác định bằng đạo hàm bậc hai của véc-tơ chuyển vị. Giá trị chuyển vị ở các cấp tải khác nhau của trường hợp trước và sau khi vết nứt xuất hiện được thu thập từ việc phân tích ứng xử phi tuyến của mô hình dầm BTCT sử dụng phần mềm ANSYS. Từ đó, đường độ cong đường biến dạng sẽ được xác định theo công thức (1). Sau khi có các đường độ cong đường biến dạng do trọng lượng bản thân của dầm ở trạng thái chưa gia tải và ở trạng thái có khe nứt (trạng thái cần chẩn đoán), độ khác biệt (Z_i) giữa các giá trị độ cong đường biến dạng sẽ được xác định dựa trên hiệu số giá trị tại từng vị trí của hai đường.

$$Z_i = |u_{si}'' - u_{di}''| \quad (4)$$

trong đó: Z_i là hiệu số độ cong tại vị trí thứ i , u_{si}'' là độ cong đường biến dạng tại vị trí thứ i của dầm ở trạng thái chưa gia tải; u_{di}'' là chuyển vị tại nút thứ i của dầm ở trạng thái có khe nứt (trạng thái cần chẩn đoán). Sau đó, dựa trên đường cong thể hiện mối quan hệ giữa độ khác biệt và vị trí phần tử (Hình 1), những điểm mà đường cong có sự thay đổi lớn là vị trí hay vùng hư hỏng của kết cấu.

Ngưỡng hư hỏng để xuất

Ngưỡng hư hỏng là một đường chuẩn song song với trục hoành của biểu đồ hiệu số độ cong đường biến dạng dùng để xác định chiều dài vùng nứt. Trong nghiên cứu này, ngưỡng $Z_0 = 5\%Z_{max}$ được để xuất áp dụng để chẩn đoán vị trí và phạm vi của vùng nứt (với

Z_{max} là giá trị lớn nhất của hiệu số độ cong). Chiều dài vùng nứt chẩn đoán là hình chiếu lên trục dầm của phần biểu đồ có $Z_i \geq Z_0$ (Hình 2). Bên cạnh đó, việc chẩn đoán vùng chưa nứt trong dầm cũng quan trọng. Thông thường, khi dầm chưa xuất hiện vùng nứt thì biểu đồ đường cong chẩn đoán vẫn có những vị trí khác biệt (vùng bị nhiễu), dẫn đến rất dễ nhầm lẫn khi chẩn đoán vùng nứt của dầm chưa nứt và dầm đã nứt. Do đó, ngưỡng hư hỏng $Z_0 = 5\%Z_{max}$ được kiến nghị nhằm loại bỏ đi vùng bị nhiễu để hạn chế những sai sót khi chẩn đoán vị trí vùng nứt trong dầm BTCT.

Bộ chỉ số đánh giá độ chính xác của phương pháp chẩn đoán

Trong thực tế, vùng nứt của dầm là không biết trước nên cần chẩn đoán. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, để đánh giá được độ chính xác của phương pháp chẩn đoán, chiều dài vùng nứt thực tế được xác định từ mô hình ANSYS được so sánh với vùng nứt chẩn đoán bằng phương pháp độ cong đường biến dạng. Từ đó, một bộ bao gồm ba chỉ số được kiến nghị để đánh giá độ chính xác của phương pháp chẩn đoán. Trong đó, độ chính xác vùng nứt, độ chính xác vùng không nứt và độ chính xác tổng thể lần lượt là A , B , C được định nghĩa như sau:

Độ chính xác vùng nứt (A) là tỉ số giữa chiều dài vùng nứt chẩn đoán nằm trong chiều dài vùng nứt thực tế. Chỉ số này nhằm đánh giá độ chính xác của phương pháp trong việc xác định phạm vi xuất hiện vùng nứt trong dầm.

$$A = \frac{L_{pred}}{L_{crack}} \times 100\%$$

trong đó: L_{pred} là chiều dài vùng nứt chẩn đoán nằm trong vùng nứt thực tế; L_{crack} là chiều dài vùng nứt thực tế (Hình 3).

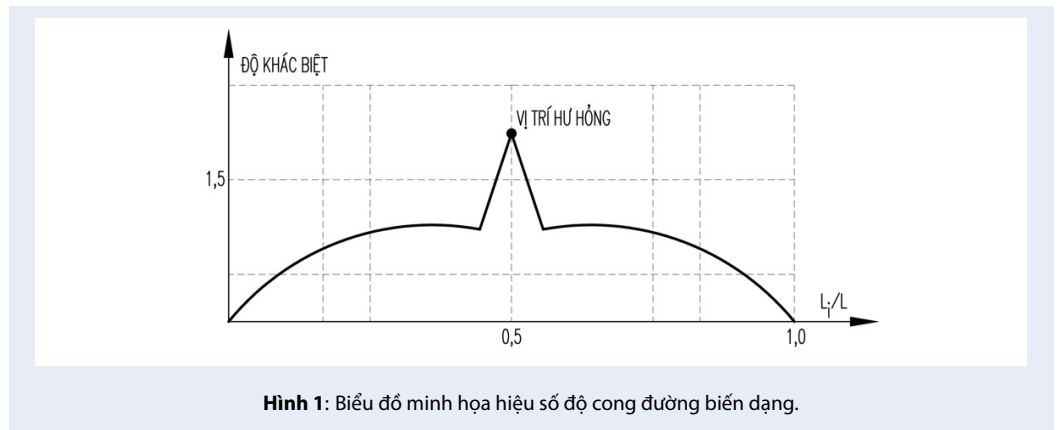
Độ chính xác vùng không nứt (B) là tỉ số giữa chiều dài vùng không nứt chẩn đoán với chiều dài vùng không nứt thực tế được xác định như sau:

$$L_{o,pred} = L_{o,crack} - L_{pred,out} \quad (6)$$

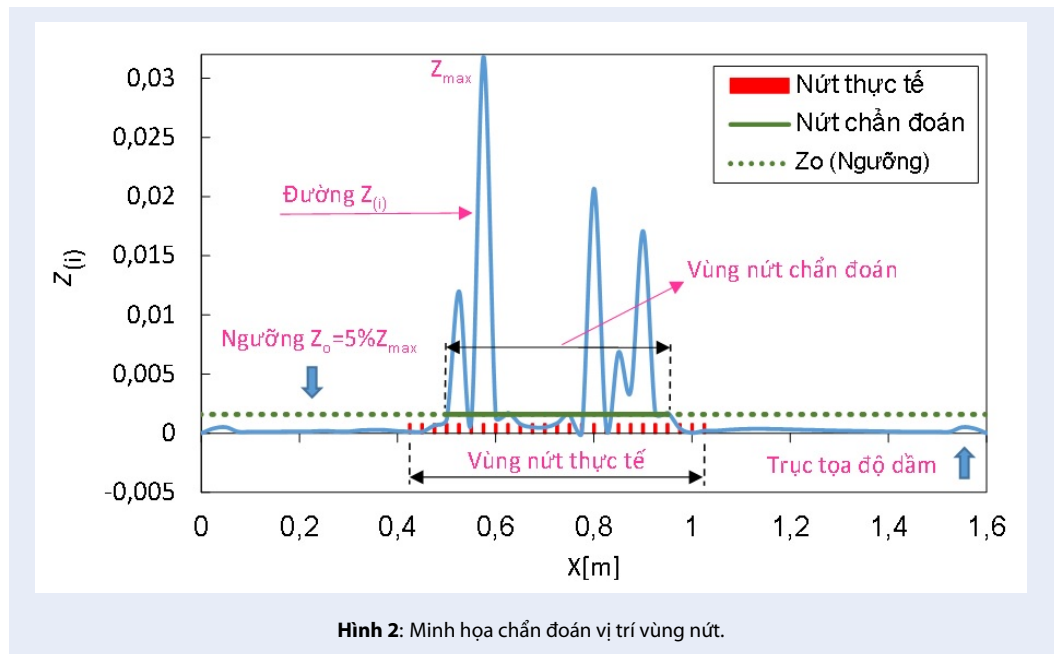
$$B = \frac{L_{o,pred}}{L_{o,crack}} \times 100\% \quad (7)$$

trong đó : $L_{o,pred}$ là chiều dài vùng không nứt chẩn đoán (đã loại bỏ vùng nứt chẩn đoán nằm ngoài phạm vi vùng nứt thực tế) ; $L_{pred,out}$ là chiều dài vùng nứt chẩn đoán nằm ngoài vùng nứt thực tế (Hình 3); $L_{o,crack}$ là chiều dài vùng không nứt thực tế, được tính như sau:

$$L_{o,crack} = L - L_{crack} \quad (8)$$



Hình 1: Biểu đồ minh họa hiệu số độ cong đường biến dạng.



Hình 2: Minh họa chẩn đoán vị trí vùng nứt.

Độ chính xác tổng thể (C) được đề xuất với ý nghĩa bằng tổng độ chính xác chẩn đoán vùng nứt và vùng không nứt nhân với trọng số của mỗi vùng. Trọng số của mỗi vùng (nứt, không nứt) là tỉ số giữa chiều dài vùng nứt hoặc không nứt thực tế với chiều dài toàn bộ dầm (L).

$$C = A \times \frac{L_{crack}}{L} + B \times \frac{L_{o,crack}}{L} \quad (9)$$

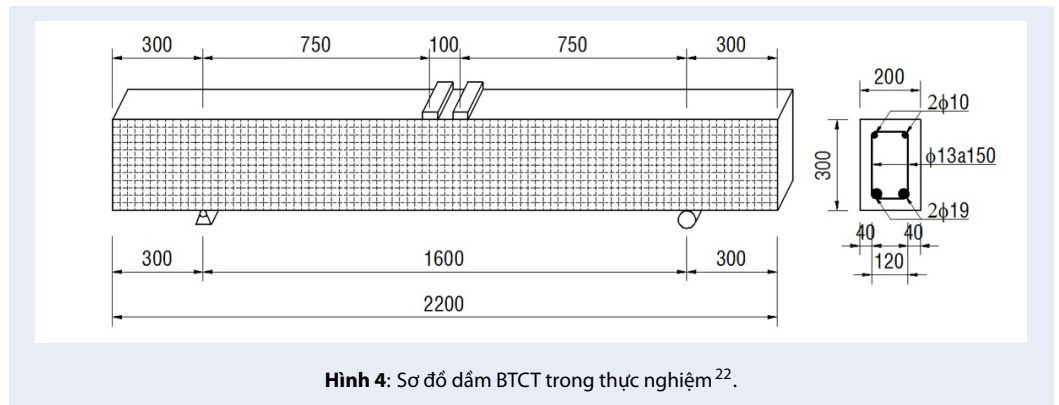
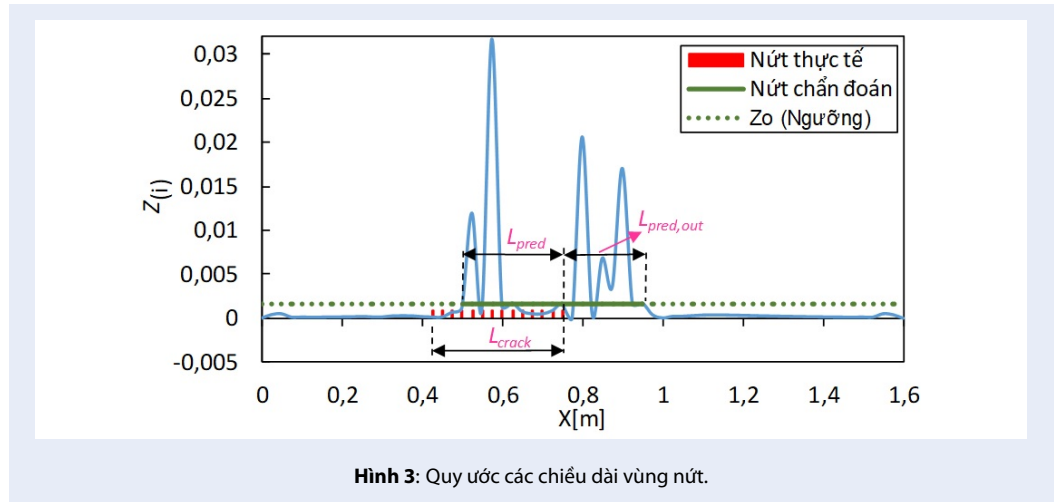
Theo bộ chỉ số này, ở những cấp tải nhỏ, vùng nứt có phạm vi nhỏ (tỉ số L_{crack}/L nhỏ hơn nhiều so với tỉ số $L_{o,crack}/L$), độ chính xác tổng thể C phụ thuộc chủ yếu vào độ chính xác vùng không nứt B. Ngược lại, khi cấp tải lớn, vùng nứt mở rộng (tỉ số L_{crack}/L lớn) thì độ chính xác vùng nứt A sẽ mang tính quyết định đến độ chính xác tổng thể C. Như vậy, độ chính xác tổng thể C sẽ đánh giá được độ tin cậy của phương

pháp chẩn đoán tổng thể cho toàn bộ chiều dài dầm với bất kỳ cấp tải nào.

MÔ PHỎNG SỐ DẦM BTCT

Dầm thí nghiệm là một dầm BTCT đơn giản có kích thước $200 \times 300 \times 2200$ mm, khoảng cách hai gối tựa là 1600 mm. Đặt tải trọng tác dụng lên dầm là hai lực tập trung với khoảng cách tới gối 750 mm, thép lớp dưới $2\phi 19$, thép lớp trên $2\phi 10$, thép đai $\phi 13$ a150. Chi tiết về kích thước, điều kiện biên, vị trí gia tải, cốt thép trong dầm được thể hiện trên Hình 4. Trong thí nghiệm²², dầm được gia tải từ không cho đến khi bị phá hoại. Các thông số về vật liệu của dầm được liệt kê chi tiết trong Bảng 1.

Trong nghiên cứu này, phần mềm ANSYS APDL được sử dụng để mô phỏng dầm BTCT và kết quả phân



Bảng 1: Đặc trưng vật liệu của dầm BTCT^{22,23}

Đặc trưng	Bê tông	Cốt thép $\phi 10$	Cốt thép $\phi 13$	Cốt thép $\phi 19$
Mô đun đàn hồi (N/m^2)	$28,4 \times 10^9$	210×10^9	210×10^9	210×10^9
Khối lượng riêng (kg/m^3)	2500	7850	7850	7850
Hệ số Poisson	0,2	0,3	0,3	0,3
Cường độ chịu nén (MPa)	35,81	-	-	-
Cường độ chịu kéo (MPa)	2,81	-	-	-
Giới hạn chảy (MPa)*	-	367	371	403
Biến dạng cực hạn ϵ_{cu}	0,00214	-	-	-

*Giới hạn chảy của cốt thép trong dầm được cập nhật theo tài liệu.

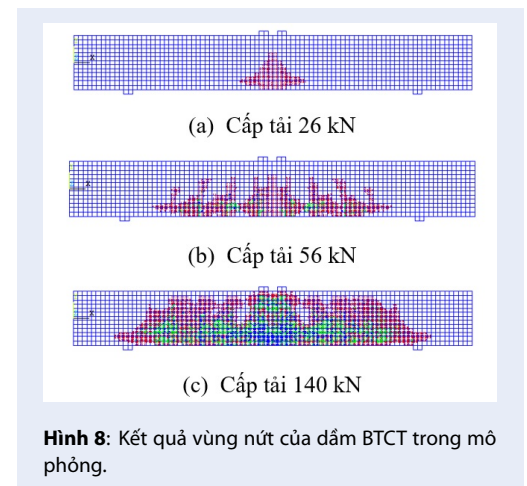
thích được so sánh với kết quả thí nghiệm để làm rõ mức độ chính xác của ứng xử dầm được dự đoán bởi phân tích số. Hình 5 thể hiện mô hình dầm trong ANSYS. Vật liệu bê tông được mô hình bằng phần tử khối đặc 8 nút, SOLID65, có khả năng bị nén vỡ. Phần tử BEAM188 được lựa chọn để mô hình hóa vật liệu cốt thép dọc và cốt đai. Phần tử SOLID185 được sử dụng để mô hình hóa vật liệu thép tấm tại vị trí đặt tải trọng. Phân tích kết cấu BTCT trong ANSYS là phân tích phi tuyến đàn dẻo. Mô hình vật liệu đề xuất bởi Kent-Park²⁴ được sử dụng để mô hình ứng xử của vật liệu bê tông cho cả phần kéo và phần nén. Trong đó, đường cong ứng suất – biến dạng của phía nén được thể hiện ở Hình 6(a). Mô hình ứng xử kéo của vật liệu bê tông được giả sử là tuyến tính với cường độ chịu kéo $f_t = 2,81$ MPa. Bên cạnh đó, 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, Hình 6(b). Mô hình William và Warnke²⁵ được sử dụng để tiên đoán phá hoại của vật liệu bê tông, trong đó có xét đến cả hai kiểu phá hoại do nứt và nén vỡ. Tải trọng tập trung được mô phỏng bằng 2 tải phân bố đều trên diện tích vùng gia tải kích thước 200×50 mm, trọng tâm vùng gia tải cách đầu dầm bên trái một khoảng 1050 mm (Hình 5). Dầm được chia lưới phần tử đơn vị là 25 mm. Các phần tử bê tông, cốt thép và bản thép gia cường đặt tải trọng được liên kết với nhau tại các nút nhằm đảm bảo cho giả thiết liên kết hoàn toàn giữa bê tông và cốt thép, giữa bản thép gia cường với bê tông.

Từ mô hình phần tử hữu hạn, kết quả tải trọng và chuyển vị tương ứng của dầm được phân tích. Như thể hiện trên Hình 7, đường quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị đứng tại giữa nhịp thu được từ mô phỏng rất phù hợp với kết quả thực nghiệm của dầm SN-1²². Thêm vào đó, kết quả mô phỏng từ ANSYS cho thấy sự phá hủy của dầm BTCT xảy ra khi tải trọng tác dụng lên dầm đạt 148,5 kN và giá trị chuyển vị tương ứng đạt 18,1 mm. Trong thí nghiệm²², tải trọng lớn nhất tác dụng lên dầm đạt 153 kN và giá trị chuyển vị tương ứng đạt 17 mm, với độ chênh lệch của tải trọng và chuyển vị lần lượt là 2,9% và 6% (Bảng 2). Từ hình dạng biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị, kết quả so sánh tải trọng cực hạn và chuyển vị tương ứng cho thấy mô hình mô phỏng phù hợp với kết quả thí nghiệm đã được công bố²². Sự sai khác nhỏ là do mô hình vật liệu trong mô hình mô phỏng chưa giống hoàn toàn với thực tế. Từ đó, mô hình mô phỏng dầm BTCT trong nghiên cứu này cho kết quả đáng tin cậy và có thể sử dụng cho các bước chẩn đoán tiếp theo.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN: CHẨN ĐOÁN CHIỀU DÀI VÙNG NỨT CỦA DẦM BTCT

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

Kết quả phân tích mô hình PTHH dầm BTCT cho thấy rằng vết nứt do uốn có dạng hướng lên so với trục dầm xuất hiện đầu tiên ở vị trí giữa nhịp ở cấp tải 26 kN (Hình 8(a)). Khi cấp tải gia tăng, vùng nứt do uốn của dầm phát triển và có xu hướng mở rộng về hai phía gối tựa từ đó xuất hiện các vết nứt do uốn và do cắt có dạng xiên góc so với trục của dầm (Hình 8(b)). Cuối cùng, dầm bị phá hoại ở cấp tải 148,5 kN. Vị trí và phạm vi vùng nứt trong mô hình ANSYS sẽ được dùng để so sánh với vùng nứt thu được từ phương pháp chẩn đoán. Từ đó, độ chính xác của phương pháp chẩn đoán được đánh giá. Kết quả vùng nứt mô phỏng với các cấp tải khác nhau của dầm BTCT được thể hiện ở Hình 8.



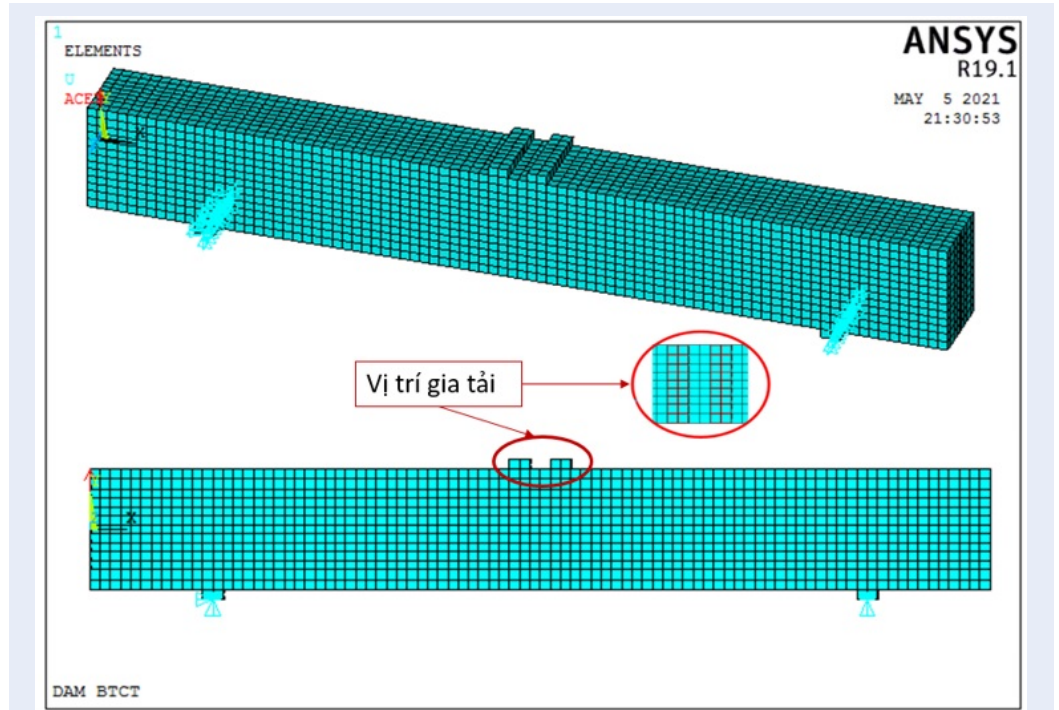
Hình 8: Kết quả vùng nứt của dầm BTCT trong mô phỏng.

Phương pháp xác định vị trí vùng nứt của dầm BTCT

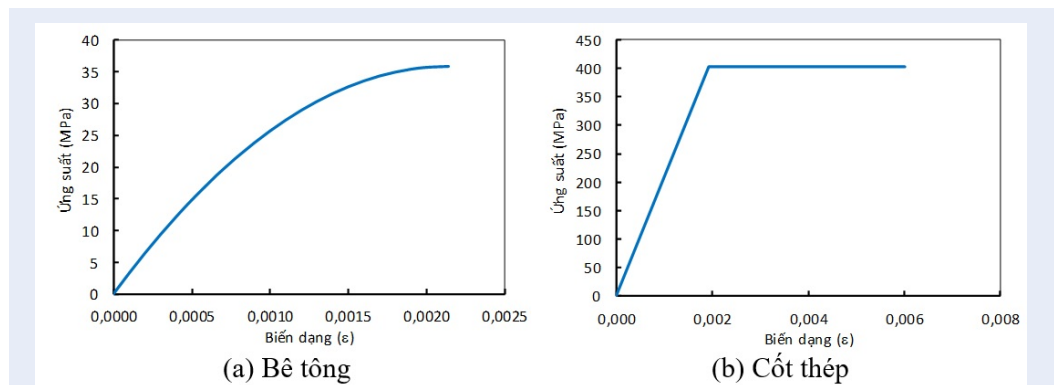
Trong nghiên cứu này, vùng nứt thu được từ kết quả phân tích bằng phần mềm ANSYS được giả định là vùng nứt thực tế. Vùng nứt thực tế được xác định như sau:

Bên cạnh đó, vùng nứt chẩn đoán từ phương pháp độ cong đường biến dạng được xác định như sau:

- Độ cong của dầm tại các vị trí khảo sát được tính toán dựa vào dữ liệu đường biến dạng tương ứng với từng cấp tải thu được từ mô hình PTHH của dầm BTCT.



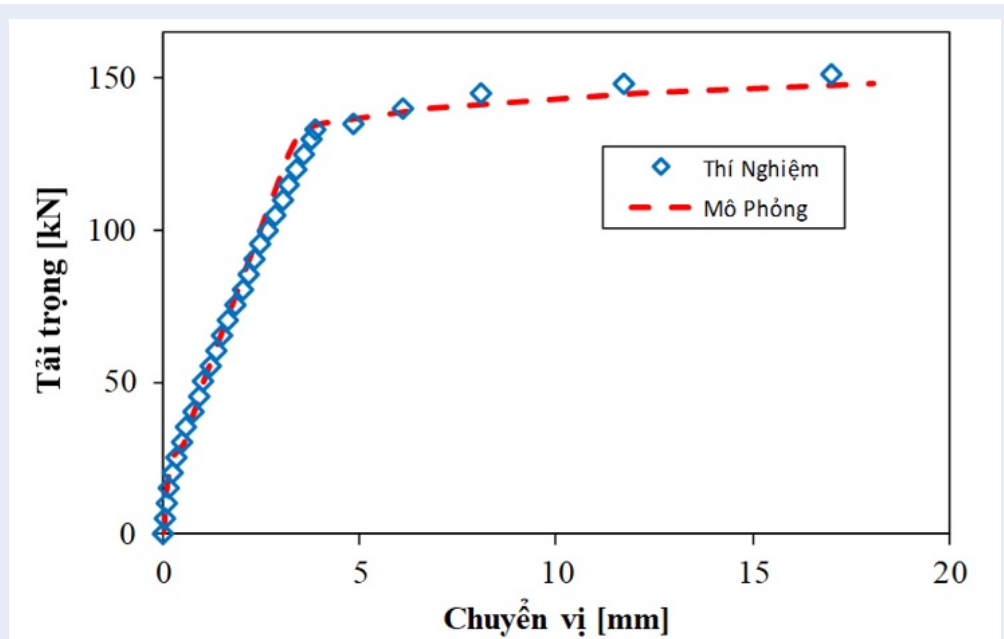
Hình 5: Mô hình đầm BTCT trong phần mềm ANSYS APDL.



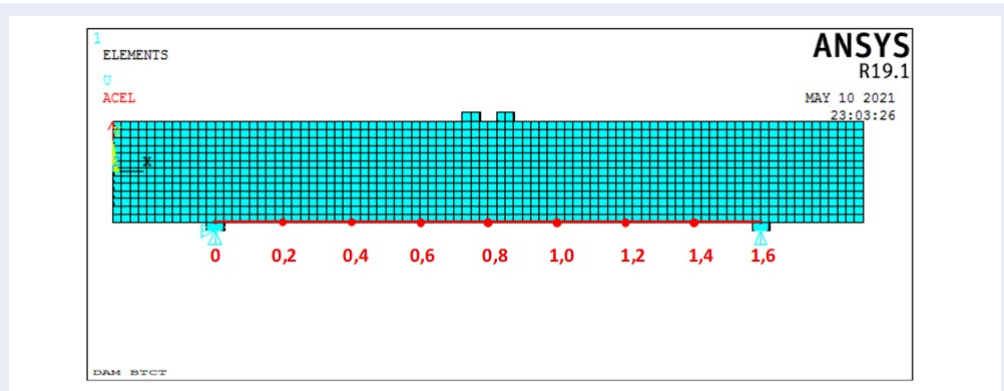
Hình 6: Đường cong ứng suất – biến dạng của vật liệu.

Bảng 2: So sánh kết quả tải trọng cực hạn và chuyển vị tương ứng giữa mô phỏng và thực nghiệm cho đầm BTCT

Thông số	Thực nghiệm	Mô phỏng số	Độ chênh lệch
Tải trọng cực hạn	153 kN	148,5 kN	2,9%
Chuyển vị tương ứng	17 mm	18,1 mm	6%



Hình 7: Biểu đồ quan hệ tải trọng – chuyển vị của dầm BTCT.



Hình 9: Phân chia phần tử đơn vị và cách xác định vùng nứt theo vùng nứt đơn vị trong ANSYS.

- Chỉ số hiệu số độ cong đường biến dạng được tính toán dựa trên giá trị độ cong của dầm ở hai trạng thái khác nhau.
- Vẽ đường cong thể hiện mối quan hệ giữa độ khác biệt và vị trí phần tử, những điểm mà đường cong có sự thay đổi lớn là vị trí hay vùng nứt của dầm.

Kết quả chẩn đoán chiều dài vùng nứt của dầm BTCT bằng chỉ số hiệu số độ cong đường biến dạng

Hình 10 thể hiện đường biến dạng và đường độ cong được suy ra từ đường biến dạng của dầm ứng với trạng

thái ban đầu và cấp tải 26 kN, 36 kN, và 46 kN. Hình 11 thể hiện biểu đồ chẩn đoán chiều dài vùng nứt theo chỉ số hiệu số độ cong đường biến dạng lần lượt ứng với các cấp tải 25 kN (tải trọng chưa gây nứt), 26 kN (tải trọng gây nứt), 36 kN, và 46 kN. Ở các biểu đồ chẩn đoán, chỉ số hiệu số độ cong lớn dần, tăng cao ở vùng nứt và mở rộng dần theo từng cấp tải. Để chẩn đoán vị trí, phạm vi của vùng nứt, ngưỡng $Z_0 = 5\%Z_{max}$ được đề xuất áp dụng. Trong thực tế, dữ liệu đường biến dạng ứng với cấp tải gây nứt có thể khó xác định. Ở những điều kiện như vậy, nghiên cứu đề xuất sử dụng dữ liệu đường biến dạng ứng với cấp tải bắt đầu gây nứt được tính toán từ các phương pháp giải tích hoặc kết quả mô phỏng từ phần mềm. Bên cạnh

đó, kết quả đánh giá độ chính xác của phương pháp chẩn đoán ứng với các cấp tải khảo sát trong nghiên cứu này được tổng hợp ở Bảng 3.

Từ kết quả thống kê ở Bảng 3 cho thấy ở giai đoạn I, cấp tải tăng từ 0 đến 25 kN, lúc này dầm chưa xuất hiện vùng nứt chỉ số hiệu số độ cong chẩn đoán chính xác trong giai đoạn này. Khi tải trọng tăng, vùng nứt cũng sẽ mở rộng theo, chỉ số chẩn đoán vẫn cho kết quả vùng nứt chẩn đoán mở rộng theo từng cấp gia tải. Ở giai đoạn II, cấp tải tăng từ 26 kN đến 136 kN, trong giai đoạn này chỉ số hiệu số độ cong chẩn đoán khá chính xác vị trí vùng nứt, với độ chính xác vùng nứt dao động từ $A_{min} = 78,6\%$ đến $A_{max} = 100\%$, độ chính xác vùng không nứt $B = 100\%$, độ chính xác tổng thể dao động từ $C_{min} = 90,6\%$ đến $C_{max} = 96,9\%$. Giai đoạn III, cấp tải tăng từ 137 kN đến 148,5 kN, trong giai đoạn này dầm đã bị nứt hoàn toàn chỉ số hiệu số độ cong vẫn chẩn đoán chính xác vị trí vùng nứt $A = 100\%$. Thông qua kết quả phân tích độ chính xác dựa trên các bộ chỉ số A, B, C, chỉ số hiệu số độ cong chẩn đoán chiều dài vùng nứt với độ chính xác tổng thể thấp nhất $C_{min} = 90,6\%$ ứng với cấp tải 46 kN và 56 kN. Từ cấp tải 96 kN, dầm BTCT bị nứt hoàn toàn theo chiều dài dầm. Khi đó chiều dài vùng không nứt bằng 0. Do đó, độ chính xác vùng không nứt B không xác định được dẫn đến độ chính xác tổng thể C không xác định được. Tuy nhiên, phương pháp vẫn chẩn đoán chính xác chiều dài vùng nứt với độ chính xác A đạt giá trị thấp nhất $A_{min} = 81,3\%$. Do đó, chỉ số hiệu số độ cong đường biến dạng chẩn đoán tốt vị trí và phạm vi vùng nứt trong dầm BTCT.

KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đề xuất một phương pháp chẩn đoán vị trí và chiều dài vùng nứt trong dầm BTCT dựa trên dữ liệu đầu vào là độ cong của đường biến dạng. Ngưỡng hư hỏng thích hợp và bộ ba chỉ số đánh giá độ chính xác của phương pháp cũng được kiến nghị. Các kết quả thu được từ nghiên cứu như sau:

Việc áp dụng phần mềm ANSYS để mô phỏng cho dầm BTCT, có xem xét sự làm việc đồng thời giữa bê tông và cốt thép, cho kết quả khá chính xác và có độ tin cậy cao. Vì vậy phương pháp mô phỏng số có thể được ứng dụng cho công tác nghiên cứu để tiết kiệm chi phí và thời gian thực hiện, đồng thời có thể mở rộng bài toán phân tích dễ dàng.

Việc sử dụng phương pháp độ cong đường biến dạng chẩn đoán tốt vị trí và chiều dài vùng nứt của dầm BTCT tương ứng với các cấp tải trọng khác nhau. Kết quả chẩn đoán chính xác kể cả khi dầm chưa nứt và dầm xuất hiện nhiều vùng nứt với mức độ khác nhau. Thông qua kết quả phân tích độ chính xác của phương pháp kiến nghị dựa trên các chỉ số đánh giá A, B, C,

phương pháp độ cong đường biến dạng chẩn đoán chiều dài vùng nứt với độ chính xác tổng thể tối thiểu là 90,6%. Điều này mở ra khả năng áp dụng phương pháp này vào thực tiễn trong công tác, kiểm tra chẩn đoán chiều dài vùng nứt của dầm BTCT.

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM và Trường Đại học Công nghệ Tp.HCM đã hỗ trợ thời gian và phương tiện vật chất cho nghiên cứu này.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

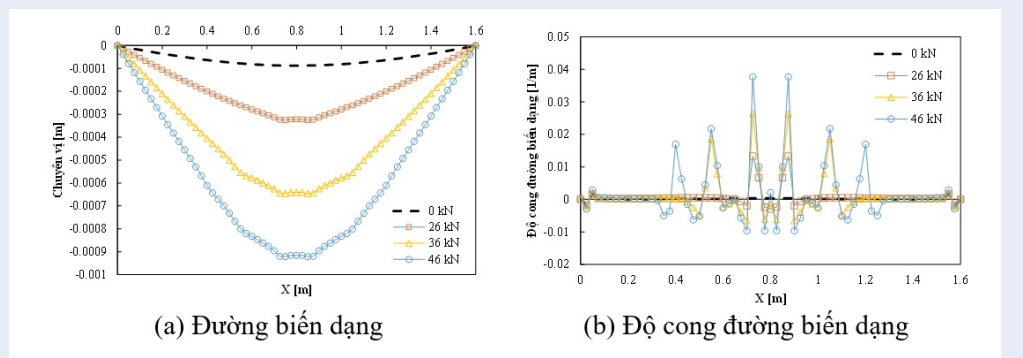
Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo.

ĐÓNG GÓP CỦA CÁC TÁC GIẢ

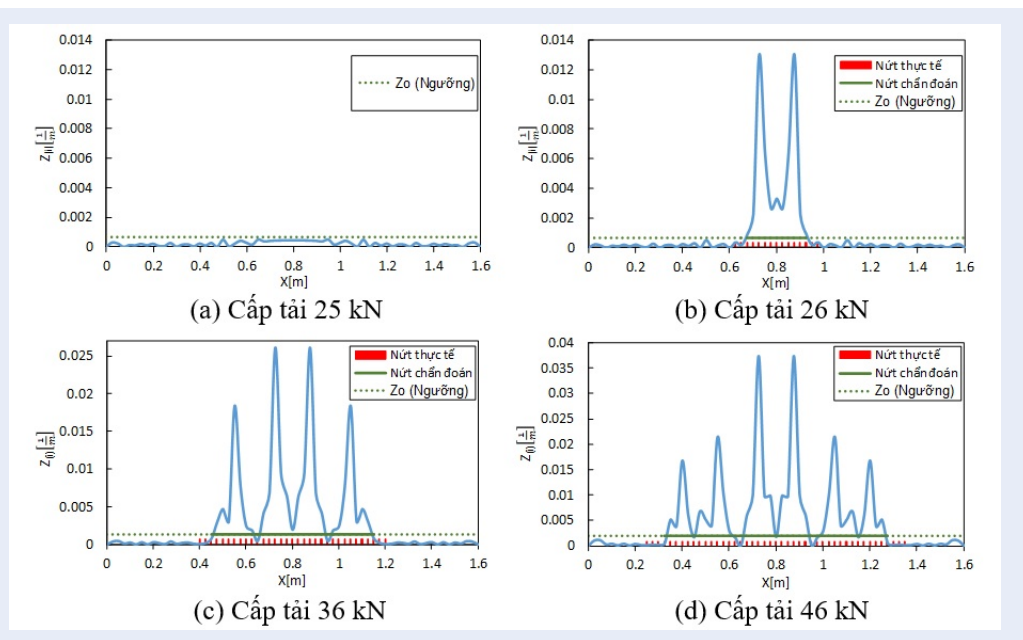
Trần Thanh Duy, Nguyễn Việt Tiến, Đặng Ngọc Thúy Vy, Trương Trần Đệ Nhất đã thực hiện thu thập dữ liệu, mô hình, lập trình tính toán, trình bày kết quả và viết bài báo. Hồ Đức Duy, Hà Minh Tuấn đã đề xuất ý tưởng nghiên cứu, kiểm tra và chỉnh sửa bản thảo bài báo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Rytter A. Vibrational based inspection of civil engineering structures. *Fract Dyn*. 1993;44:(R9314);
- Hassiotis S, Jeong GD. Identification of stiffness reductions using natural frequencies. *J Eng Mech*. 1995;121(10):1106-13. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:10(1106); Available from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1995\)121:10\(1106\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:10(1106)).
- Xia Y, Hao H, Brownjohn JMW, Xia PQ. Damage identification of structures with uncertain frequency and mode shape data. *Earthquake Engng Struct Dyn*. 2002;31(5):1053-66; Available from: <https://doi.org/10.1002/eqe.137>.
- Shi ZY, Law SS, Zhang LM. Damage localization by directly using incomplete mode shapes. *J Eng Mech*. 2000;126(6):656-60; Available from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:6\(656\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:6(656)).
- Kao CY, Chen XZ, Jan JC, Hung SL. Locating damage to structures using incomplete measurements. *J Civ Struct Health Monit*. 2016;6(5):817-38; Available from: <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0202-7>.
- Pandey AK, Biswas M, Samman MM. Damage detection from changes in curvature mode shapes. *J Sound Vib*. 1991;145(2):321-32; Available from: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90595-B](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90595-B).
- Zhong H, Yang M. Damage detection for plate-like structures using generalized curvature mode shape method. *J Civ Struct Health Monit*. 2016;6(1):141-52; Available from: <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0148-1>.
- Stubbs N, Kim JT, Farrar CR. Field verification of a non-destructive damage localization and sensitivity estimator algorithm. In: *Proceedings of the IMAC XIII*; 1995. p. 210-8;.
- Kim JT, Park JH, Hong DS, Park WS. Hybrid health monitoring of prestressed concrete girder bridges by sequential vibration-impedance approaches. *Eng Struct*. 2010;32(1):115-28; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.08.021>.
- Sanayei M, Onipede O. Damage assessment of structures using static test data. *AIAA J*. 1991;29(7):1174-9; Available from: <https://doi.org/10.2514/3.10720>.



Hình 10: Biểu đồ minh họa đường biến dạng và đường độ cong.



Hình 11: Biểu đồ chẩn đoán phạm vi vùng nứt theo chỉ số hiệu số độ cong.

- Banan MR, Banan MR, Hjelmstad KD. Parameter estimation of structures from static response. I. Computational Aspects. *J Struct Eng.* 1994;120(11):3243-58; Available from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:11\(3243\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:11(3243)).
- Wang X, Hu N, Fukunaga H, Yao ZH. Structural damage identification using static test data and changes in frequencies. *Eng Struct.* 2001;23(6):610-21; Available from: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00086-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00086-9).
- Chen XZ, Zhu HP, Chen CY. Structural damage identification using test static data based on grey system theory. *J Zhejiang Univ (Sci Ed).* 2005;6A(8):790-6; Available from: <https://doi.org/10.1631/jzus.2005.A0790>.
- Abdo MAB. Parametric study of using only static response in structural damage detection. *Eng Struct.* 2012;34:124-31; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.09.027>.
- Yazdanpanah O, Seyedpoor S. A crack localization method for beams via an efficient static data based indicator. *Comp Methods Civ Eng.* 2013;4(1):43-63;.
- Ha TM, Fukada S. Nondestructive damage detection in deteriorated girders using changes in nodal displacement. *J Civ Struct Health Monit.* 2017;7(3):385-403; Available from: <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0231-x>.
- Ono R, Ha TM, Fukada S. Analytical study on damage detection method using displacement influence lines of road bridge slab. *J Civ Struct Health Monit.* 2019;9(4):565-77; Available from: <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00352-9>.
- Maki Y, Ha TM, Fukada S, Torii K, Ono R. Stiffness evaluation and current status of a degraded road bridge slab located in a mountainous area. *J Adv Concr Technol.* 2019;17(1):62-78; Available from: <https://doi.org/10.3151/jact.17.62>.
- Won J, Park JW, Park K, Yoon H, Moon DS. Non-target structural displacement measurement using reference frame-based deepflow. *Sensors (Basel).* 2019;19(13):1-24; PMID: 31284647. Available from: <https://doi.org/10.3390/s19132992>.
- Zhang Y, Liu P, Zhao X. Structural displacement monitoring based on mask regions with convolutional neural network. *Constr Build Mater.* 2021;267:120923; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120923>.
- Lê TC, Lê QH, Nguyễn MTA, Nguyễn TC, Hồ, D.D. 2018. Phát

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

Tải trọng	A (%)	B (%)	C (%)
25 kN	Chưa xuất hiện vết nứt		
26 kN (Tải trọng bắt đầu gây nứt)	78,6	100	95,3
36 kN	87,5	100	93,8
46 kN	86,4	100	90,6
56 kN	88,5	100	90,6
66 kN	92,9	100	93,8
76 kN	96,7	100	96,6
86 kN	93,5	100	93,8
96 kN	93,8	-	-
106 kN	96,9	-	-
116 kN	100	-	-
126 kN	100	-	-
136 kN	93,8	-	-
140 kN	81,3	-	-

- triển phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán hư hỏng cho kết cấu dầm với các điều kiện biên khác nhau. Tạp chí Xây dựng Việt Nam;9:341-7;.
22. Trung TLH, Hiroshi M, Kubo Y, Hiroshi Y. Flexural behavior of RC beams strengthened with FRP bars by near-surface mounted method. *Int J Struct Civ Eng Res.* 2019;8(4):372-83; Available from: <https://doi.org/10.18178/ijscer.8.4.372-383>.
 23. Ōshita K. Study on load bearing properties of RC beams reinforced with carbon fiber reinforcement [dissertation]. Kanazawa University (in Japanese); 2017.
 24. Tjitradi D, Eliatun E, Taufik S. 3D ANSYS numerical modeling of reinforced concrete beam behavior under different collapsed mechanisms. *Int J Mech Appl.* 2017;7(1):14-23;.
 25. ANSYS. Documentation for release. ANSYS, Inc; 2019. p. 19.1;.

Crack detection in reinforced concrete beams under loading using deformed shape curvature method

Tuan Minh Ha¹, Thanh Duy Tran^{2,3,4}, Viet Tien Nguyen^{2,3,5}, Ngoc Thuy Vy Dang^{2,3}, Tran De Nhat Truong^{2,3}, Duc Duy Ho^{2,3,*}



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

ABSTRACT

Structural health monitoring (SHM) helps to detect anomalies on the structure early, thereby creating favorable conditions for repairing or replacing damaged components in a timely manner, estimating the remaining life of the building, and limiting any potential consequences to a minimum. Nowadays, science and technology in the field of civil engineering have advanced significantly. The development of effective and reliable methods for damage detection has been a remarkable research topic for many years. This study presents a method of detecting the position and width of crack zones for reinforced concrete (RC) beams using the curvature of the deformed shape as input data. A 4-point bending test of an RC beam is simulated using ANSYS APDL software. The simulation results are verified by comparing with experimental results to verify the numerical simulation's reliability. The change in the deformed shape curvature in the RC beam is analyzed with different loading levels. Then, a set of damage identification indices based on the difference in the deformed shape curvature is proposed to evaluate the method's accuracy. The results show that the deformed shape curvature method has high accuracy in identifying the location and the width of the crack zones in the RC beam under loading.

Key words: damage detection, deformed shaped curvature, reinforced concrete beam, nonlinear analysis, crack zone

¹Faculty of Civil Engineering, HUTECH University, 475A Dien Bien Phu Street, Binh Thanh District, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), 268 Ly Thuong Kiet Street, District 10, Ho Chi Minh City, Vietnam

³Vietnam National University Ho Chi Minh City, Thu Duc City, Ho Chi Minh City, Vietnam

⁴T.Y.Lin International Vietnam CO., LTD, 60A Hoang Van Thu Street, Phu Nhuan District, Ho Chi Minh City, Vietnam

⁵Power Engineering Consulting Joint Stock Company 4, 11 Hoang Hoa Tham Street, Nha Trang City, Khanh Hoa Province, Vietnam

Correspondence

Duc Duy Ho, Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), 268 Ly Thuong Kiet Street, District 10, Ho Chi Minh City, Vietnam

Vietnam National University Ho Chi Minh City, Thu Duc City, Ho Chi Minh City, Vietnam

Email: hoducduy@hcmut.edu.vn

Cite this article : Ha T M, Tran T D, Nguyen V T, Dang N T V, Truong T D N, Ho D D. **Crack detection in reinforced concrete beams under loading using deformed shape curvature method.** *Sci. Tech. Dev. J. – Engineering and Technology*; 2023, 6(1):1786-1797.