

Xác định vị trí hư hỏng trong dầm bê tông cốt thép có gia cường tấm FRP sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng

Trần Mạnh Hùng^{1,2}, Phạm Minh Nhân^{1,2}, Nguyễn Hữu Phương^{1,2}, Trương Trần Đệ Nhất^{1,2}, Nguyễn Chí Thiện^{1,2}, Hà Minh Tuấn³, Hồ Đức Duy^{1,2,*}



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

¹Khoa 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

²Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Khoa Xây dựng, Trường Đại học Công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh, 475A Điện Biên Phủ, quận Bình Thạnh, TP. Hồ Chí Minh, 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

Lịch sử

- Ngày nhận: 30-3-2022
- Ngày chấp nhận: 25-5-2022
- Ngày đăng: 30-6-2022

DOI : 10.32508/stdjet.v5i2.972



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.



TÓM TẮT

Công trình xây dựng chịu tác động bởi nhiều yếu tố khác nhau từ môi trường, tải trọng, sự lão hóa của vật liệu, ... Tất cả các yếu tố này là những biến số không chắc chắn và gây ảnh hưởng đến sức khỏe của công trình. Vì vậy, việc theo dõi và chẩn đoán sức khỏe kết cấu là rất cần thiết nhằm phát hiện ra hư hỏng và có biện pháp sửa chữa kịp thời. Trong bài báo này, vị trí hư hỏng trong kết cấu dầm bê tông cốt thép (BTCT) có gia cường tấm FRP (Fiber Reinforced Polymer) được xác định thông qua phương pháp năng lượng biến dạng. Đầu tiên, một dầm BTCT có gia cường tấm FRP được mô phỏng trong phần mềm ANSYS APDL để phân tích ứng xử và thu thập dữ liệu các đặc trưng dao động. Độ tin cậy của mô hình được kiểm chứng thông qua việc so sánh quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị với kết quả thực nghiệm. Tiếp đến, phương pháp năng lượng biến dạng được sử dụng để chẩn đoán vị trí hư hỏng (vùng nứt và tách lớp FRP) trong dầm. Trong đó, một bộ chỉ số đánh giá độ chính xác của kết quả chẩn đoán được kiến nghị. Tính khả thi của phương pháp được minh chứng thông qua hai bài toán khảo sát. Đối với bài toán 1, năm kích bản hư hỏng khác nhau, bao gồm giảm độ cứng bê tông và tách lớp FRP, được giả định để đánh giá tính khả thi của phương pháp năng lượng biến dạng trong việc chẩn đoán hư hỏng trong dầm. Đối với bài toán 2, hư hỏng xảy ra trong dầm được khảo sát và chẩn đoán theo từng cấp tải trọng tương ứng với sự làm việc thực tế của dầm. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng phương pháp năng lượng biến dạng có độ chính xác cao trong việc phát hiện và xác định vị trí hư hỏng trong dầm BTCT có gia cường tấm FRP.

Từ khoá: chẩn đoán hư hỏng, dao động, dầm bê tông cốt thép gia cường tấm FRP, năng lượng biến dạng

GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, một số công trình bê tông cốt thép (BTCT) như nhà, cầu và đường hầm bị hư hỏng dẫn đến giảm khả năng chịu lực và cần phải gia cường. Trong các phương pháp gia cường cho kết cấu BTCT thì phương pháp sử dụng tấm FRP được sử dụng ngày càng phổ biến. Phương pháp này giúp cho kết cấu tăng khả năng chịu lực nhưng vẫn đảm bảo về kiến trúc. Tuy nhiên, hiện tượng bê tông bị nứt và tấm FRP bị tách lớp ra khỏi dầm BTCT thường xảy ra ở các cấu kiện được gia cường theo phương pháp này. Ban đầu, hư hỏng xảy ra ở phạm vi nhỏ và khó có thể phát hiện bằng mắt thường. Nếu những hư hỏng nhỏ này không được phát hiện và xử lý kịp thời thì hư hỏng sẽ phát triển và gây phá hoại cho kết cấu. Do đó, việc giám sát và phát hiện hư hỏng bằng các phương pháp không phá hủy được chú trọng và cần thiết.

Trong thập kỷ gần đây, một số nghiên cứu về chẩn đoán hư hỏng cấu kiện có gia cường FRP đã được thực hiện. Voutetaki và cộng sự (2012) đã sử dụng vật liệu áp điện Lead Zirconate Titanate (PZT) để chẩn đoán

hư hỏng dầm BTCT có gia cường tấm FRP và sử dụng mức điện áp tối ưu loại bỏ ứng suất tập trung tại vùng tách lớp FRP¹. Li và cộng sự (2017) đã nghiên cứu sự tách lớp khi sử dụng vật liệu FRP thay thế cho cốt thép trong kết cấu BTCT. Nghiên cứu đã sử dụng trở kháng cơ điện trong phương pháp theo dõi sức khỏe kết cấu để phát hiện ra hư hỏng và cho thấy hiệu quả cao². Jiang và cộng sự (2019) đã trình bày phương pháp cảm biến chủ động dựa trên sóng ứng suất để phát hiện nứt trong dầm BTCT gia cường thanh FRP. Từ đó nhận thấy việc tăng diện tích tiếp xúc giữa thanh FRP và bê tông có thể cải thiện hiệu quả tải trọng nứt của dầm bê tông cốt thép FRP, giảm tốc độ nứt và chiều sâu vết nứt³. Liu và cộng sự (2019) đã nghiên cứu sự tách lớp Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) ra khỏi dầm BTCT sử dụng PZT. Để có thể giám sát quá trình tách lớp, 10 PZT được gắn lên dầm để thu nhận tín hiệu. Tại vị trí tách lớp thời gian và đường truyền tín hiệu sẽ lớn hơn những vị trí không tách lớp. Kết quả thu được cho thấy tính hiệu quả trong việc giám sát hiện tượng tách lớp bằng PZT⁴. Ng và cộng sự (2019)

Trích dẫn bài báo này: Hùng T M, Nhân P M, Phương N H, Nhất T T D, Thiện N C, Tuấn H M, Duy H Đ. **Xác định vị trí hư hỏng trong dầm bê tông cốt thép có gia cường tấm FRP sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng.** *Sci. Tech. Dev. J. - Eng. Tech.*; 5(2):1508-1519.

đã nghiên cứu thực hiện việc tạo sóng Rayleigh trên bề mặt bê tông có gia cường CFRP. Bố trí đầu phát và thu tín hiệu kết hợp với thuật toán tái tạo hình ảnh hư hỏng tách lớp CFRP. Nghiên cứu được đối chiếu với thực nghiệm và cho kết quả đáng tin cậy trong việc sử dụng sóng Rayleigh chẩn đoán hiện tượng tách lớp CFRP. Việc tạo sóng Rayleigh và mô phỏng chỉ mới tiến hành tại vị trí đã tạo tách lớp biết trước nên vẫn chưa có cái nhìn khách quan khi áp dụng khảo sát trên cấu kiện với quy mô lớn⁵. Jiang và cộng sự (2019) đã phát hiện sự kết dính giữa dầm thép và tấm CFRP gia cường bằng cách sử dụng đầu dò và cảm biến dựa trên PZT có thể tháo rời. Điều kiện liên kết ảnh hưởng đáng kể đến tín hiệu nhận được và chỉ số Wavelet Packet Based Energy (WPEI) được sử dụng để định lượng năng lượng nhận được nhằm đánh giá mức độ kết dính giữa thép và tấm CFRP⁶. Trần (2021) đã tiến hành đánh giá các chỉ số cho việc chẩn đoán hư hỏng dầm BTCT gia cường tấm FRP sử dụng đáp ứng trở kháng. Kết quả cho thấy chỉ số Root Mean Square Deviation (RMSD) và Mean Absolute Percentage Deviation (MAPD) cho kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng tốt hơn Correlation Coefficient (CC) và Correlation Coefficient Deviation (CCD)⁷.

Bên cạnh việc sử dụng đáp ứng trở kháng, các nghiên cứu sử dụng các đặc trưng dao động để chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu cũng đã được thực hiện. Cha và Buyukozturb (2015) đã kiến nghị phương pháp chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu khung sử dụng thuật toán tối ưu đa mục tiêu dựa trên sự thay đổi năng lượng biến dạng⁸. Zhao và cộng sự (2020) đã chẩn đoán vị trí hư hỏng trong dầm thép dựa trên sự thay đổi năng lượng biến dạng thông qua chỉ số MSECR và MSED⁹. Liên quan đến dầm BTCT có gia cường tấm CFRP, Baghiee và cộng sự (2009) đã chẩn đoán hư hỏng dựa trên sự thay đổi của tần số dao động, chỉ số MAC (Modal Assurance Criterion), chỉ số CO-MAC (Coordinate Modal Assurance Criterion) và độ cong dạng dao động¹⁰. Kết quả cho thấy rằng các phương pháp nêu trên xác định được sự xuất hiện của hư hỏng và đánh giá được độ cứng tổng thể của dầm sau khi hư hỏng. Zenzen và cộng sự (2018) đã xác định thành công hư hỏng trong dầm CFRP bằng cách sử dụng các đặc trưng dao động và thuật toán di truyền¹¹.

Việc ứng dụng rộng rãi của kết cấu BTCT có gia cường FRP đã dẫn đến sự quan tâm cho nghiên cứu về hư hỏng của cấu kiện này. Tuy nhiên, các nghiên cứu từ trước tới nay chủ yếu tập trung phát hiện tách lớp FRP bằng phương pháp trở kháng và một vài nghiên cứu xác định hư hỏng tổng thể trong dầm BTCT có gia cường FRP dựa vào thay đổi tần số và dạng dao động. Để tiếp cận vấn đề theo một cách khác, nghiên cứu

này kiến nghị sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán hư hỏng trong dầm BTCT có gia cường tấm FRP. Các điểm mới trong nghiên cứu này như sau: (i) chẩn đoán vị trí hai loại hư hỏng, bao gồm bê tông bị nứt và FRP bị tách lớp, bằng phương pháp năng lượng biến dạng; (ii) chẩn đoán hư hỏng trong quá trình gia tải với vị trí hư hỏng không biết trước; (iii) đề xuất bộ ba chỉ số đánh giá độ chính xác của kết quả chẩn đoán. Để thực hiện mục tiêu nghiên cứu, một dầm BTCT có gia cường tấm FRP được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS APDL; trong đó, sự làm việc đồng thời giữa bê tông và cốt thép được xem xét. Dầm được gia tải với các cấp tải trọng khác nhau để cho dầm tự ứng xử và xuất hiện hư hỏng. Biểu đồ tải trọng - chuyển vị từ mô phỏng số được so sánh với kết quả thực nghiệm để kiểm chứng độ tin cậy của mô phỏng. Tiếp theo, các đặc trưng dao động (tần số dao động và dạng dao động) được thu thập để phục vụ cho công tác chẩn đoán vùng nứt và tách lớp FRP trong dầm bằng phương pháp năng lượng biến dạng. Tính khả thi của phương pháp kiến nghị được chứng minh thông qua hai bài toán với các kịch bản hư hỏng khác nhau và được đánh giá thông qua bộ chỉ số đánh giá độ chính xác của phương pháp.

PƯƠNG PHÁP CHẨN ĐOÁN VÀ BỘ CHỈ SỐ ĐÁNH GIÁ

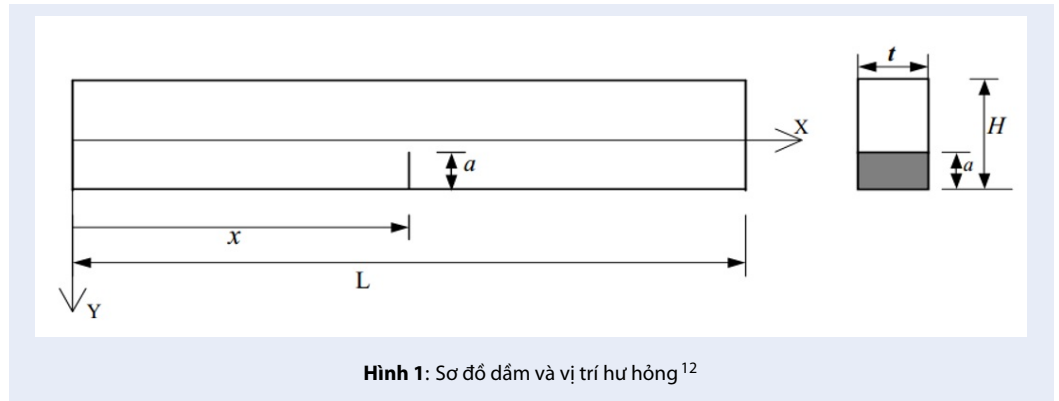
Phương pháp năng lượng biến dạng cho kết cấu dầm

Phương pháp năng lượng biến dạng được xem là một trong những phương pháp có tính hiệu quả cao trong việc chẩn đoán hư hỏng kết cấu. Bởi vì khi hư hỏng xảy ra, giá trị năng lượng biến dạng có độ nhạy cao hơn so với các chỉ tiêu dao động khác như tần số dao động và dạng dao động. Năng lượng biến dạng của phần tử thứ j tương ứng với dạng dao động thứ i được thể hiện như sau:

$$MSE_{ij} = \phi_i^T K_j \phi_i \quad (1)$$

trong đó, ϕ_i là véc tơ dạng dao động thứ i ; K_j là ma trận độ cứng của phần tử thứ j trong hệ tọa độ tổng thể.

Phương pháp chẩn đoán hư hỏng cho kết cấu dầm dựa vào sự thay đổi năng lượng biến dạng của dạng dao động được đề xuất bởi Kim và cộng sự (2003)¹². Phương pháp này sử dụng hai đặc trưng dao động cơ bản của kết cấu là tần số dao động và dạng dao động tương ứng với hai trạng thái khác nhau, để từ đó chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu. Xét sơ đồ dầm có chiều dài L ; vị trí hư hỏng trên dầm có tọa độ x và chiều dài là a (Hình 1).



Hình 1: Sơ đồ dầm và vị trí hư hỏng¹²

Chỉ số hư hỏng do sự suy giảm độ cứng tại vị trí thứ j ($j \in [0, L]$) của dầm, khi sử dụng nm dạng dao động ($i = 1, \dots, nm$) được xác định như sau¹²:

$$B_j = \frac{k_j}{k_j^*} = \frac{\sum_{i=1}^{nm} \gamma_{ij}^*}{\sum_{i=1}^{nm} [\gamma_i \times g_i(\lambda, \phi) + \gamma_{ij}]} \quad (2)$$

trong đó:

β_j là chỉ số hư hỏng tại vị trí thứ j của dầm;

k_j là độ cứng chống uốn tại vị trí thứ j ở trạng thái 1 (chưa xuất hiện hư hỏng);

k_j^* là độ cứng chống uốn tại vị trí thứ j ở trạng thái 2 (có xuất hiện hư hỏng); $\gamma_{ij}, \gamma_{ij}^*, \gamma_i, g_i(\lambda, \phi)$ là các thông số được xác định như sau:

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

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

$$\gamma_i = \int_0^L [\phi_i''(x)]^2 dx \quad (5)$$

$$g_i(\lambda, \phi) = \frac{1}{nm} \times \frac{\omega_i^{*2} - \omega_i^2}{\omega_i^2} \quad (6)$$

trong đó:

$\phi_i(x), \phi_i^*(x)$ là véc tơ dạng dao động thứ i tương ứng với trạng thái 1 và trạng thái 2;

$\phi_i''(x), \phi_i^{*''}(x)$ là véc tơ độ cong dạng dao động thứ i (đạo hàm bậc hai của đường cong dạng dao động thứ i) tương ứng với trạng thái 1 và trạng thái 2;

ω_i, ω_i^* là tần số góc ứng với dạng dao động thứ i trạng thái 1 và trạng thái 2.

Vị trí hư hỏng được xác định thông qua việc chuẩn hóa chỉ số hư hỏng β_j như sau:

$$Z_j = \frac{\beta_j - \mu_{\beta_j}}{\sigma_{\beta_j}} \quad (7)$$

trong đó: Z_j là chỉ số hư hỏng chuẩn hóa cho vị trí thứ j ; $\mu_{\beta_j}, \sigma_{\beta_j}$ là giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của β_j .

Thuật toán thống kê được sử dụng để chẩn đoán vị trí hư hỏng: Chọn một ngưỡng ứng với một mức độ tin cậy cho kết quả chẩn đoán. Nếu $Z_j \geq Z_0$ thì kết cấu bị hư hỏng tại vị trí thứ j . Ngược lại, nếu $Z_j < Z_0$ thì kết cấu chưa bị hư hỏng tại vị trí thứ j . Trong nghiên cứu này, để chẩn đoán vị trí và phạm vi của vùng hư hỏng, ngưỡng $Z_0 = 5\%Z_{max}$ được đề xuất áp dụng, với Z_{max} là giá trị lớn nhất của chỉ số chẩn đoán.

Bộ chỉ số đánh giá độ chính xác

Với mục đích đánh giá một cách toàn diện và phù hợp trong công tác chẩn đoán dầm BTCT có gia cường tấm FRP ngoài thực tế, bộ ba chỉ số đánh giá A, B, C được đề xuất như sau:

A là chỉ số đánh giá độ chính xác của kết quả chẩn đoán vùng hư hỏng. Chỉ số này được tính bằng tỉ số giữa chiều dài vùng hư hỏng chẩn đoán và chiều dài vùng hư hỏng thực tế.

$$A = \frac{L_{pred}}{L_{damage}} \times 100\% \quad (8)$$

trong đó: L_{pred} là chiều dài vùng hư hỏng chẩn đoán nằm trong vùng hư hỏng thực tế; L_{damage} là chiều dài vùng hư hỏng thực tế.

B là chỉ số đánh giá độ chính xác của kết quả chẩn đoán vùng không hư hỏng. Chỉ số này được tính bằng tỉ số giữa chiều dài vùng không hư hỏng chẩn đoán và chiều dài vùng không hư hỏng thực tế.

$$B = \frac{L_{o,pred}}{L_{o,damage}} \times 100\% \quad (9)$$

$$L_{o,pred} = L_{o,damage} - L_{pred,out} \quad (10)$$

$$L_{o,damage} = L - L_{damage} \quad (11)$$

trong đó: $L_{o,pred}$ là chiều dài vùng không hư hỏng chẩn đoán (đã loại bỏ vùng hư hỏng chẩn đoán nằm ngoài phạm vi vùng hư hỏng thực tế); $L_{o,damage}$ là chiều dài vùng không hư hỏng thực tế; $L_{pred,out}$ là chiều dài vùng hư hỏng chẩn đoán nằm ngoài vùng hư hỏng thực tế.

C là chỉ số đánh giá độ chính xác tổng thể của kết quả chẩn đoán. Chỉ số này được xác định dựa trên chỉ số A và chỉ số B nhân tương ứng với tỉ số chiều dài vùng hư hỏng và chiều dài vùng không hư hỏng so với chiều dài dầm.

$$C = A \times \frac{L_{damage}}{L} + B \times \frac{L_{o,damage}}{L} \quad (12)$$

Độ chính xác tổng thể biểu diễn mối quan hệ giữa độ chính xác vùng hư hỏng và vùng không hư hỏng trên toàn bộ chiều dài dầm. Khi vùng hư hỏng nhỏ tương ứng với dầm chịu tải nhỏ thì chỉ số C sẽ phụ thuộc nhiều vào chỉ số B; và ngược lại khi vùng hư hỏng mở rộng tương ứng với dầm chịu tải trọng lớn thì chỉ số C phụ thuộc chỉ số A.

MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN

Một dầm BTCT gia cường tấm FRP được thực hiện thí nghiệm bởi Qeshta và cộng sự (2015)¹³. Dầm có kích thước 150×250×2800 mm, gia cường tấm FRP kích thước 75×0,17×2420 mm dán đối xứng ở mặt dưới của dầm. Khoảng cách giữa hai gối tựa là 2500 mm. Đặt tải trọng tác dụng lên dầm là hai lực tập trung với khoảng cách tới gối tựa là 900 mm. Tiến hành thực hiện gia tải để xác định các trạng thái ứng xử của dầm. Chuyển vị của dầm được xác định qua một chuyển vị kế được đặt theo phương thẳng đứng tại vị trí giữa dầm. Sơ đồ thí nghiệm được thể hiện trên Hình 2. Thông số vật liệu được trình bày trong Bảng 1 và Bảng 2.

Trong nghiên cứu này, dầm BTCT có gia cường tấm FRP trong thí nghiệm¹³ được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS APDL (Hình 3). Vật liệu bê tông được mô hình bằng phần tử khối đặc 8 nút SOLID65. Phần tử LINK180 được lựa chọn để mô hình hóa vật liệu cốt thép dọc và cốt thép đai. Phần tử SOLID185 được sử dụng để mô hình tấm đệm thép, vật liệu FRP và keo Epoxy⁷. Các phần tử được liên kết với nhau tại các nút nhằm đảm bảo cho giả thiết liên kết hoàn toàn giữa các loại vật liệu. Kết quả tải trọng - chuyển vị được thể hiện như Hình 4. Biểu đồ cho thấy sự làm việc của mẫu dầm gia cường FRP giữa mô phỏng và thực nghiệm như sau:

Về tải trọng hình thành vết nứt và sự làm việc của dầm gia cường trước khi hình thành vết nứt: tải trọng gây nứt đối với dầm mô phỏng là 14,181 kN và dầm thí nghiệm là 15 kN, độ chênh lệch là 5,46%. Đồng thời,

đường cong quan hệ tải trọng - chuyển vị gần như trùng nhau giữa mô phỏng và thực nghiệm trong giai đoạn đàn hồi.

Về sự làm việc của dầm sau khi hình thành vết nứt: đối với dầm thí nghiệm, cốt thép chịu kéo bắt đầu bị chảy dẻo khi tải trọng có giá trị 58,4 kN và chênh lệch 3,6% so với giá trị mô phỏng số (60,5 kN). Đường cong quan hệ tải trọng - chuyển vị giữa mô phỏng và thực nghiệm là gần xấp xỉ nhau; giai đoạn sau khi hình thành vết nứt có sự sai khác là do mô hình vật liệu trong mô phỏng số chưa giống hoàn toàn với thực tế, cũng như trong quá trình thí nghiệm còn có các tác động của môi trường và sai số trong quá trình thực hiện thí nghiệm.

Về tải trọng phá hoại dầm: sau khi cốt thép chịu kéo chảy dẻo đường cong quan hệ tải trọng - chuyển vị thay đổi độ dốc lần thứ hai. Điều này được giải thích bằng việc tấm FRP tham gia chịu lực và làm tăng khả năng chịu lực của dầm. Kết quả tải trọng thực nghiệm (77,6 kN) có sự sai lệch nhỏ 4,38% so với mô phỏng (81 kN).

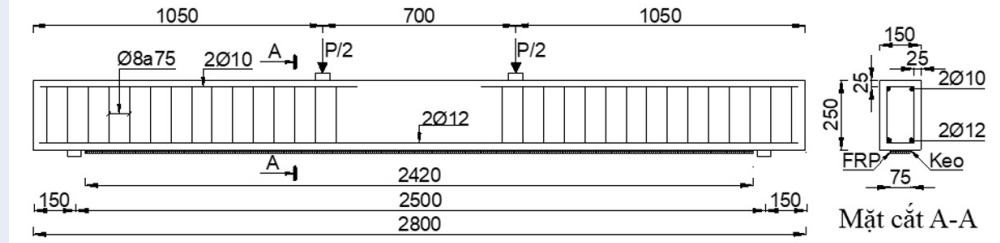
Nghiên cứu này lựa chọn phân tích hai giai đoạn làm việc của kết cấu: giai đoạn từ lúc bắt đầu gia tải đến khi bê tông bắt đầu hình thành vết nứt, giai đoạn từ lúc bê tông bắt đầu nứt đến khi bắt đầu tách lớp FRP khỏi bề mặt dầm. Điều này là phù hợp với ý nghĩa của bài toán chẩn đoán hư hỏng là phát hiện ra hư hỏng ngay từ lúc hư hỏng còn nhỏ trong kết cấu để kịp thời sửa chữa. Hơn nữa, trong hai giai đoạn được lựa chọn để phân tích, kết quả mô phỏng rất phù hợp với thực nghiệm (Hình 4). Như vậy, kết quả mô phỏng số của dầm BTCT có gia cường FRP là đáng tin cậy và có thể được sử dụng cho bài toán chẩn đoán.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bài toán 1

Nhằm kiểm chứng tính khả thi của phương pháp chẩn đoán, dầm BTCT có gia cường tấm FRP được giả định hư hỏng là giảm độ cứng hoặc tách lớp FRP. Trong mô hình ANSYS, việc giảm độ cứng được thực hiện thông qua việc giảm mô đun đàn hồi của bê tông tại vị trí tương ứng; việc tách lớp FRP được thực hiện thông qua xóa lớp keo tại vị trí tách lớp FRP. Sau đó, phương pháp năng lượng biến dạng được áp dụng để chẩn đoán hư hỏng trong dầm. Trong bài toán này, năm kịch bản hư hỏng khác nhau được khảo sát bao gồm hai kịch bản giảm độ cứng và ba kịch bản tách lớp FRP. Thông tin cụ thể của năm trường hợp hư hỏng được thể hiện trong Hình 5.

Bốn dạng dao động uốn đầu tiên được sử dụng cho việc chẩn đoán hư hỏng. Hình 6 thể hiện bốn dạng dao động uốn và tần số dao động tương ứng của dầm



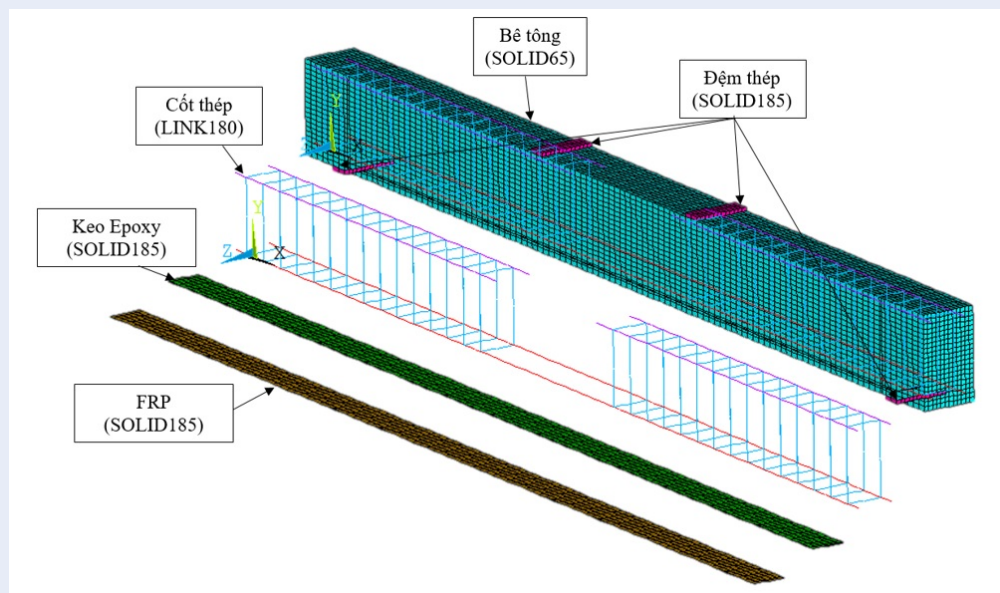
Hình 2: Sơ đồ thí nghiệm¹³

Bảng 1: Thông số vật liệu bê tông và cốt thép¹³

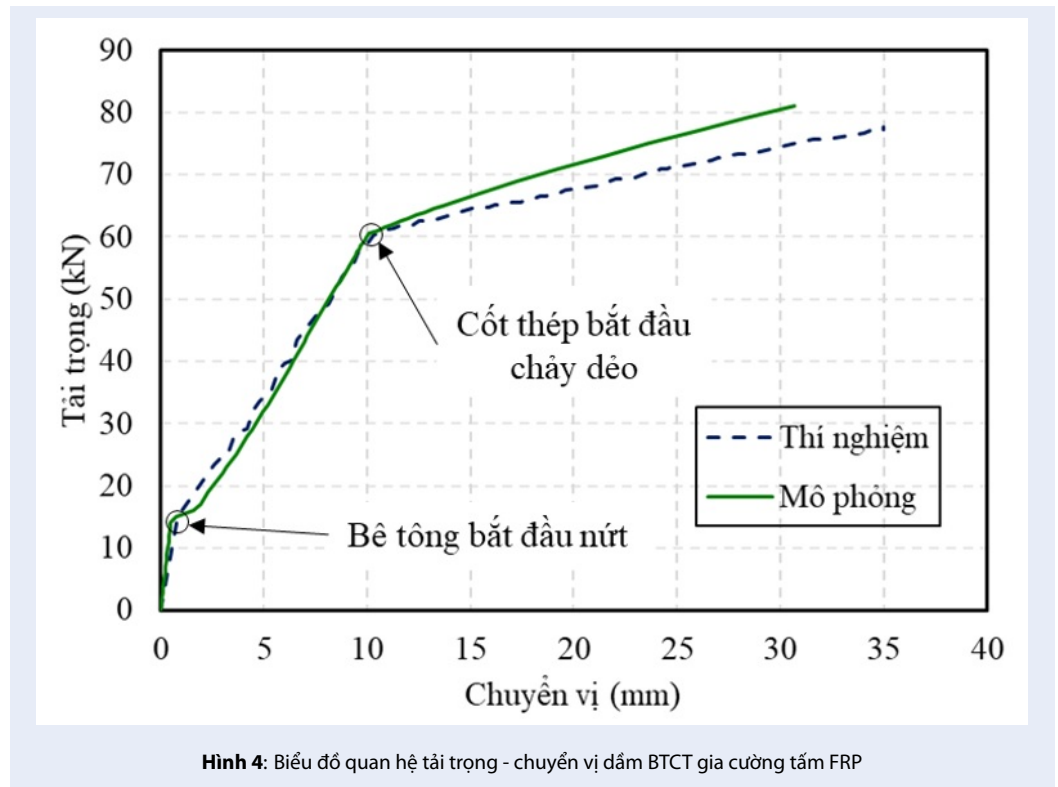
Đặc trưng	Bê tông	Thép $\phi 12$	Thép $\phi 10$	Thép $\phi 8$
Mô đun đàn hồi (GPa)	39	200	200	210
Cường độ chịu nén lằng trụ (MPa)	44,17	-	-	-
Cường độ chịu kéo trực tiếp (MPa)	3,66	-	-	-
Giới hạn chảy (MPa)	-	529	521	317

Bảng 2: Thông số vật liệu FRP và keo Epoxy¹³

Đặc trưng	FRP	Keo Epoxy
Mô đun đàn hồi (GPa)	230	4,5
Cường độ chịu kéo (MPa)	4900	30
Biến dạng giới hạn (Micro-strain)	21000	9000



Hình 3: Mô phỏng số dầm BTCT có gia cường tấm FRP trong ANSYS APDL



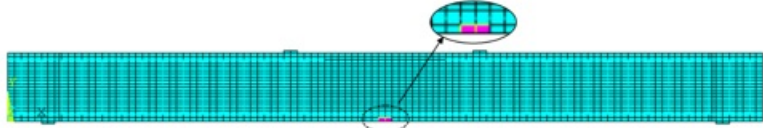
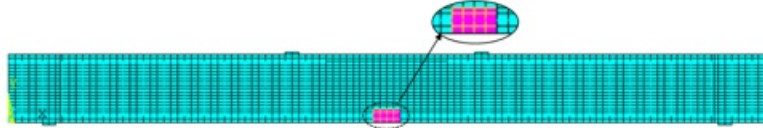



Hình 4: Biểu đồ quan hệ tải trọng - chuyển vị dầm BTCT gia cường tấm FRP

Bảng 3: Tần số dao động của dầm tương ứng với các trường hợp của bài toán 1

Mode	Trường hợp 1 f (Hz)	Trường hợp 2 f (Hz)	Trường hợp 3 f (Hz)	Trường hợp 4 f (Hz)	Trường hợp 5 f (Hz)
1	70,64	70,45	70,68	70,68	70,68
2	224,96	224,96	224,96	224,96	224,96
3	595,59	593,77	595,94	595,94	595,94
4	847,75	847,46	847,77	847,77	847,77

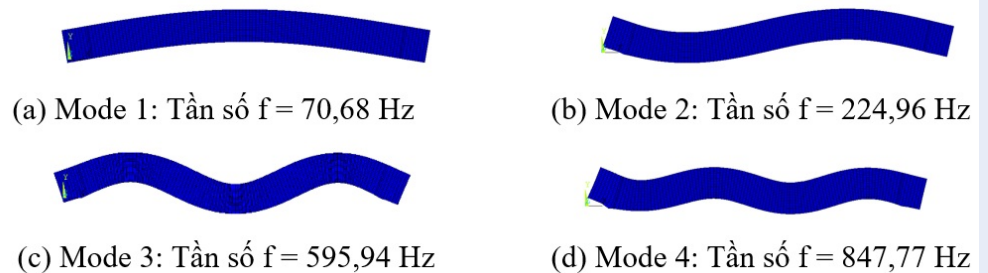
Bảng 4: Chỉ số độ chính xác của kết quả chẩn đoán hư hỏng cho bài toán 1

Trường hợp	Chỉ số đánh giá		
	Độ chính xác vùng hư hỏng A (%)	Độ chính xác vùng không hư hỏng B (%)	Độ chính xác tổng thể C (%)
1	100	99,35	99,37
2	100	98,26	98,32
3	100	98,56	98,58
4	100	95,39	95,47
5	100	95,24	95,41

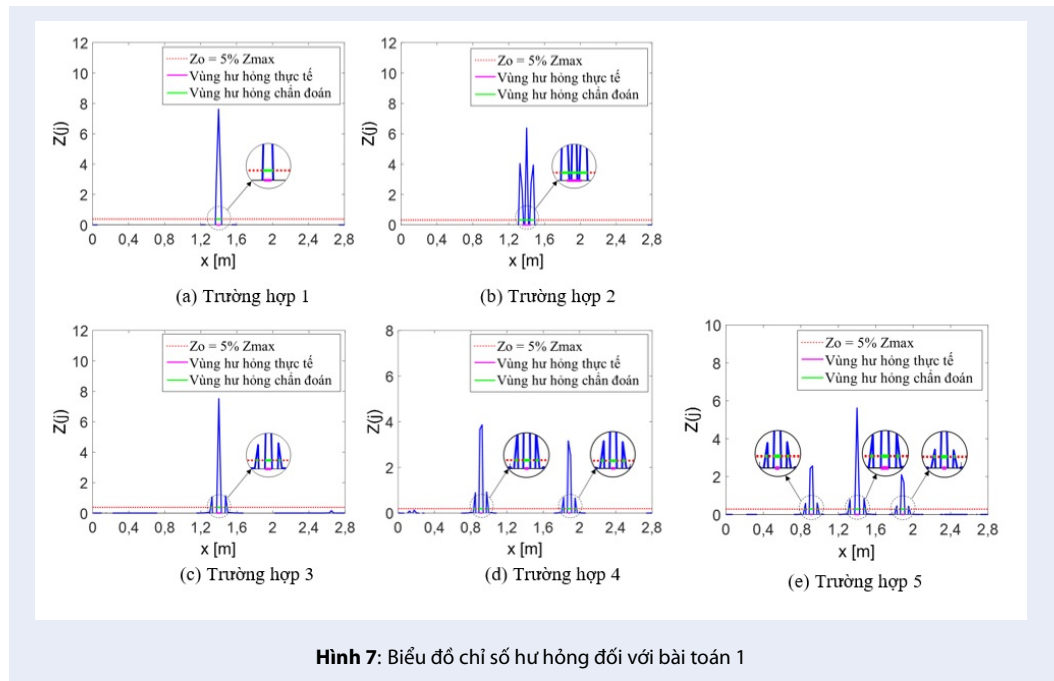
Trường hợp	Hình ảnh và mô tả hư hỏng
1	 <p>Giảm 20% độ cứng của phần tử tại vị trí giữa nhịp với kích thước $50 \times 150 \times 12,5 \text{ mm}^{(1)}$.</p>
2	 <p>Giảm 20% độ cứng của phần tử tại vị trí giữa nhịp với kích thước $100 \times 150 \times 50 \text{ mm}^{(1)}$.</p>
3	 <p>Xóa 1 vị trí lớp keo tại vị trí giữa nhịp với kích thước $50 \times 75 \times 1,7 \text{ mm}^{(1)}$.</p>
4	 <p>Xóa 2 vị trí lớp keo kích thước $25 \times 75 \times 1,7 \text{ mm}^{(1)}$ tại vị trí $[900; 925] \text{ mm}^{(2)}$ và $[1875; 1900] \text{ mm}^{(2)}$.</p>
5	 <p>Xóa 3 vị trí lớp keo bao gồm 2 vị trí kích thước $25 \times 75 \times 1,7 \text{ mm}^{(1)}$ tại vị trí $[900; 925] \text{ mm}^{(2)}$ và $[1875; 1900] \text{ mm}^{(2)}$; và 1 vị trí kích thước $50 \times 75 \times 1,7 \text{ mm}^{(1)}$ tại vị trí $[1375; 1425] \text{ mm}^{(2)}$.</p>

Hình 5: Mô tả các trường hợp hư hỏng được khảo sát cho bài toán 1^a

^aGhi chú: ⁽¹⁾ $a \times b \times c$ với a, b, c lần lượt là chiều dài, chiều rộng và chiều cao phần tử. ⁽²⁾ Tọa độ $[x1; x2]$ với x1 và x2 lần lượt là vị trí bắt đầu và kết thúc hư hỏng so với góc tọa độ tại đầu dầm.



Hình 6: Bốn dạng dao động và tần số của dầm ở trạng thái ban đầu



Hình 7: Biểu đồ chỉ số hư hỏng đối với bài toán 1

cho trạng thái ban đầu. Tần số dao động của tất cả các trường hợp trong bài toán 1 được liệt kê trong Bảng 3. Nhìn chung, các biểu đồ chỉ số hư hỏng được thể hiện trong Hình 7 cho giá trị cực đại tại vị trí hư hỏng. Chỉ số độ chính xác của kết quả chẩn đoán hư hỏng cho bài toán 1 được tổng hợp trong Bảng 4. Đối với vùng hư hỏng, kết quả chẩn đoán đạt độ chính xác tuyệt đối (chỉ số A đạt 100%). Đối với vùng không hư hỏng, kết quả chẩn đoán rất tốt và được đánh giá bởi chỉ số B với giá trị lớn hơn 95%. Chỉ số độ chính xác tổng thể C cho kết quả lớn hơn 98% cho trường hợp hư hỏng giảm độ cứng và lớn hơn 95% cho trường hợp hư hỏng tách lớp FRP. Biểu đồ chỉ số hư hỏng của trường hợp hư hỏng tách lớp FRP có sự xuất hiện nhiều tại vùng lân cận hư hỏng. Tuy nhiên, biểu đồ chỉ số hư hỏng vẫn cho giá trị lớn nhất nằm trong vùng hư hỏng và lớn hơn gấp nhiều lần so với vị trí nhiều. Với ngưỡng $Z_0 = 5\%Z_{max}$, kết quả chẩn đoán hư hỏng đạt độ chính xác cao, từ 95,24% đến 100%.

Bài toán 2

Trong thực tế, hư hỏng trong dầm BTCT có gia cường tấm FRP xảy ra tương ứng với trạng thái làm việc của dầm khi chịu tải trọng. Vì vậy, sau khi khảo sát bài toán 1, chẩn đoán hư hỏng với những giả định biết trước, bài toán 2 thực hiện chẩn đoán hư hỏng trong dầm tương ứng với các cấp tải trọng. Điều này làm tăng tính khách quan về tính hiệu quả của phương pháp chẩn đoán đã được áp dụng thành công ở bài toán 1.

Đối với dầm BTCT có gia cường tấm FRP, bê tông xuất hiện vết nứt khi ứng suất kéo vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông. Lớp keo liên kết FRP và bê tông bị phá hoại khi ứng suất cắt trong lớp keo vượt qua ứng suất tiếp cực đại. Trong nghiên cứu của Lu và cộng sự (2005)¹⁴ đã đưa ra công thức tính ứng suất tiếp cực đại của lớp kết dính như sau:

$$\tau_{max} = \beta_w f_t \quad (13)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{\left(2,25 - \frac{b_f}{b_c}\right)}{\left(1,25 - \frac{b_f}{b_c}\right)}} \quad (14)$$

trong đó: b_f là bề rộng tấm FRP; b_c là bề rộng phần bê tông; f_t là cường độ chịu kéo bê tông. Từ công thức (13) và (14), giá trị ứng suất tiếp cực đại trong lớp keo Epoxy của dầm được tính toán là $\tau_{max} = 3,66MPa$. Trong bài toán 2, ba cấp tải trọng tương ứng với ba trạng thái làm việc khác nhau của dầm được lựa chọn để thực hiện bài toán chẩn đoán (Hình 8). Tại mỗi cấp tải trọng, tần số dao động của dầm được liệt kê trong Bảng 5. Hình 9 thể hiện bốn dạng dao động và tần số dao động tương ứng của dầm tại cấp tải $P = 38,6$ kN. Khi cấp tải tăng, biểu đồ chỉ số hư hỏng trong Hình 10 cũng mở rộng và xuất hiện nhiều điểm cực trị. Điều này phản ánh đúng với thực tế làm việc của dầm, khi tải trọng tăng vùng hư hỏng sẽ lan rộng với nhiều vị trí hư hỏng. Các chỉ số đánh giá độ chính xác cho vùng hư hỏng, vùng không hư hỏng và tổng thể được

tổng hợp trong Bảng 6. Phương pháp chẩn đoán có độ chính xác cao, lớn hơn 91% ở tất cả các trường hợp. Khi cấp tải càng lớn, ứng suất tập trung tại vùng đặt tải làm cho biểu đồ chỉ số hư hỏng đạt giá trị lớn nhất tại những vị trí này; và những vị trí lân cận sẽ có chỉ số hư hỏng nhỏ hơn và nằm dưới ngưỡng hư hỏng đề xuất. Tuy nhiên, việc theo dõi và chẩn đoán sức khỏe kết cấu là một công việc liên tục, từ lúc hư hỏng vừa mới xuất hiện đến khi hư hỏng phát triển; và dữ liệu chẩn đoán mang tính lịch sử. Vì vậy, trước khi xảy ra hiện tượng tập trung ứng suất cục bộ, vùng hư hỏng ở giữa nhịp đã được chẩn đoán và phát hiện ở những cấp tải thấp hơn.

KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, hiện tượng nứt và tách lớp FRP trong dầm BTCT có gia cường tấm FRP đã được chẩn đoán thành công khi sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng. Kết quả phân tích cho thấy rằng phương pháp áp dụng đã có thể chẩn đoán chính xác sự xuất hiện và xác định vị trí vùng hư hỏng trong dầm. Đối với các hư hỏng nhỏ, biểu đồ chỉ số hư hỏng đạt cực trị tại đúng vị trí hư hỏng. Khi vùng hư hỏng phát triển, biểu đồ chỉ số hư hỏng mở rộng và xuất hiện nhiều đỉnh cực trị ứng với nhiều vị trí hư hỏng khác nhau. Phương pháp kiến nghị và bộ ba chỉ số đánh giá A, B, C để xuất có khả năng chẩn đoán chính xác vị trí hư hỏng với độ tin cậy cao trong trường hợp nhiều phần tử hư hỏng với các mức độ hư hỏng khác nhau. Kết quả khảo sát hai bài toán, dầm với hư hỏng giả định và dầm với hư hỏng do tải trọng gây ra, cho thấy phương pháp kiến nghị có độ chính xác lớn hơn 91%.

LỜI CẢM ƠN

Học viên Trần Mạnh Hùng được tài trợ bởi Tập đoàn Vingroup – Công ty CP và hỗ trợ bởi Chương trình học bổng thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), Viện Nghiên cứu Dữ liệu lớn, mã số VINIF.2021.ThS.100.

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.

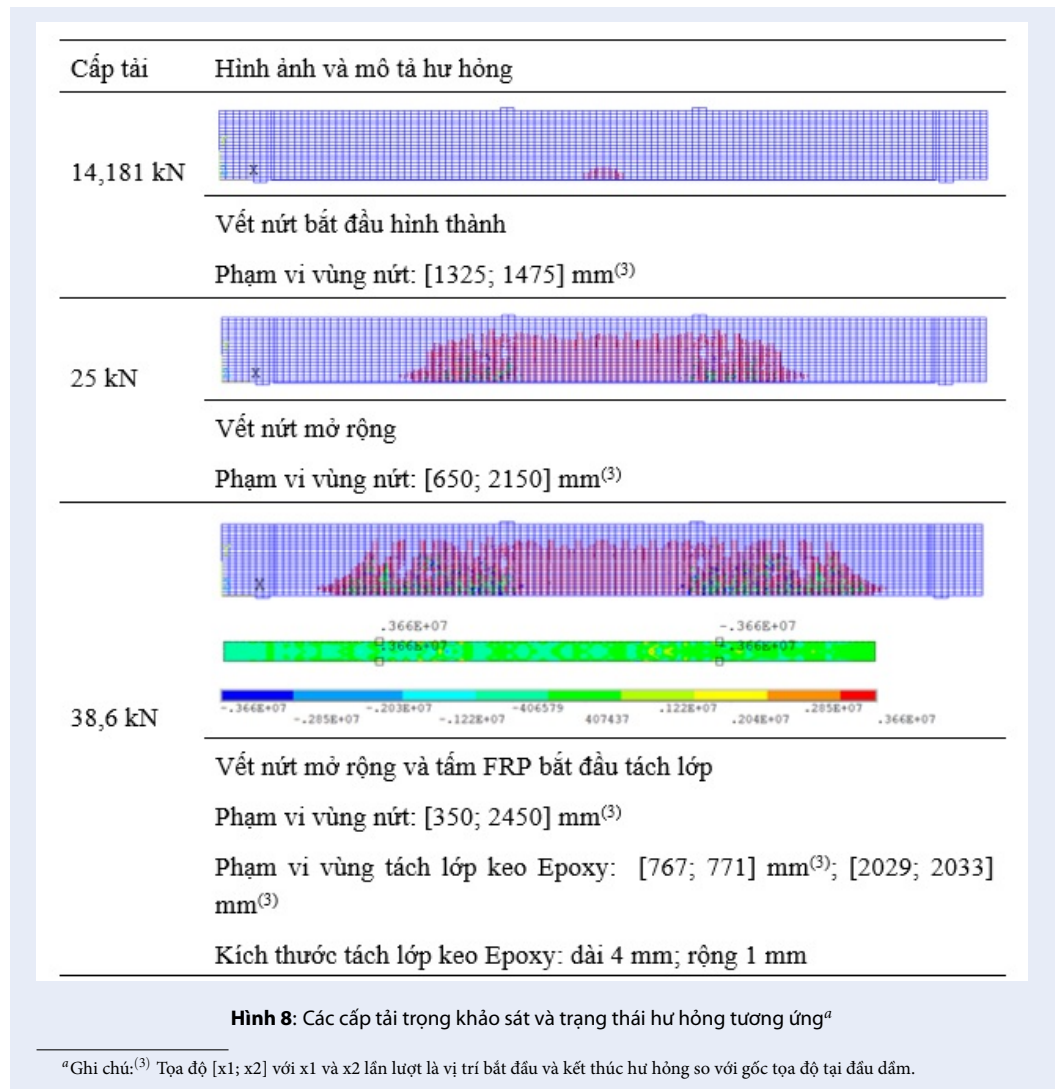
ĐÓNG GÓP CỦA CÁC TÁC GIẢ

Trần Mạnh Hùng, Phạm Minh Nhân, Nguyễn Hữu Phương, Trương Trần Đệ Nhất, Nguyễn Chí Thiện 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.

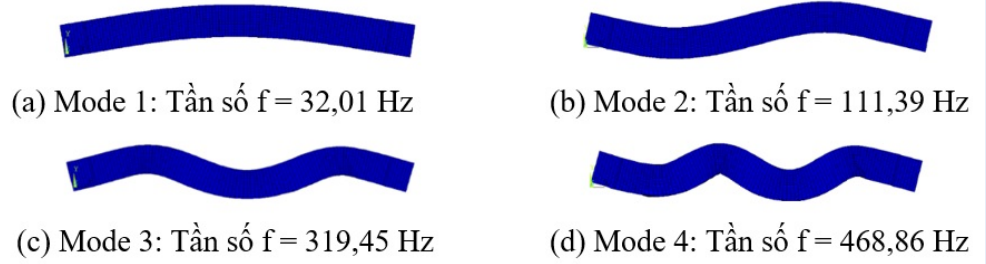
TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Voutetaki ME, Providakis CP, Chalioris CE. FRP debonding prevention of strengthened concrete members under dynamic load using smart piezoelectric materials (PZT). Proceedings of the 15th European conference on Composite Materials; 2012. p. 24-8; Available from: <https://www.researchgate.net/publication/282069509>.
2. Li W, Fan S, Ho SCM, Wu J, Song G. Interfacial debonding detection in fiber-reinforced polymer rebar-reinforced concrete using electro-mechanical impedance technique. *Struct Health Monit*. 2018;17(3):461-71; Available from: <https://doi.org/10.1177/1475921717703053>.
3. Jiang T, Hong Y, Zheng J, Wang L, Gu H. Crack detection of FRP-reinforced concrete beam using embedded piezoceramic smart aggregates. *Sensors (Basel)*. 2019;19(9): 1979; Available from: <https://doi.org/10.3390/s19091979>.
4. Liu S, Sun W, Jing H, Dong Z. Debonding detection and monitoring for CFRP reinforced concrete beams using piezoceramic sensors. *Materials (Basel)*. 2019;12(13):2150; Available from: <https://doi.org/10.3390/ma12132150>.
5. Ng CT, Mohseni H, Lam HF. Debonding detection in CFRP-retrofitted reinforced concrete structures using nonlinear Rayleigh wave. *Mech Syst Signal Process*. 2019;125:245-56; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.08.027>.
6. Jiang J, Jiang J, Deng X, Deng Z. Detecting debonding between steel beam and reinforcing CFRP plate using active sensing with removable PZT-based transducers. *Sensors (Basel)*. 2019;20(1):41; Available from: <https://doi.org/10.3390/s20010041>.
7. Trần NH. Đánh giá các chỉ số cho việc chẩn đoán hiện tượng tách lớp trong dầm bê tông cốt thép có gia cường tấm FRP sử dụng đáp ứng trở kháng. Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia Tp HCM. 2021;.
8. Cha YJ, Buyukozturk O. Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization. *Comput Aid Civ Infrastruct Eng*. 2015;30(5):347-58; Available from: <https://doi.org/10.1111/mice.12122>.
9. Zhao J, Shi M, Yin G, Lian X. Damage localization based on modal strain energy index and evidence theory. *E3S Web Conf*. 2020;165:1-5; Available from: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016506053>.
10. Baghiee N, Reza Esfahani MR, Moslem K. Studies on damage and FRP strengthening of reinforced concrete beams by vibration monitoring. *Eng Struct*. 2009;31(4):875-93; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.12.009>.
11. Zenzen R, Belaidi I, Khatir S. Damage identification in CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer) Structures by vibration measurement approach using genetic algorithm. *Conference JEM*. 2018;.
12. Kim JT, Ryu YS, Cho HM, Stubbs N. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method. *Eng Struct*. 2003;25(1):57-67; Available from: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00118-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00118-9).
13. Qeshta IMI, Shafiqh P, Jumaat MZ. Flexural behaviour of RC beams strengthened with wire mesh-epoxy composite. *Constr Build Mater*. 2015;79:104-14; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.013>.
14. Lu XZ, Teng JG, Ye LP, Jiang JJ. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Eng Struct*. 2005;27(6):920-37; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.01.014>.

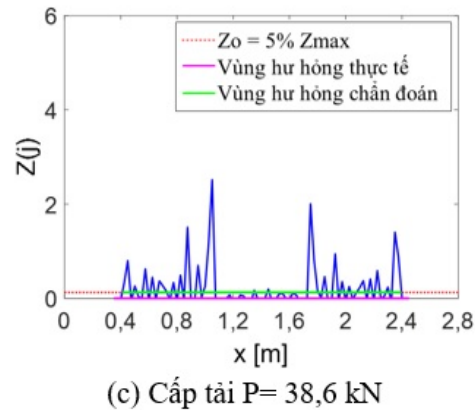
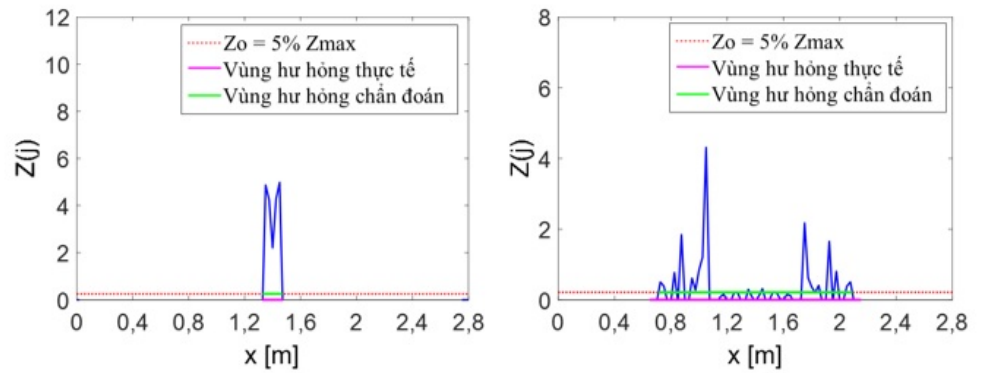


Bảng 5: Tần số dao động của dầm tương ứng với các cấp tải khảo sát của bài toán 2

Mode	P= 14,181 kN f (Hz)	P= 25 kN f (Hz)	P= 38,6 kN f (Hz)
1	68,46	34,60	32,01
2	224,91	141,02	111,39
3	575,85	370,14	319,45
4	845,62	597,53	468,86



Hình 9: Bốn dạng dao động và tần số của dầm tại cấp tải $P = 38,6$ kN



Hình 10: Biểu đồ chỉ số hư hỏng đối với bài toán 2

Bảng 6: Chỉ số độ chính xác của kết quả chẩn đoán hư hỏng cho bài toán 2

Tải trọng (kN)	Chỉ số đánh giá		
	Độ chính xác vùng hư hỏng A (%)	Độ chính xác vùng không hư hỏng B (%)	Độ chính xác tổng thể C (%)
14,181	93,96	100	99,68
25	91,77	100	95,59
38,6	94,56	100	95,92

Damage localization in reinforced concrete beams strengthened with FRP sheets using modal strain energy method

Manh Hung Tran^{1,2}, Minh Nhan Pham^{1,2}, Huu Phuong Nguyen^{1,2}, Tran De Nhat Truong^{1,2},
Chi Thien Nguyen^{1,2}, Tuan Minh Ha³, Duc Duy Ho^{1,2,*}



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

ABSTRACT

Civil structures are affected by many different factors from the environment, loads, aging of materials, ... These factors are uncertain variables and affect the health of the structures. Therefore, structural health monitoring (SHM) is very essential to detect damages early for necessary maintenance. In this paper, damaged locations in reinforced concrete beams strengthened with FRP (Fiber Reinforced Polymer) sheets are identified by using the modal strain energy method. First, a reinforced concrete beam strengthened with FRP sheets is simulated by ANSYS APDL software in order to analyze the beam's behavior and get vibration responses. The reliability of the simulation is verified by comparing the load - displacement relationship between numerical and experimental results. Next, the modal strain energy method is employed to determine the damaged locations (crack and debonding) in the beam. In which, a set of indicators to evaluate the accuracy of damage localization results is proposed. The feasibility of the method is demonstrated through two problems. For problem 1, five different damage scenarios including concrete damage and FRP debonding are examined to evaluate the modal strain energy method's feasibility for damage detection in the target beam. For problem 2, damages occurring in the beams are analyzed and determined according to each load level corresponding to the actual working state of the target beam. The results show that the modal strain energy method has high accuracy in detecting and locating damages in reinforced concrete beams strengthened with FRP sheets.

Key words: damage detection, vibration, reinforced concrete beams strengthened with FRP sheets, modal strain energy

¹Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), 268 Ly Thuong Kiet Street, District 10, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Vietnam National University Ho Chi Minh City, Thu Duc City, Ho Chi Minh City, Vietnam

³Faculty of Civil Engineering, HUTECH University, 475A Dien Bien Phu Street, Binh Thanh District, Ho Chi Minh City, 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

History

- Received: 30-3-2022
- Accepted: 25-5-2022
- Published: 30-6-2022

DOI : 10.32508/stdjet.v5i2.972



Cite this article : Tran MH, Pham MN, Nguyen HP, Truong TDN, Nguyen CT, Ha MT, Ho DD. **Damage localization in reinforced concrete beams strengthened with FRP sheets using modal strain energy method.** *Sci. Tech. Dev. J. – Engineering and Technology*; 5(2):1508-1519.