

# CHẨN ĐOÁN HIỆN TƯỢNG BONG TÁCH TRONG DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ GIA CƯỜNG TẦM FRP SỬ DỤNG ĐÁP ỨNG TRỞ KHÁNG

Trần Ngọc Huỳnh<sup>a,b,c</sup>, Trần Mạnh Hùng<sup>a,b,c</sup>, Hà Minh Tuấn<sup>d</sup>, Huỳnh Thanh Cảnh<sup>e,f</sup>,

Lê Văn Phước Nhân<sup>a,b</sup>, Hồ Đức Duy<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup>Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Đại học Bách Khoa TP.HCM, 268 Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. HCM, Việt Nam

<sup>b</sup>Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, phường Linh Trung, TP. Thủ Đức, TP. HCM, Việt Nam

<sup>c</sup>CTCP Tập đoàn Xây dựng Hòa Bình, Tòa nhà Pax Sky, 123 Nguyễn Đình Chiểu, TP. HCM, Việt Nam

<sup>d</sup>Khoa Xây dựng, Đại học Công nghệ TP. HCM, 475A Điện Biên Phủ, quận Bình Thạnh, TP. HCM, Việt Nam

<sup>e</sup>Khoa Xây dựng, Đại học Duy Tân, 03 Quang Trung, TP. Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>f</sup>Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ cao, Đại học Duy Tân, 03 Quang Trung, TP. Đà Nẵng, Việt Nam

Nhận ngày 21/7/2021, Sửa xong 10/2/2022, Chấp nhận đăng 17/2/2022

## Tóm tắt

Trong bài báo này, một mô phỏng số được thực hiện để chẩn đoán hiện tượng bong tách trong dầm bê tông cốt thép (BTCT) có gia cường tấm FRP (Fiber Reinforced Polymer) sử dụng đáp ứng trở kháng. Đầu tiên, lý thuyết về đáp ứng trở kháng cơ-điện sử dụng cảm biến PZT (Lead Zirconate Titanate), chỉ số đánh giá và định vị hư hỏng RMSD (Root Mean Square Deviation) dựa vào sự thay đổi của đáp ứng trở kháng được giới thiệu. Tiếp đến, một mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) cho dầm BTCT có gia cường tấm FRP được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS. Độ tin cậy của mô hình PTHH được kiểm chứng bằng việc so sánh với kết quả thực nghiệm. Các trường hợp hư hỏng bong tách giữa dầm BTCT và tấm FRP tương ứng với các cấp tải trọng tác dụng khác nhau được khảo sát. Sau cùng, chỉ số đánh giá hư hỏng RMSD được tính toán nhằm cảnh báo sự xuất hiện của hiện tượng bong tách và xác định vị trí bong tách trong dầm. Kết quả từ nghiên cứu cho thấy phương pháp trở kháng có độ chính xác cao trong việc chẩn đoán hiện tượng bong tách trong dầm BTCT có gia cường tấm FRP.

*Từ khoá:* dầm bê tông cốt thép; FRP; hiện tượng bong tách; trở kháng; chẩn đoán kết cấu.

DEBONDING DETECTION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH FRP SHEETS USING IMPEDANCE RESPONSES

## Abstract

In this paper, a numerical simulation to detect the debonding in reinforced concrete beams with FRP (Fiber Reinforced Polymer) sheets using electro-mechanical impedance responses is developed. First, the theory of impedance responses using PZT (Lead Zirconate Titanate) sensor, damage assessment and localization index of RMSD (Root Mean Square Deviation), based on the change of impedance responses, is presented. Next, a finite element model for reinforced concrete beam with FRP sheet is simulated by using ANSYS software. Numerical results are verified by comparing with experimental ones to demonstrate the reliability. The cases of debonding in the beam corresponding to different applied load levels were examined. Finally, the debonding's occurrence and location in the beam are detected by using the RMSD index. The results show that the impedance-based method has high accuracy in detecting the debonding in reinforced concrete beams strengthened with FRP sheets.

*Keywords:* reinforced concrete beams; FRP; debonding; impedance; damage detection.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(2V\)-07](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(2V)-07) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [hoducduy@hcmut.edu.vn](mailto:hoducduy@hcmut.edu.vn) (Duy, H. Đ.)

## 1. Giới thiệu

Kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) là loại kết cấu được sử dụng phổ biến nhất trong lĩnh vực xây dựng hiện nay. Tuy nhiên, BTCT là vật liệu dễ bị ăn mòn và xuất hiện vết nứt dẫn đến giảm khả năng chịu lực, giảm độ bền của kết cấu. Một giải pháp hiệu quả được sử dụng phổ biến để gia cường cho các công trình BTCT là sử dụng vật liệu FRP (Fiber Reinforced Polymer). Với những đặc tính nổi trội như: khả năng chịu va đập và chịu kéo tốt, trọng lượng nhẹ, khả năng chống ăn mòn cao, tính toán và kiểm tra đơn giản; vật liệu FRP ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực gia cố công trình xây dựng. Tuy nhiên, việc sử dụng vật liệu FRP lại tiềm ẩn rủi ro cần được quan tâm là sự mất liên kết, bong tách giữa tấm FRP và bề mặt cấu kiện bê tông. Do đó, các kết cấu BTCT được gia cường bằng tấm FRP cần được theo dõi, chẩn đoán thường xuyên để kịp thời phát hiện các hư hỏng và đưa ra giải pháp xử lý.

Sự ra đời của các vật liệu thông minh như vật liệu áp điện PZT (Lead Zirconate Titanate) đã hỗ trợ cho cuộc cách mạng trong lĩnh vực theo dõi và chẩn đoán sức khỏe kết cấu dựa trên các phương pháp không phá hủy. Năm 1994, Liang và cộng sự đã đề xuất phương pháp trở kháng cho việc chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu [1]. Tiếp theo sau đó, phương pháp trở kháng đã được nghiên cứu và ứng dụng thành công trên rất nhiều loại kết cấu khác nhau. Ở nước ngoài, việc sử dụng phương pháp trở kháng để chẩn đoán hư hỏng đã được nghiên cứu đối với nhiều loại kết cấu như: chẩn đoán hư hỏng kết cấu dầm [2], phát hiện vết nứt trong kết cấu tấm nhôm mỏng [3], chẩn đoán bong tách trong mẫu bê tông gia cường FRP [4], phát hiện hư hỏng trong kết cấu dầm nhôm [5], phát hiện hư hỏng trượt giữa các vật liệu trong kết cấu liên hợp thép – bê tông [6], chẩn đoán nứt trong dầm bê tông cốt thanh FRP [7]. Tại Việt Nam, một số nghiên cứu gần đây đã ứng dụng phương pháp trở kháng để chẩn đoán hư hỏng trong các kết cấu như: phát hiện vết nứt trong mẫu dầm nhôm [8], chẩn đoán hư hỏng cho dầm BTCT có gia cường tấm FRP [9], chẩn đoán hư hỏng vùng neo kết cấu bê tông cốt thép ứng suất trước [10].

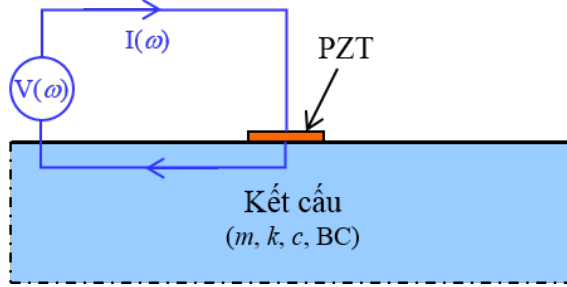
Việc sử dụng tấm FRP gia cường cho kết cấu dầm BTCT đang được sử dụng rất phổ biến. Đối với loại kết cấu này, hư hỏng bong tách giữa tấm FRP và dầm BTCT là một mục tiêu quan trọng cần được theo dõi và chẩn đoán nhằm đảm bảo độ an toàn cho kết cấu. Do vậy, mục tiêu của bài báo này là giới thiệu phương pháp chẩn đoán hiện tượng bong tách trong dầm BTCT có gia cường tấm FRP sử dụng đáp ứng trở kháng. Trước tiên, cơ sở lý thuyết về phương pháp trở kháng, chỉ số đánh giá hư hỏng và phương pháp xác định vị trí của hiện tượng bong tách dựa vào sự thay đổi của đáp ứng trở kháng được giới thiệu. Tiếp đến, một mô hình phần tử hữu hạn của dầm BTCT có gia cường tấm FRP được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS. Độ tin cậy của kết quả mô phỏng được kiểm chứng với kết quả thực nghiệm thông qua việc so sánh biểu đồ tải trọng-chuyển vị của dầm. Sau cùng, chỉ số đánh giá hư hỏng RMSD (Root Mean Square Deviation) được tính toán để xác định sự xuất hiện và vị trí xảy ra hư hỏng bong tách trong dầm.

## 2. Phương pháp trở kháng

### 2.1. Đáp ứng trở kháng cơ – điện

Với ưu điểm là giá thành thấp, hình dạng kích thước đa dạng, trọng lượng nhẹ, vật liệu áp điện PZT đã và đang được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực theo dõi và chẩn đoán sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring: SHM) [11]. PZT là vật liệu áp điện có thể chuyển đổi năng lượng điện và năng lượng cơ qua lại với nhau nên vừa có thể sử dụng như cảm biến để ghi nhận biến dạng trên kết cấu, vừa có thể là thiết bị truyền động để kích thích kết cấu. Sự tương tác cơ-điện giữa cảm biến PZT và kết cấu được thể hiện như trên Hình 1. Theo đó, kết cấu được mô tả bằng các đặc trưng như khối lượng

( $m$ ), độ cứng ( $k$ ), hệ số cản ( $c$ ) và điều kiện biên (BC) tương ứng. Trong khi đó, cảm biến PZT thì được miêu tả như một mạch điện với hiệu điện thế điều hòa ( $V$ ) và cường độ dòng điện ( $I$ ). Một điện áp kích thích tác động đến tấm PZT; dòng điện kích thích từ nguồn qua PZT tác dụng lên kết cấu và phản ứng lại dưới dạng tín hiệu điện; tín hiệu điện này được xử lý quy đổi thành tín hiệu trở kháng.



Hình 1. Mô hình tương tác cơ-điện giữa PZT và kết cấu

Đáp ứng trở kháng cơ - điện của hệ  $Z(\omega)$  là một hàm số kết hợp giữa trở kháng cơ của kết cấu  $Z_s(\omega)$  và trở kháng điện của cảm biến PZT  $Z_a(\omega)$  được diễn tả bằng công thức sau [1]:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = \left( i\omega \frac{w_a l_a}{t_a} \left( \overline{\varepsilon_{33}^T} - \frac{1}{Z_a(\omega)/Z_s(\omega) + 1} d_{31}^2 \overline{Y_{11}^E} \right) \right)^{-1} \quad (1)$$

trong đó:  $\overline{Y_{11}^E} = (1 + i\eta) Y_{11}^E$  là mô đun đàn hồi của PZT khi điện trường bằng 0;  $\overline{\varepsilon_{33}^T} = (1 - i\delta) \varepsilon_{33}^T$  là hằng số điện dung của PZT khi ứng suất bằng 0;  $d_{31}$  là hằng số áp điện của PZT khi ứng suất bằng 0;  $w_a, l_a, t_a$  lần lượt là chiều rộng, chiều dài và chiều dày của cảm biến PZT;  $\eta$  và  $\delta$  lần lượt là hệ số mất mát cản và hệ số mất mát điện môi của PZT.

Trở kháng cơ của kết cấu  $Z_s(\omega)$  là tỷ số giữa lực từ PZT và vận tốc của kết cấu tại vị trí gắn PZT. Trong đó, trở kháng cơ của kết cấu là hàm của khối lượng  $m$ , độ cứng  $k$  và cản  $c$ , thể hiện như sau:

$$Z_s(\omega) = m\omega j + c - \frac{k}{\omega} j \quad (2)$$

Như đã mô tả ở trên, trở kháng cơ-điện có quan hệ trực tiếp với trở kháng cơ của kết cấu  $Z_s(\omega)$ . Khi kết cấu xuất hiện hư hỏng, trở kháng cơ của kết cấu  $Z_s(\omega)$  sẽ thay đổi và làm thay đổi trở kháng cơ-điện  $Z(\omega)$ . Trở kháng cơ-điện  $Z(\omega)$  là hàm số phức được diễn tả như công thức (3).

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = \text{Re}\{Z(\omega)\} + j\text{Im}\{Z(\omega)\} \quad (3)$$

trong đó  $V(\omega)$  là hiệu điện thế đầu vào cho cảm biến PZT;  $I(\omega)$  là cường độ dòng điện đầu vào cho cảm biến PZT;  $\text{Re}\{Z(\omega)\}$ ,  $\text{Im}\{Z(\omega)\}$  lần lượt là phần thực và phần ảo của đáp ứng trở kháng. Phần thực của trở kháng cơ-điện có độ nhạy với hư hỏng trong kết cấu cao hơn so với phần ảo [12], nên phần thực của đáp ứng trở kháng thường được sử dụng trong lĩnh vực SHM.

## 2.2. Chỉ số đánh giá hư hỏng RMSD

Chỉ số đánh giá hư hỏng là một đại lượng vô hướng, là kết quả của việc xử lý và so sánh các đáp ứng trở kháng. Chỉ số đánh giá hư hỏng thể hiện sự khác biệt giữa các đáp ứng trở kháng của hai trạng thái khác nhau khi không có và khi có hư hỏng xảy ra. Trong nghiên cứu này, chỉ số RMSD (Root

Mean Square Deviation) [13] được sử dụng để đánh giá sự xuất hiện của hiện tượng bong tách trong dầm.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z^*(\omega_i) - Z(\omega_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Z(\omega_i)]^2}} \quad (4)$$

trong đó  $Z(\omega_i)$  và  $Z^*(\omega_i)$  là đáp ứng trở kháng của trạng thái trước và trạng thái sau khi xảy ra bong tách tại tần số thứ  $i$ ;  $n$  là số điểm tần số trong miền khảo sát. Trong điều kiện bỏ qua hiện tượng nhiễu của tín hiệu, nếu giá trị RMSD lớn hơn không thì có xuất hiện bong tách FRP trong dầm và ngược lại nếu giá trị bằng không thì không xuất hiện bong tách FRP trong dầm.

### 2.3. Định vị hư hỏng bằng chỉ số RMSD chuẩn hóa

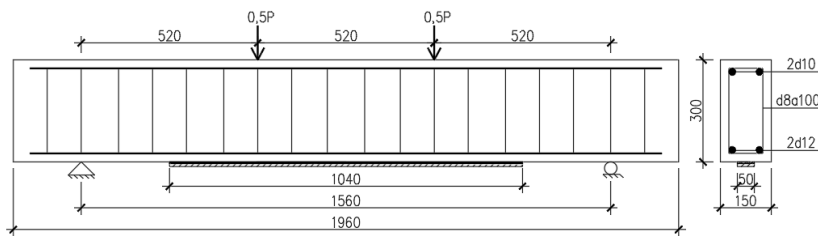
Sau khi cảnh báo sự xuất hiện của hiện tượng bong tách, việc xác định vị trí bong tách là cần thiết. Đáp ứng trở kháng của PZT ở gần vị trí xuất hiện bong tách sẽ thay đổi nhiều hơn so với các PZT ở xa vị trí xuất hiện bong tách. Trong nghiên cứu này, một chỉ số dựa trên phân phối chuẩn của các giá trị ngẫu nhiên được kiến nghị để chẩn đoán vị trí của hiện tượng bong tách trong dầm. Giả thuyết xem toàn bộ chỉ số đánh giá hư hỏng  $X_j$  ( $X_j, j = 1 \div n$ ) của các PZT ở cùng một trạng thái hư hỏng là các giá trị ngẫu nhiên với phân phối chuẩn, ta có:

$$Z_j^X = \frac{X_j - \mu[X_j]}{\sigma[X_j]} \quad (5)$$

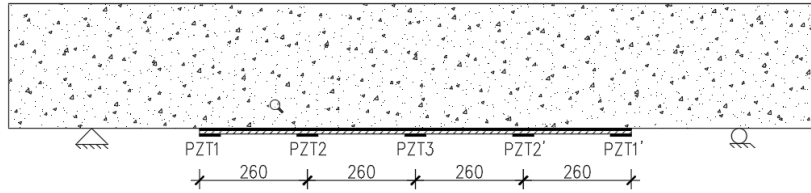
trong đó:  $\mu[X_j]$  là giá trị trung bình của tập hợp  $X$ ;  $\sigma[X_j]$  là độ lệch chuẩn của tập hợp  $X$ . Giá trị  $Z_j^X$  sẽ được so sánh với giá trị  $Z_0^X$  là hệ số tin cậy thống kê phụ thuộc vào độ tin cậy của tập hợp dữ liệu thống kê (được tra từ bảng tích phân Laplace). Khi một vị trí có  $Z_j^X > Z_0^X$  thì vị trí đó có xảy ra hiện tượng bong tách, ngược lại thì không có xảy ra hiện tượng bong tách trong dầm.

### 3. Mô phỏng số dầm BTCT có gia cường tấm FRP

Một dầm BTCT có kích thước 150×300×1960 mm, được gia cường tấm FRP dán ở mặt dưới có kích thước 50×1,2×1040 mm. Chi tiết về kích thước, điều kiện biên, vị trí gia tải, cốt thép trong dầm được thể hiện trên Hình 2. Trong thực nghiệm [14], dầm được gia tải từ không cho đến khi bị phá hoại. Để chẩn đoán hiện tượng bong tách trong dầm khi chịu tải, 5 cảm biến PZT kích thước 50×50×0,5 mm (PZT1, PZT2, PZT3, PZT2', PZT1'), thuộc loại PZT-5A, được dán vào tấm FRP với vị trí cách nhau 260 mm như trên Hình 3. Các thông số về vật liệu của dầm và của PZT được liệt kê chi tiết trong Bảng 1 và Bảng 2.



Hình 2. Sơ đồ thí nghiệm dầm BTCT gia cường tấm FRP [14]



Hình 3. Vị trí cảm biến PZT

Bảng 1. Đặc trưng vật liệu của dầm BTCT gia cường tấm FRP [14]

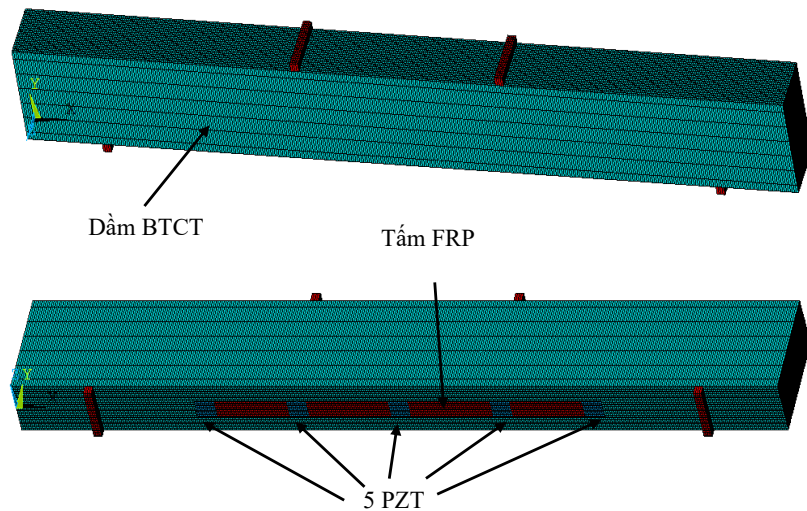
Đặc trưng	Bê tông	Cốt thép	Tấm FRP	Keo Epoxy
Mô đun đàn hồi ( $\text{N/m}^2$ )	$24,2 \times 10^9$	$210 \times 10^9$	$165 \times 10^9$	$2,5 \times 10^9$
Khối lượng riêng ( $\text{kg/m}^3$ )	2400	7850	1500	1100
Hệ số Poisson	0,2	0,3	-	-
Cường độ chịu nén (MPa)	30	-	-	-
Cường độ chịu kéo (MPa)	-	-	1300	60
Giới hạn chảy (MPa)	-	390	-	-

Bảng 2. Đặc trưng vật liệu của PZT-5A [15]

Đặc trưng	Giá trị
Biến dạng đàn hồi $s_{ijkl}^E$ ( $\text{m}^2/\text{N}$ )	$\begin{pmatrix} 16,4 & -5,74 & -7,22 & 0 & 0 & 0 \\ -5,74 & 16,4 & -7,22 & 0 & 0 & 0 \\ -7,22 & -7,22 & 18,8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 47,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 47,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 44,3 \end{pmatrix} \times 10^{-12}$
Hằng số ghép nối điện môi $d_{kij}$ (C/N)	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -171 \\ 0 & 0 & -171 \\ 0 & 0 & 374 \\ 0 & 584 & 0 \\ 584 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times 10^{-12}$
Hằng số điện môi $\varepsilon_{jk}^T$ (F/m)	$\begin{pmatrix} 1730 & 0 & 0 \\ 0 & 1730 & 0 \\ 0 & 0 & 1700 \end{pmatrix} \times (8,854 \times 10^{-12})$
Khối lượng riêng $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	7750
Hệ số cản $\eta$	0,005
Hệ số mất điện môi $\delta$	0,015

Phần mềm ANSYS APDL, vừa có tính năng mô phỏng kết cấu BTCT dưới tác dụng của tải trọng và vừa có tính năng mô phỏng trở kháng cơ-điện, được sử dụng để thiết lập mô hình phần tử hữu hạn

cho dầm BTCT có gia cường FRP. Hình 4 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. Vật liệu cốt thép được mô hình bằng phần tử thanh 2 nút, LINK180, chịu kéo hoặc nén. Tấm FRP và lớp keo liên kết được mô hình bằng phần tử khối đặc 8 nút, SOLID185, có cấu trúc một hoặc nhiều lớp. Cảm biến PZT được mô hình bằng phần tử cơ-điện 8 nút, SOLID5. Liên kết giữa bê tông và cốt thép, giữa bê tông và lớp keo, giữa lớp keo và tấm FRP được giả định là tuyệt đối trong mô hình ANSYS. Tọa độ các nút và phần tử sẽ được tạo ra tương ứng với kích thước hình học. Phần tử LINK180 của cốt thép được kết nối với các nút của phần tử khối bê tông SOLID65 liền kề. Cách tiếp cận tương tự cũng được áp dụng cho vật liệu FRP và keo Epoxy. Mô hình được mô phỏng với 29844 nút và 25860 phần tử.



Hình 4. Mô hình dầm BTCT gia cường tấm FRP có gắn 5 cảm biến PZT



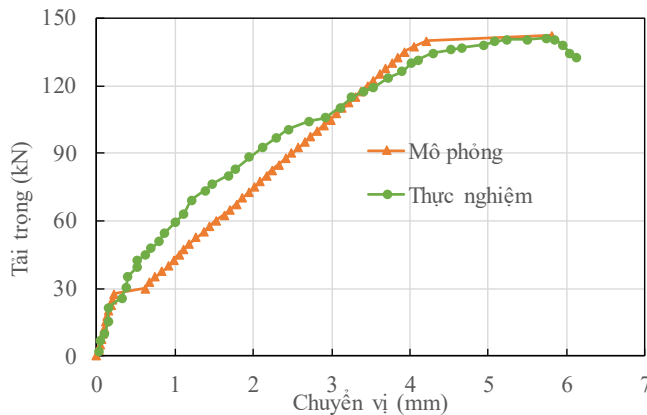
Hình 5. Trạng thái phá hoại dầm BTCT gia cường tấm FRP trong thực nghiệm [14]

Từ mô hình phần tử hữu hạn, kết quả tải trọng và chuyển vị tương ứng của dầm được phân tích. Tiến hành gia tải từ từ lên dầm BTCT có gia cường FRP cho đến khi dầm bị phá hủy. Tại thời điểm phá hủy, ứng suất kéo trong bê tông, cốt thép, ứng suất cắt trong keo vượt quá các giá trị giới hạn tương ứng. Ứng suất kéo trong FRP vẫn chưa vượt giá trị giới hạn. Tại thời điểm này, tấm FRP bị bong tách ra khỏi dầm BTCT (Hình 5). Trạng thái phá hoại của dầm trong mô phỏng phù hợp với trạng thái phá hoại của thí nghiệm [14]. Như thể hiện trên Hình 6 và tổng hợp trong Bảng 3, kết quả tải trọng và chuyển vị rất phù hợp với kết quả thực nghiệm đã được công bố [14]. Về hình dạng, biểu đồ thể hiện quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị có sự khác biệt so với kết quả thực nghiệm. Tuy nhiên, độ chênh lệch kết quả giữa mô phỏng và thực nghiệm là không đáng kể, 0,7% đối với giá trị tải trọng cực hạn

và 1,2% đối với giá trị chuyển vị tương ứng. Điều này chứng tỏ rằng mô hình phần tử hữu hạn cho dầm BTCT gia cường tấm FRP có độ tin cậy cao.

Bảng 3. So sánh kết quả tải trọng cực hạn và chuyển vị tương ứng giữa mô phỏng và thực nghiệm cho dầm BTCT gia cường tấm FRP

Thông số	Thực nghiệm	Mô phỏng số	Độ chênh lệch
Tải trọng cực hạn	142 kN	143 kN	0,7%
Chuyển vị tương ứng	5,75 mm	5,82 mm	1,2%



Hình 6. Biểu đồ quan hệ tải trọng-chuyển vị của dầm BTCT gia cường tấm FRP

Trong nghiên cứu này, sự bong tách giữa tấm FRP và bề mặt bê tông được xác định dựa vào giá trị ứng suất tiếp tại vị trí lớp keo. Khi giá trị ứng suất tiếp trong lớp keo liên kết giữa tấm FRP và dầm BTCT vượt quá giá trị ứng suất tiếp giới hạn  $\tau_{\max}$  thì sẽ gây ra sự bong tách. Giá trị ứng suất tiếp giới hạn được xác định như sau [16]:

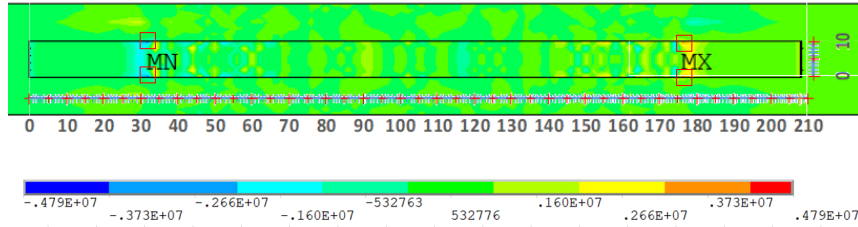
$$\tau_{\max} = \beta_w f_{ct}; \quad \beta_w = \sqrt{\frac{\left(2,25 - \frac{b_f}{b_c}\right)}{\left(1,25 + \frac{b_f}{b_c}\right)}} \quad (6)$$

trong đó:  $b_f$  là chiều rộng tấm FRP,  $b_c$  là chiều rộng phần bê tông,  $f_{ct}$  là cường độ chịu kéo của bê tông. Đối với dầm BTCT có gia cường tấm FRP đang khảo sát, giá trị ứng suất tiếp giới hạn được xác định là  $\tau_{\max} = 3 \text{ MPa}$ .

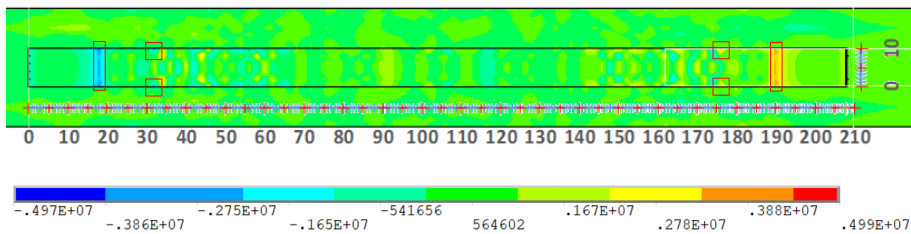
Phân tích ứng xử của lớp keo liên kết giữa tấm FRP với dầm BTCT, phá hủy của lớp keo bắt đầu xảy ra tại một số vị trí cục bộ trong dầm tại thời điểm tải trọng tác dụng là 29 kN. Giá trị ứng suất tiếp tại các điểm này là 3,7 MPa, vượt quá ứng suất tiếp giới hạn  $\tau_{\max} = 3 \text{ MPa}$ . Trong nghiên cứu này, đáp ứng trở kháng của ba trường hợp bong tách giữa tấm FRP và bề mặt bê tông với mức độ tăng dần theo cấp tải được sử dụng để phân tích và đánh giá hiệu quả của phương pháp chẩn đoán đề xuất. Trường hợp T1, tại thời điểm tải trọng là 29 kN, dầm bắt đầu xuất hiện sự bong tách giữa tấm FRP và bề mặt bê tông như thể hiện trên Hình 7(a). Vị trí bong tách tại điểm A và A' đối xứng nhau qua vị trí giữa nhịp, cách mép tấm FRP là 155 mm (Hình 8). Vết bong tách có dạng hình chữ nhật với kích thước là 5×10 mm. Trường hợp T2, tại thời điểm tải trọng là 35 kN, sự bong tách giữa tấm FRP và



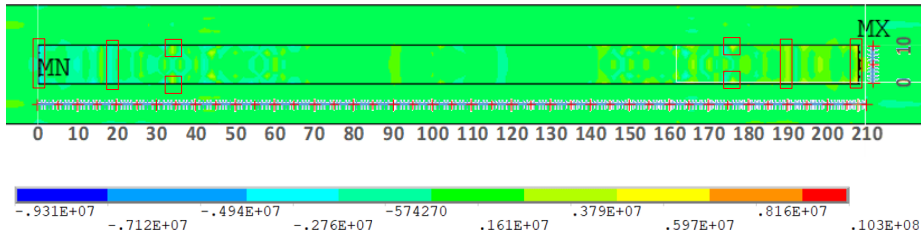
dầm BTCT như thể hiện trên Hình 7(b). Xuất hiện tiếp theo sau vị trí bong tách A và A', vị trí bong tách tại điểm B và B' đối xứng nhau qua vị trí giữa nhịp, cách mép tấm FRP là 85 mm (Hình 8). Vết bong tách có dạng hình chữ nhật kích thước 50×10 mm. Trường hợp T3, tại thời điểm tải trọng là 38 kN, sự bong tách giữa tấm FRP và dầm BTCT như thể hiện trên Hình 7(c). Xuất hiện tiếp theo sau vị trí bong tách A, A' và B, B', vị trí bong tách tại điểm C và C' đối xứng nhau qua vị trí giữa nhịp, ở vị trí mép tấm FRP (Hình 8). Vết bong tách có dạng hình chữ nhật kích thước 50×10 mm. Sự phát triển của hiện tượng bong tách trong dầm BTCT có gia cường tấm FRP tương ứng với từng cấp tải trọng được tổng hợp trong Bảng 4 và thể hiện trên Hình 8.



(a) Trường hợp T1, ứng suất tiếp tại cấp tải 29 kN



(b) Trường hợp T2, ứng suất tiếp tại cấp tải 35 kN



(c) Trường hợp T3, ứng suất tiếp tại cấp tải 38 kN

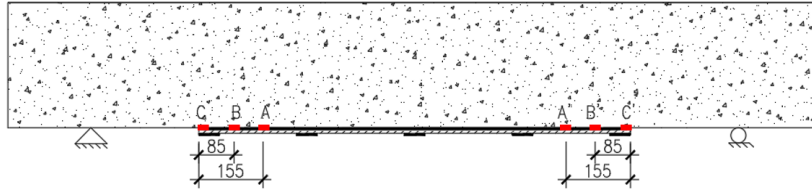
Ghi chú: Thước đo 1 đơn vị ứng với 5 mm. MX, MN là vị trí có giá trị ứng suất cắt lớn nhất trong mô hình

Hình 7. Biểu đồ ứng suất tiếp trong keo

Bảng 4. Các trường hợp bong tách trong dầm BTCT có gia cường tấm FRP

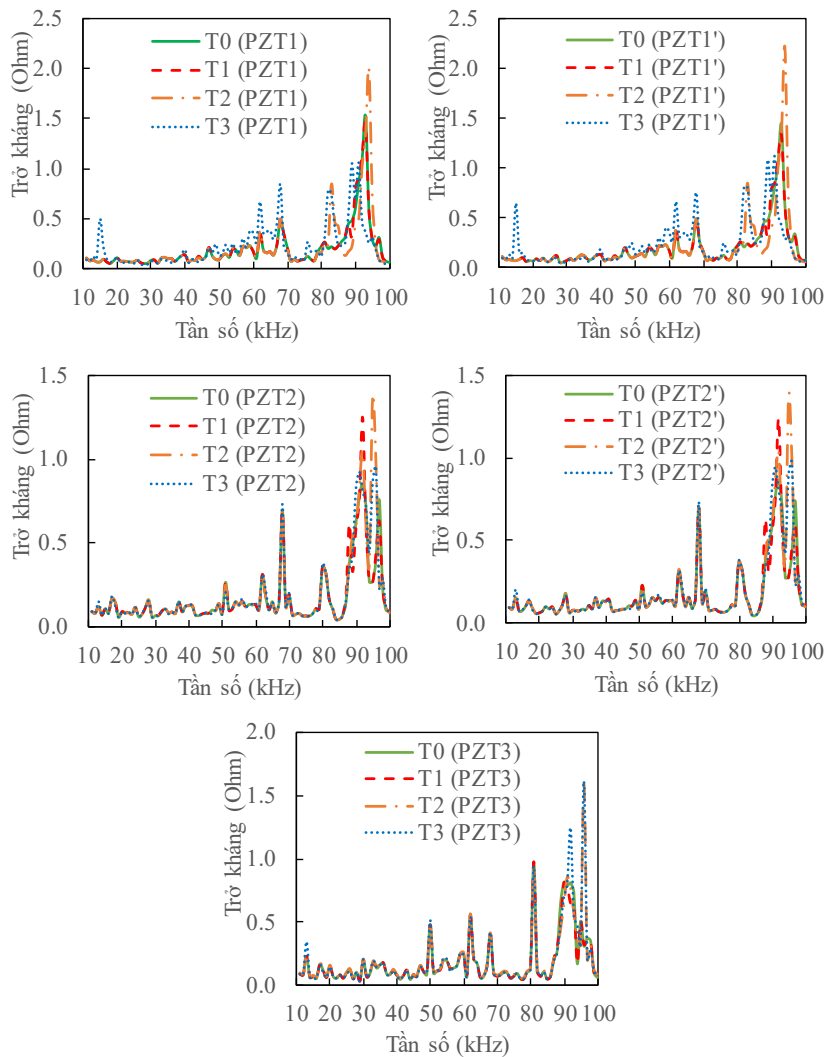
Trường hợp bong tách	T0	T1	T2	T3
Tải trọng (kN)	0-28	29 ( $\tau \geq 3,7$ MPa)	35 ( $\tau \geq 3,7$ MPa)	38 ( $\tau \geq 3,8$ MPa)
A, A'	0	5×10 mm	5×10 mm	5×10 mm
B, B'	0	0	50×10 mm	50×10 mm
C, C'	0	0	0	50×10 mm





Hình 8. Các trường hợp bong tách trong dầm BTCT có gia cường tấm FRP

Trong nghiên cứu này, 5 cảm biến PZT loại PZT-5A được mô phỏng trong mô hình dầm BTCT có gia cường tấm FRP. Từ đó, đáp ứng trở kháng cho 3 trường hợp hư hỏng bong tách được khảo sát trong miền tần số từ 10 - 100 kHz (Hình 9). Trong đó, trường hợp T0 tương ứng với trạng thái chưa xuất hiện hiện tượng bong tách trong dầm; trường hợp T1, T2, T3 tương ứng với trạng thái của 3 trường hợp bong tách tại các cấp tải trọng khác nhau. Khi xuất hiện sự bong tách trong dầm, vị trí và độ lớn

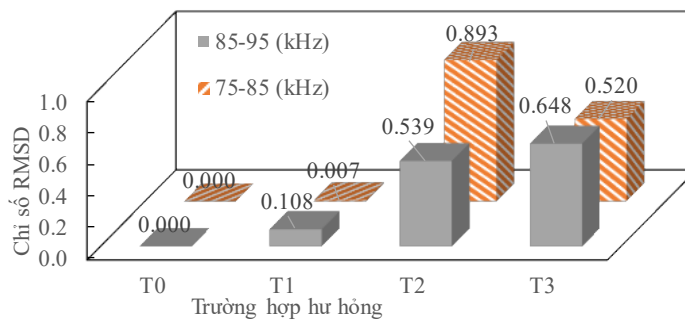


Hình 9. Đáp ứng trở kháng của 5 PZT tương ứng với các trường hợp khảo sát

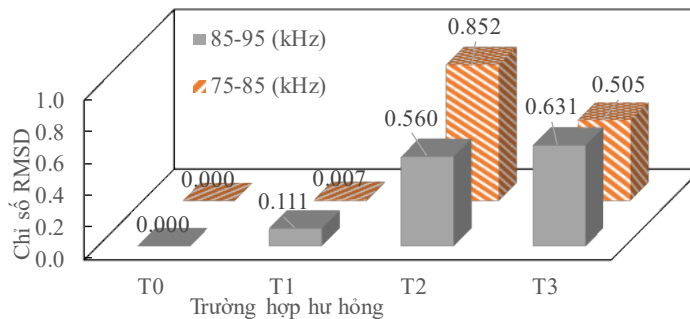
của các đỉnh trở kháng có thay đổi. Bên cạnh đó, khi hư hỏng bong tách giữa dầm BTCT và tấm FRP càng lớn thì đáp ứng trở kháng thu được so với đáp ứng trở kháng ban đầu (trường hợp T0) có sự khác biệt đáng kể. PZT1 và PZT1' ở gần vị trí hư hỏng hơn so với các PZT còn lại, nên sự khác biệt về đáp ứng trở kháng ở trường hợp T0 và T3 càng thể hiện rõ ràng. Đặc biệt, điều này thể hiện rõ ở một số miền tần số như 60-70 kHz, 75-85 kHz, 85-95 kHz. Như vậy, sự xuất hiện của hiện tượng bong tách FRP trong dầm BTCT được cảnh báo dựa vào sự thay đổi của đáp ứng trở kháng.

#### 4. Xác định chỉ số đánh giá sự xuất hiện của hiện tượng bong tách

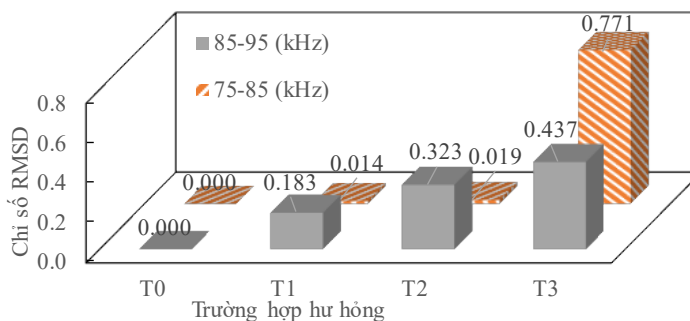
Chỉ số đánh giá hư hỏng bong tách, RMSD, được tính toán theo công thức (4), với dữ liệu đầu vào là các đáp ứng trở kháng của các trường hợp khảo sát có được từ mô phỏng. Hai miền tần số khác nhau có đỉnh trở kháng xuất hiện rõ ràng, tín hiệu trở kháng không bị nhiễu, 75-85 kHz và 85-95 kHz, được lựa chọn để xác định chỉ số RMSD. Kết quả tính toán chỉ số RMSD được thể hiện trên Hình 10 đến Hình 14 và được tổng hợp trong Bảng 5 và Bảng 6.



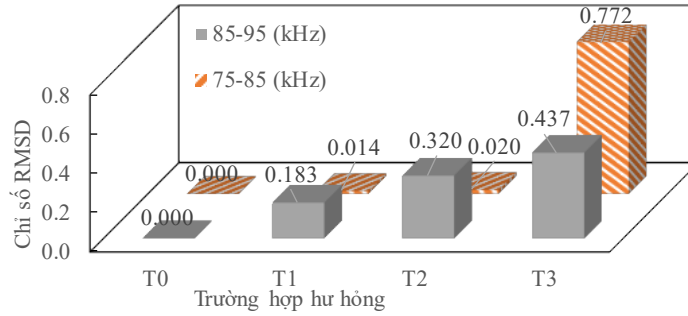
Hình 10. Chỉ số RMSD cho PZT1



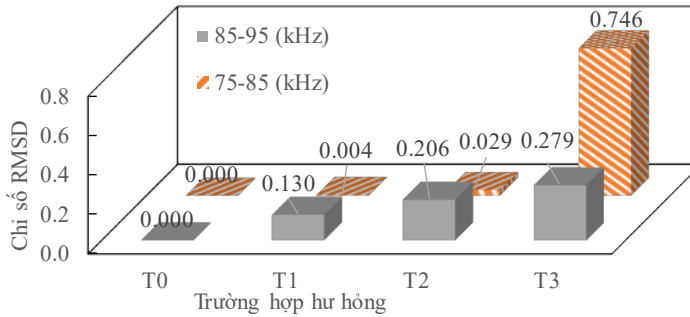
Hình 11. Chỉ số RMSD cho PZT1'



Hình 12. Chỉ số RMSD cho PZT2



Hình 13. Chỉ số RMSD cho PZT2'



Hình 14. Chỉ số RMSD cho PZT3

Bảng 5. Chỉ số đánh giá RMSD cho miền tần số 75-85 kHz

Trường hợp	PZT1	PZT1'	PZT2	PZT2'	PZT3
T0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
T1	0,007	0,007	0,014	0,014	0,004
T2	0,893	0,852	0,019	0,020	0,029
T3	0,520	0,505	0,771	0,772	0,746

Bảng 6. Chỉ số đánh giá RMSD cho miền tần số 85-95 kHz

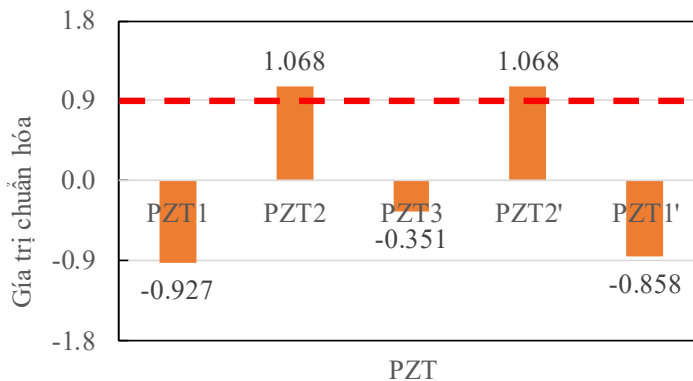
Trường hợp	PZT1	PZT1'	PZT2	PZT2'	PZT3
T0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
T1	0,108	0,111	0,183	0,183	0,130
T2	0,539	0,560	0,323	0,320	0,206
T3	0,648	0,631	0,437	0,437	0,279

Chỉ số RMSD có giá trị lớn hơn không cho trường hợp có sự hư hỏng bong tách T1, T2, T3 và ngược lại bằng không cho trường hợp không có sự hư hỏng bong tách T0. Như vậy, sự xuất hiện hư hỏng bong tách FRP trong đầm BTCT được chẩn đoán thành công khi sử dụng chỉ số đánh giá RMSD của phương pháp trở kháng. Khi mức độ bong tách FRP trong đầm tăng, giá trị của chỉ số RMSD gia tăng tương ứng. Đối với trường hợp T1, vị trí hư hỏng bong tách xuất hiện ở gần PZT2 và PZT2', giá trị RMSD của PZT2 và PZT2' lớn hơn giá trị RMSD của các PZT còn lại. Kết quả tương tự cho hai trường hợp hư hỏng bong tách còn lại, chỉ số RMSD lớn nhất ở PZT1 và PZT1'. Như vậy, PZT càng gần vị trí bong tách thì giá trị chỉ số đánh giá RMSD càng lớn. Trong miền tần số 85-95 kHz, sự xuất

hiện đỉnh trở kháng trong biểu đồ là rõ ràng và chỉ số RMSD thay đổi có quy luật. Cho nên, các giá trị RMSD của miền tần số 85-95 kHz được sử dụng để xác định vị trí hư hỏng bong tách trong dầm.

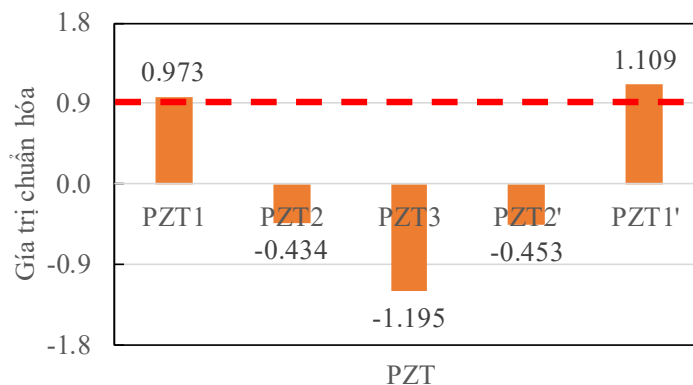
### 5. Xác định vị trí của hư hỏng bong tách trong dầm

Sau khi cảnh báo thành công sự xuất hiện của hư hỏng bong tách, chỉ số RMSD trong miền tần số 85-95 kHz được chuẩn hóa theo công thức (5) để xác định vị trí bong tách của tấm FRP trong dầm. Các chỉ số RMSD thu được trong từng trường hợp hư hỏng là một tập thống kê với phân phối chuẩn; các chỉ số RMSD cho 3 trường hợp hư hỏng bong tách T1, T2, T3 được tiến hành chuẩn hóa. PZT có chỉ số RMSD càng lớn giá trị chuẩn hóa  $Z_j$  càng lớn và độ tin cậy có hư hỏng bong tách gần PZT càng cao. Từ kết quả mô phỏng, trường hợp T1 hư hỏng bong tách xảy ra ở gần vị trí PZT2, PZT2' và đối với trường hợp T2 và T3, hư hỏng bong tách xảy ra ở gần vị trí PZT1 và PZT1'. Độ tin cậy của phương pháp trong ba trường hợp hư hỏng lớn nhất là 86,7% (PZT1' trường hợp T2) và nhỏ nhất là 82,6% (PZT1' trường hợp T3). Từ kết quả thu được chọn ngưỡng  $Z_o = 0,9$  tương đương với độ tin cậy của việc xác định vị trí hư hỏng là 81,2% để xác định vị trí xuất hiện hư hỏng bong tách. Hư hỏng bong tách được xác định tại vị trí PZT thứ  $j$  nếu  $Z_j > Z_o$ ; và ngược lại, không có hư hỏng bong tách tại vị trí PZT khảo sát. Kết quả của phương pháp xác định vị trí PZT có hư hỏng bong tách thể hiện từ Hình 15 đến Hình 17. Phương pháp đã xác định chính xác vị trí của hư hỏng bong tách trong dầm.



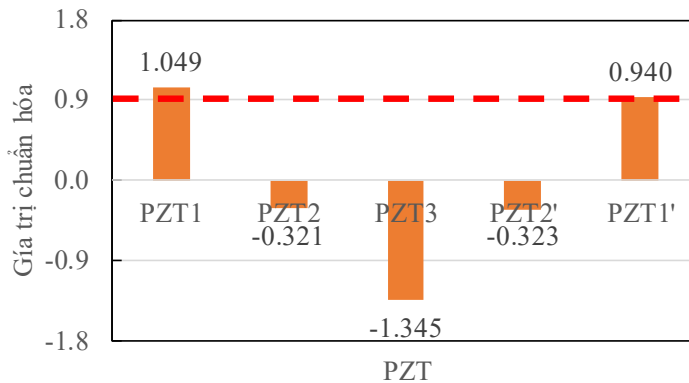
Hình 15. Chỉ số RMSD chuẩn hóa đối với trường hợp T1

Trường hợp T1, hư hỏng bong tách xảy ra ở gần vị trí PZT2 và PZT2'. Trong trường hợp này  $Z_j$  của PZT2 và PZT2' có giá trị là 1,068 tương ứng với độ tin cậy 85,7%.



Hình 16. Chỉ số RMSD chuẩn hóa đối với trường hợp T2

Trường hợp T2, hư hỏng bong tách xảy ra ở gần vị trí PZT1 và PZT1'. Trong trường hợp này  $Z_j$  của PZT1 và PZT1' có giá trị là 0,973 và 1,109 tương ứng với độ tin cậy 83,5% và 86,7%.



Hình 17. Chỉ số RMSD chuẩn hóa đối với trường hợp T3

Trường hợp T3, hư hỏng bong tách xảy ra ở gần vị trí PZT1 và PZT1'. Trong trường hợp này  $Z_j$  của PZT1 và PZT1' có giá trị là 1,049 và 0,940 tương ứng với độ tin cậy 85,3% và 82,6%.

## 6. Kết luận

Nghiên cứu này đã phát triển thành công một mô hình phần tử hữu hạn cho việc chẩn đoán hiện tượng bong tách giữa tấm FRP và dầm BTCT sử dụng đáp ứng trở kháng. Mô phỏng số dầm BTCT có gia cường tấm FRP có độ tin cậy cao, có kết quả phù hợp với kết quả thực nghiệm. Chỉ số đánh giá hư hỏng RMSD, dựa vào sự thay đổi của đáp ứng trở kháng, đã cảnh báo thành công sự xuất hiện của hư hỏng bong tách giữa dầm BTCT và tấm FRP. Hơn nữa, việc sử dụng chỉ số RMSD chuẩn hóa giúp xác định được vị trí chính xác của hư hỏng bong tách trong dầm. Kết quả nghiên cứu chứng minh rằng việc sử dụng phương pháp trở kháng để chẩn đoán hư hỏng bong tách trong dầm BTCT có gia cường FRP mang tính hiệu quả cao và có tiềm năng để ứng dụng vào các bài toán chẩn đoán kỹ thuật công trình trong thực tế.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số B2020-20-06.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Liang, C., Sun, F. P., Rogers, C. A. (1994). [Coupled Electro-Mechanical Analysis of Adaptive Material Systems — Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer](#). *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 5(1):12–20.
- [2] Sun, F. P., Chaudhry, Z., Liang, C., Rogers, C. A. (1995). [Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator](#). *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 6(1):134–139.
- [3] Giurgiutiu, V., Zagrai, A. (2005). [Damage Detection in Thin Plates and Aerospace Structures with the Electro-Mechanical Impedance Method](#). *Structural Health Monitoring*, 4(2):99–118.
- [4] Park, S., Kim, J.-W., Lee, C., Park, S.-K. (2011). [Impedance-based wireless debonding condition monitoring of CFRP laminated concrete structures](#). *NDT & E International*, 44(2):232–238.

- [5] Nguyen, K.-D., Ho, D.-D., Kim, J.-T. (2013). [Damage detection in beam-type structures via PZT's dual piezoelectric responses](#). *Smart Structures and Systems*, 11(2):217–240.
- [6] Liang, Y., Li, D., Parvasi, S. M., Kong, Q., Lim, I., Song, G. (2016). [Bond-slip detection of concrete-encased composite structure using electro-mechanical impedance technique](#). *Smart Materials and Structures*, 25(9):095003.
- [7] Jiang, T., Hong, Y., Zheng, J., Wang, L., Gu, H. (2019). [Crack Detection of FRP-Reinforced Concrete Beam Using Embedded Piezoceramic Smart Aggregates](#). *Sensors*, 19(9):1979.
- [8] Nguyễn, T. H., Lê, Q. H., Hồ, Đ. D. (2017). Chẩn đoán vết nứt trong dầm nhôm sử dụng tín hiệu trở kháng kết hợp với mạng nơ-ron nhân tạo. *Tạp Chí Xây Dựng*, 11:125–129.
- [9] Nguyễn, V. B. (2018). *Chẩn đoán hiện tượng tách lớp trong dầm bê tông cốt thép có gia cường tấm FRP sử dụng đặc trưng trở kháng cơ-điện*. Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia Tp. HCM.
- [10] Tín, L. T. H., Cảnh, H. T., Cao, L. T., Nhân, L. V. P., Duy, H. Đ. (2020). [Chẩn đoán tổn hao lực ứng suất trước trong vùng neo cáp sử dụng đáp ứng trở kháng cơ-điện](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCVND) - ĐHXDHN*, 14(3V):1–11.
- [11] Na, W., Baek, J. (2018). [A Review of the Piezoelectric Electromechanical Impedance Based Structural Health Monitoring Technique for Engineering Structures](#). *Sensors*, 18(5):1307.
- [12] Bhalla, S., Soh, C. K. (2003). [Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers](#). *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32(12):1897–1916.
- [13] Li, W., Fan, S., Ho, S. C. M., Wu, J., Song, G. (2017). [Interfacial debonding detection in fiber-reinforced polymer rebar-reinforced concrete using electro-mechanical impedance technique](#). *Structural Health Monitoring*, 17(3):461–471.
- [14] Vo, T. T. (2013). *Phân tích ứng xử số của dầm BTCT gia cường tấm FRP bằng phần mềm PTHH ABAQUS*. Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia Tp. HCM.
- [15] [Efunda Engineering Fundamentals. Lead Zirconate Titanate \(PZT-5A\)](#).
- [16] Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., Jiang, J. J. (2005). [Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete](#). *Engineering Structures*, 27(6):920–937.