

# CHẨN ĐOÁN TỔN HAO LỰC ỨNG SUẤT TRƯỚC TRONG VÙNG NEO CÁP SỬ DỤNG ĐÁP ỨNG TRỞ KHÁNG CƠ-ĐIỆN

Lưu Trần Hữu Tín<sup>a,b</sup>, Huỳnh Thanh Cảnh<sup>c,d</sup>, Lê Thanh Cao<sup>a,b,e</sup>,  
Lê Văn Phước Nhân<sup>a,b</sup>, Hồ Đức Duy<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup>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

<sup>b</sup>Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, quận Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>c</sup>Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Duy Tân, 254 đường Nguyễn Văn Linh, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>d</sup>Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Trường Đại học Duy Tân,  
254 đường Nguyễn Văn Linh, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>e</sup>Khoa Xây dựng, Trường Đại học Nha Trang, 2 đường Nguyễn Đình Chiểu,  
quận Vĩnh Thọ, TP. Nha Trang, Khánh Hòa, Việt Nam

Nhận ngày 06/06/2020, Sửa xong 25/06/2020, Chấp nhận đăng 14/07/2020

---

## Tóm tắt

Trong bài báo này, một mô phỏng số để chẩn đoán tổn hao lực ứng suất trước trong vùng neo cáp của kết cấu bê tông cốt thép ứng suất trước sử dụng đáp ứng trở kháng cơ-điện được giới thiệu. Đầu tiên, lý thuyết về đáp ứng trở kháng cơ-điện sử dụng cảm biến PZT (Lead Zirconate Titanate) và các chỉ số đánh giá hư hỏng dựa vào sự thay đổi của đáp ứng trở kháng được trình bày. Tiếp theo, một mô hình phần tử hữu hạn cho vùng neo cáp của một dầm bê tông cốt thép ứng suất trước được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS. Các trường hợp hư hỏng được khảo sát là tổn hao lực ứng suất trước trong dầm tương ứng với các mức độ khác nhau. Độ tin cậy của kết quả mô phỏng được kiểm chứng bằng việc so sánh với kết quả thực nghiệm. Cuối cùng, các chỉ số đánh giá hư hỏng được xác định nhằm cảnh báo tổn hao lực ứng suất trước trong dầm. Kết quả từ nghiên cứu cho thấy phương pháp trở kháng đạt được hiệu quả cao trong việc chẩn đoán tổn hao lực ứng suất trước trong vùng neo cáp.

*Từ khóa:* cảm biến PZT; chẩn đoán kết cấu; lực ứng suất trước; trở kháng cơ-điện; vùng neo cáp.

IDENTIFICATION OF PRESTRESS-LOSS IN CABLE-ANCHORAGE SYSTEM USING ELECTRO-MECHANICAL IMPEDANCE RESPONSES

## Abstract

In this paper, a numerical simulation for identification of prestress-loss in cable-anchorage system using electro-mechanical impedance responses is presented. Firstly, the theories of electro-mechanical impedance responses using PZT sensor (Lead Zirconate Titanate) and the damage indexes based on the change of the impedance responses are introduced. Secondly, a finite element model of prestressed concrete beam's cable-anchorage system is simulated by using ANSYS software. The loss of prestress force is investigated with various levels. The reliability of the numerical results is verified by comparison to pre-published experimental results. Finally, the damage indexes are determined to identify the prestress-loss in beam. The results from this study show that the impedance-based damage identification method is high effectiveness for monitoring the prestress-loss in cable-anchorage system.

*Keywords:* cable-anchorage system; electro-mechanical impedance; prestress force; PZT sensor; structural health monitoring.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(3V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(3V)-01) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

---

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

## 1. Giới thiệu

Ngày nay, cùng với sự phát triển vượt bậc của khoa học, kỹ thuật và công nghệ, các công trình xây dựng lớn với kết cấu hiện đại đã và đang được hình thành. Tuy nhiên, việc xuất hiện các sai sót, hư hỏng trong quá trình thi công, khai thác và sử dụng công trình là điều không thể tránh khỏi. Điều này không chỉ gây tác động không tốt đến độ an toàn và tuổi thọ của công trình mà còn gây ảnh hưởng đến cuộc sống của con người. Vì vậy, theo dõi và chẩn đoán kết cấu thường xuyên là việc làm rất cần thiết để có thể phát hiện kịp thời các hư hỏng và đưa ra giải pháp xử lý, gia cường, sửa chữa hợp lý. Việc trực tiếp phát hiện các hư hỏng của kết cấu bằng mắt thường là gần như không khả thi. Do vậy, lĩnh vực theo dõi và chẩn đoán sức khỏe kết cấu (SHM: Structural Health Monitoring) đã hình thành và đang phát triển nhằm nghiên cứu về chẩn đoán kỹ thuật công trình [1, 2].

Trong nửa thế kỷ vừa qua, nhiều phương pháp chẩn đoán kết cấu đã được nghiên cứu và ứng dụng. Trong đó, phương pháp chẩn đoán sử dụng đáp ứng trở kháng cơ-điện là một phương pháp mới và có tính hiệu quả cao khi có thể phát hiện kịp thời những hư hỏng từ lúc mới hình thành mà không cần phải phá hủy kết cấu. Phương pháp trở kháng lần đầu tiên được giới thiệu bởi Liang và cs. vào năm 1994 [3]. Sau đó, một số nhóm tác giả khác đã nghiên cứu và đề xuất các chỉ số cảnh báo hư hỏng sử dụng đáp ứng trở kháng; ví dụ như: chỉ số RMSD (Root Mean Square Deviation) [4], chỉ số CC (Correlation Coefficient) [5], chỉ số CCD (Correlation Coefficient Deviation) [6] và chỉ số MAPD (Mean Absolute Percentage Deviation) [6]. Hơn thế nữa, phương pháp trở kháng đã được áp dụng thành công trên rất nhiều loại kết cấu khác nhau như: kết cấu dàn [4], kết cấu tấm mỏng [7], kết cấu thép [8], kết cấu bê tông [9], vùng neo của dầm bê tông ứng suất trước [10], kết cấu bê tông có gia cường FRP [11].

Trong lĩnh vực xây dựng, kết cấu bê tông cốt thép ứng suất trước được sử dụng rất phổ biến. Đối với loại kết cấu này, lực ứng suất trước là một mục tiêu quan trọng cần được theo dõi và chẩn đoán nhằm đảm bảo độ an toàn cho kết cấu. Từ những nhu cầu thực tế đặt ra và kế thừa các nghiên cứu trước, mục tiêu của bài báo này là giới thiệu phương pháp chẩn đoán tổn hao lực ứng suất trước trong vùng neo cáp sử dụng đáp ứng trở kháng cơ-điện. Đầu tiên, cơ sở lý thuyết về phương pháp trở kháng và bốn chỉ số đánh giá hư hỏng (CC, CCD, RMSD, MAPD) dựa vào sự thay đổi của đáp ứng trở kháng được trình bày. Tiếp theo, một mô hình phần tử hữu hạn của vùng neo cáp trong dầm bê tông cốt thép ứng suất trước được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS. Trong mô hình, tổn hao lực ứng suất trước được xem xét với ba mức độ khác nhau là 20%, 40%, 60%. Độ tin cậy của kết quả mô phỏng được kiểm chứng với kết quả thực nghiệm. Cuối cùng, các chỉ số đánh giá hư hỏng được tính toán và phân tích để xác định tổn hao lực ứng suất trước trong dầm.

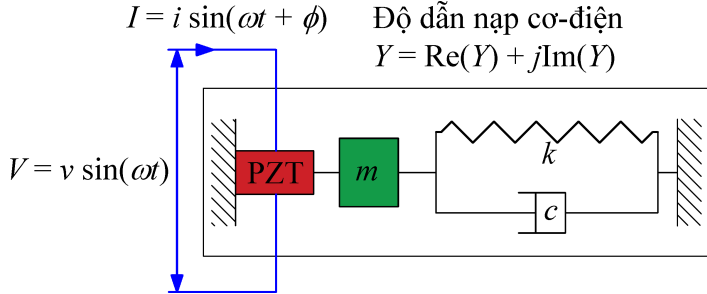
## 2. Phương pháp trở kháng

### 2.1. Đáp ứng trở kháng cơ-điện

Trong những năm gần đây, vật liệu áp điện ngày càng được sử dụng phổ biến và rộng rãi trong lĩnh vực SHM. Ưu điểm của loại vật liệu này là nhẹ, rẻ, đa năng và có nhiều hình dạng khác nhau. Vật liệu áp điện hoạt động theo nguyên lý cảm ứng hai chiều giữa tác dụng cơ học và tác dụng điện trường, 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. Theo phương pháp trở kháng, các cảm biến vật liệu áp điện PZT (Lead Zirconate Titanate), với kích thước nhỏ và khối lượng rất nhẹ nên không ảnh hưởng đến sự làm việc bình thường của kết cấu, được dán lên bề mặt của vùng cần chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu. Cảm biến PZT được kết nối với nguồn điện xoay chiều trong máy thu và xử lý tín hiệu. Dòng điện

kích thích từ nguồn và phản ứng lại dưới dạng tín hiệu điện; sau đó được xử lý quy đổi thành tín hiệu trở kháng.

Sự tương tác cơ-điện giữa cảm biến PZT và kết cấu được thể hiện như trên Hình 1. Theo đó, kết cấu được miêu tả bằng các đặc trưng như khối lượng ( $m$ ), độ cứng ( $k$ ), hệ số cản ( $c$ ) và điều kiện biên. 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 ( $I$ ).



Hình 1. Mô hình tương tác cơ-điện giữa PZT và kết cấu [3]

Độ dẫn nạp cơ-điện  $Y(\omega)$  là một hàm số kết hợp giữa trở kháng cơ của kết cấu  $Z_s(\omega)$  và trở kháng của cảm biến PZT  $Z_a(\omega)$  được diễn tả bằng công thức như sau [3]:

$$Y(\omega) = j\omega \frac{w_p l_p}{t_p} \left( \left( \overline{e_{33}^\sigma} - d_{31}^2 \overline{Y_{11}^E} \right) + \frac{Z_a(\omega)}{Z_a(\omega) + Z_s(\omega)} d_{31}^2 \overline{Y_{11}^E} \frac{\tan(kl_p)}{kl_p} \right) \quad (1)$$

trong đó  $Y(\omega) = I/V$  là độ dẫn nạp cơ-điện, đại lượng nghịch đảo của trở kháng cơ-điện  $Z(\omega)$ ;  $w_p$ ,  $l_p$ ,  $t_p$  lần lượt là chiều rộng, chiều dài và chiều dày của cảm biến PZT;  $d_{31}$  là hằng số áp điện của PZT khi ứng suất bằng 0;  $\overline{Y_{11}^E} = (1 + j\eta)Y_{11}^E$  là mô đun đàn hồi của PZT khi điện trường bằng 0;  $\overline{e_{33}^\sigma} = (1 - j\delta)e_{33}^\sigma$  là hằng số điện dung của PZT;  $\eta$  và  $\delta$  lần lượt là hệ số mất mát cản và hệ số mất mát điện môi của PZT;  $k = \omega \sqrt{\rho/Y_{11}^E}$  là số bước sóng;  $\rho$  là khối lượng riêng.

Nếu kết cấu được xem là hệ một bậc tự do, trở kháng cơ của kết cấu  $Z_s(\omega)$  có thể được biểu diễn bằng công thức sau:

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

Công thức (2) cho thấy rằng trở kháng cơ của kết cấu là một hàm số phụ thuộc vào các đặc trưng động lực học như khối lượng, độ cứng và hệ số cản. Do đó, bất kỳ sự thay đổi nào trong các đặc trưng động lực học (được xem là hư hỏng) đều có thể dẫn đến sự thay đổi trong đáp ứng trở kháng cơ-điện; và ngược lại có thể sử dụng sự thay đổi của đáp ứng trở kháng cơ-điện để đánh giá sự thay đổi của các đặc trưng động lực học trong kết cấu.

Theo công thức (1), khi kết cấu xuất hiện hư hỏng, trở kháng cơ  $Z_s(\omega)$  của kết cấu sẽ thay đổi và làm thay đổi trở kháng cơ-điện  $Z(\omega)$ . Trở kháng cơ-điện là hàm số phức:

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

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 cơ-điện tương ứng.

Hư hỏng trong kết cấu được phát hiện khi có sự sai lệch của hai đáp ứng trở kháng ở hai khoảng thời gian khảo sát khác nhau. Đối với hư hỏng của kết cấu, phần thực của đáp ứng trở kháng nhạy hơn so phần ảo; cho nên, phần thực thường được sử dụng trong các phương pháp chẩn đoán hư hỏng [12]. Ngoài ra, đáp ứng trở kháng thường được đo ở miền tần số cao ( $\geq 1$  kHz) và bước sóng ngắn nhằm đảm bảo đủ độ nhạy để nhận biết đối với những hư hỏng nhỏ. Hơn nữa, khi khảo sát đáp ứng trở kháng ở miền tần số cao thì chỉ cần hiệu điện thế nhỏ là đủ để tạo ra lực kích thích trong kết cấu.

## 2.2. Các chỉ số đánh giá hư hỏng

Trong nghiên cứu này, bốn chỉ số đánh giá hư hỏng được sử dụng để định lượng sự thay đổi của đáp ứng trở kháng trước và sau khi kết cấu xảy ra hư hỏng. Bốn chỉ số đánh giá bao gồm: chỉ số CC [5], chỉ số CCD [6], chỉ số RMSD [4] và chỉ số MAPD [6]. Hiệu quả chẩn đoán hư hỏng là khác nhau khi sử dụng chỉ số đánh giá khác nhau. Điều này tùy thuộc vào đặc điểm của kết cấu và miền tần số của đáp ứng trở kháng được khảo sát. Việc khảo sát nhiều chỉ số đánh giá hư hỏng cùng lúc là nhằm tìm ra chỉ số có độ nhạy tốt đối với sự xuất hiện của tổn hao lực ứng suất trước trong dầm.

$$CC = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(\omega_i) - \overline{Z^*})(Z(\omega_i) - \overline{Z})}{\sigma_{Z^*} \sigma_Z} \quad (4)$$

$$CCD = 1 - \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(\omega_i) - \overline{Z^*})(Z(\omega_i) - \overline{Z})}{\sigma_{Z^*} \sigma_Z} \quad (5)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z^*(\omega_i) - Z(\omega_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Z(\omega_i)]^2}} \quad (6)$$

$$MAPD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Z^*(\omega_i) - Z(\omega_i)}{Z(\omega_i)} \right| \quad (7)$$

trong đó  $Z(\omega_i)$  và  $Z^*(\omega_i)$  là đáp ứng trở kháng của hai trạng thái được khảo sát, trước và sau khi xuất hiện hư hỏng, tương ứng với tần số thứ  $i$ ;  $n$  là số điểm tần số trong miền khảo sát;  $\overline{Z}$  và  $\overline{Z^*}$  là giá trị trung bình của hai đáp ứng trở kháng tương ứng;  $\sigma_{Z^*}$  và  $\sigma_Z$  là độ lệch chuẩn của hai đáp ứng trở kháng tương ứng.

Đối với chỉ số CC, nếu giá trị nhỏ hơn 1 thì kết cấu có xuất hiện hư hỏng và ngược lại nếu giá trị bằng 1 thì kết cấu không xuất hiện hư hỏng. Đối với các chỉ số CCD, RMSD, MAPD, nếu giá trị lớn hơn 0 thì kết cấu có xuất hiện hư hỏng và ngược lại nếu giá trị bằng 0 thì kết cấu không xuất hiện hư hỏng.

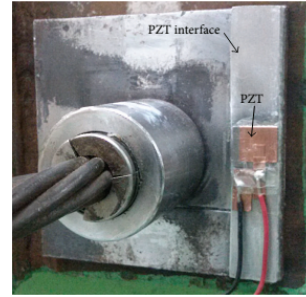
## 3. Mô phỏng số cho vùng neo cáp

Một vùng neo cáp của dầm bê tông cốt thép ứng suất trước được chọn để mô phỏng trong nghiên cứu này. Chi tiết thực tế của vùng neo cáp được thể hiện trên Hình 2 [10]. Trong đó, tấm tương tác bằng nhôm có kích thước  $100 \times 18 \times 6$  mm, bị khuyết lỗ  $30 \times 18 \times 1$  mm, được đặt lên bản neo bằng thép có kích thước  $100 \times 100 \times 10$  mm. Đầu neo bằng thép có đường kính ngoài  $D = 45$  mm, đường kính trong  $d = 15,2$  mm. Cảm biến PZT-5A có kích thước  $15 \times 15 \times 0,51$  mm được dán lên trên tấm tương tác. Điện áp được kích thích điều hòa với hiệu điện thế 1 V. Đặc trưng của vật liệu sử dụng được

cho trong Bảng 1 và Bảng 2 [13]. Các trường hợp tổn hao lực ứng suất trước được liệt kê ở Bảng 3. Đáp ứng trở kháng từ mô phỏng được so sánh với kết quả thực nghiệm tương ứng trong [10] để minh chứng tính chính xác và tính khả thi của mô phỏng số.

Bảng 1. Đặc trưng vật liệu của vùng neo cáp [13]

Đặc trưng	Tấm tương tác	Bản neo và đầu neo
Mô đun đàn hồi $E$ (N/m <sup>2</sup> )	$70 \times 10^9$	$200 \times 10^9$
Khối lượng riêng $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2700	7850
Hệ số Poisson $\nu$	0,33	0,3
Hệ số mất mát cản $\eta$	0,001	0,02



Hình 2. Mô hình thí nghiệm vùng neo cáp [10]

Bảng 2. Đặc trưng vật liệu của PZT-5A [13]

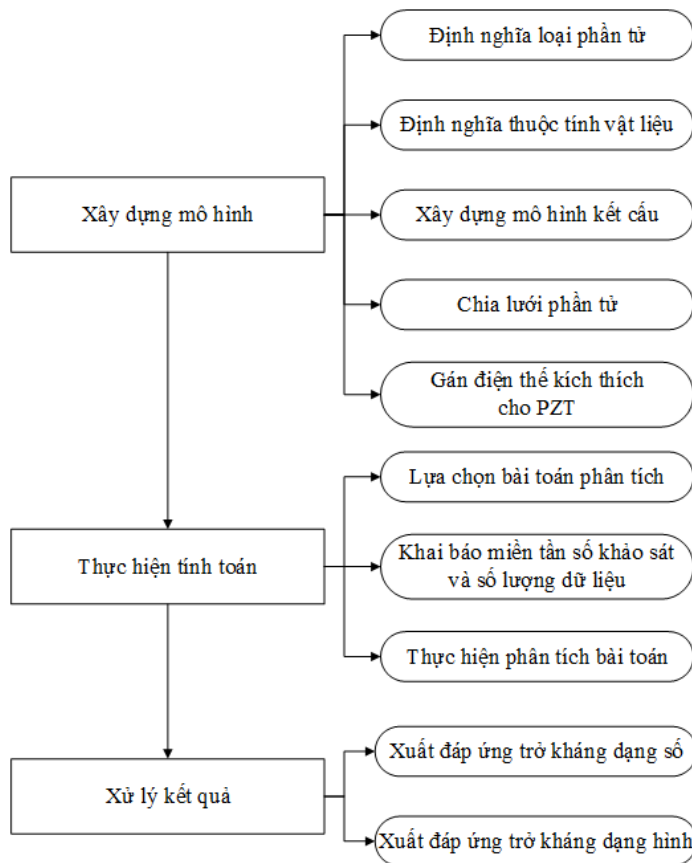
Đặc trưng	Giá trị
Biến dạng đàn hồi $s_{ijkl}^E$ (m <sup>2</sup> /N)	$\begin{pmatrix} 16,4 & -5,74 & -7,22 & 0 & 0 & 0 \\ -5,74 & 16,4 & -7,22 & 0 & 0 & 0 \\ -7,22 & -7,22 & 18,8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 47,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 47,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 44,3 \end{pmatrix} \times 10^{-12}$
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 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7750
Hệ số mất mát cản $\eta$	0,005
Hệ số mất mát điện môi $\delta$	0,015

Bảng 3. Các trường hợp tổn hao lực ứng suất trước

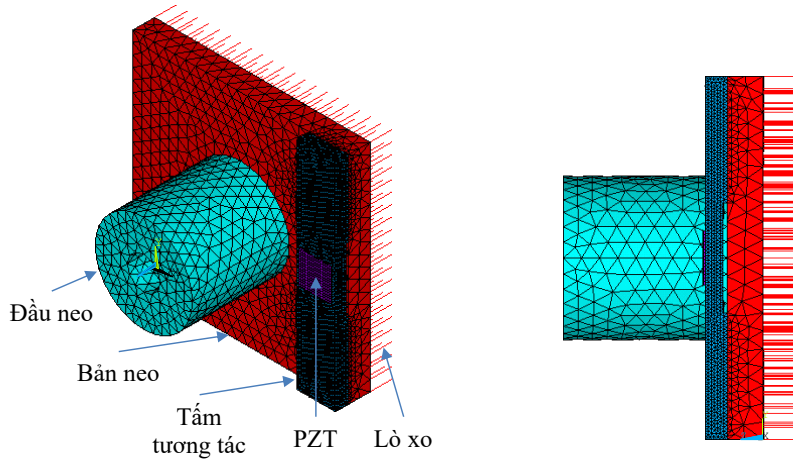
Trường hợp tổn hao	Mức độ tổn hao (%)	Lực ứng suất trước (kN)	Độ cứng lò xo (N/m)
T0	0	49,05	$120 \times 10^6$
T1	20	39,20	$105 \times 10^6$
T2	40	29,40	$90 \times 10^6$
T3	60	19,60	$75 \times 10^6$

Theo cơ chế tiếp xúc, sự tương tác tại vị trí tiếp xúc có thể được đơn giản hóa bằng hệ số cản và độ cứng của lò xo. Mặt khác, sự biến đổi của hệ số cản và độ cứng lò xo có liên quan đến sự thay đổi của áp lực tiếp xúc [14]. Do đó, sự thay đổi của lực ứng suất trước có thể được xem là sự biến đổi của các tham số kết cấu tại vị trí tiếp xúc. Theo nghiên cứu [10], lực ứng suất trước được mô hình hóa thông qua độ cứng lò xo. Khi kết cấu bị hư hỏng, lực ứng suất trước giảm, đồng nghĩa với việc độ cứng lò xo bị giảm đi tương ứng. Vì vậy, đáp ứng trở kháng của kết cấu sẽ thay đổi theo độ cứng lò xo tại vị trí tiếp xúc. Trong mô hình, độ cứng lò xo tại vị trí tiếp xúc của vùng neo là một thông số chưa biết và không chắc chắn. Trong nghiên cứu này, giá trị độ cứng lò xo được xác định bằng cách sử dụng phương pháp thử dần (trial and error), so sánh với đáp ứng trở kháng từ thực nghiệm cho trường hợp không tổn hao (T0) và tổn hao lớn nhất (T3). Từ đó, phương pháp nội suy tuyến tính được sử dụng để xác định giá trị độ cứng lò xo cho các trường hợp tổn hao ở giữa, T1 và T2 [15].

Trong nghiên cứu này, phần mềm ANSYS APDL, có tính năng mô phỏng trở kháng cơ-điện, được sử dụng để thiết lập mô hình phần tử hữu hạn cho vùng neo cáp. Hình 3 thể hiện sơ đồ quy trình phân tích đáp ứng trở kháng trong ANSYS. Hình 4 thể hiện mô hình phần tử hữu hạn của vùng neo cáp trong ANSYS. Bản neo, đầu neo và tấm tương tác được mô hình bằng phần tử khối đặc 8 nút SOLID45. Cảm biến PZT được mô hình bằng phần tử cơ-điện 8 nút SOLID5. Hệ lò xo được mô hình bằng phần tử đàn hồi COMBIN14. Bài toán được mô phỏng với 20729 nút và 99318 phần tử, trong đó có 488 phần tử COMBIN14.

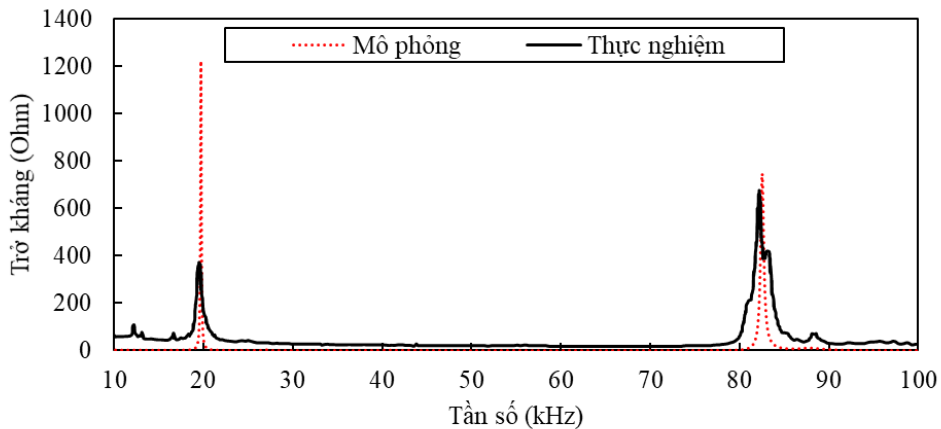


Hình 3. Sơ đồ quy trình phân tích đáp ứng trở kháng trong ANSYS APDL



Hình 4. Mô hình phần tử hữu hạn vùng neo cáp

Từ mô hình phần tử hữu hạn, các đáp ứng trở kháng của vùng neo cáp được phân tích. Hình 5 thể hiện đáp ứng trở kháng của trường hợp không tổn hao T0 trong miền tần số từ 10 kHz đến 100 kHz. Kết quả đáp ứng trở kháng từ mô phỏng số rất phù hợp với kết quả thực nghiệm trong công bố [10]. Đáp ứng trở kháng có hai đỉnh cộng hưởng trong miền tần số từ 15 kHz đến 25 kHz và từ 77 kHz đến 87 kHz. Về hình dạng, đáp ứng trở kháng từ mô phỏng có chút khác biệt so với đáp ứng trở kháng từ thực nghiệm. Điều này là do sự nhiễu tín hiệu. Nguyên nhân gây nhiễu tín hiệu trong thực nghiệm là do các yếu tố ảnh hưởng như: nhiệt độ, gió, ánh sáng, sóng điện từ, dây dẫn, thiết bị, người làm thí nghiệm, ... Trong khi đó, đáp ứng trở kháng trong mô phỏng thì phụ thuộc vào hình dạng và số lượng phần tử được chia lưới trong mô hình phần tử hữu hạn, đặc biệt là cho vùng có cảm biến PZT.



Hình 5. Đáp ứng trở kháng của trường hợp T0

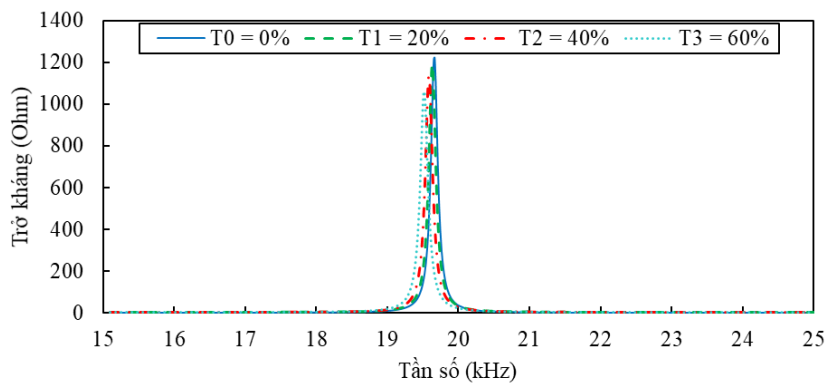
Các kết quả so sánh đỉnh trở kháng giữa mô phỏng và thực nghiệm tương ứng với 4 trường hợp tổn hao được tổng hợp trong Bảng 4. Đối với đỉnh tần số cộng hưởng thứ nhất trong miền từ 15 kHz đến 25 kHz, chênh lệch tần số giữa mô phỏng và thực nghiệm rất nhỏ, dao động từ 0 đến 0,2%. Đối với đỉnh tần số cộng hưởng thứ hai trong miền từ 77 kHz đến 87 kHz, chênh lệch tần số giữa mô phỏng và thực nghiệm dao động từ 0,3 đến 0,6%. Như vậy, chênh lệch kết quả giữa mô phỏng và thực nghiệm cho tất cả các trường hợp khảo sát là nhỏ hơn 1%. Kết quả này cho thấy mô hình phần tử hữu hạn của

vùng neo cáp có độ tin cậy rất cao và có thể được sử dụng để đại diện cho vùng neo cáp thực tế trong vấn đề chẩn đoán tổn hao lực ứng suất trước.

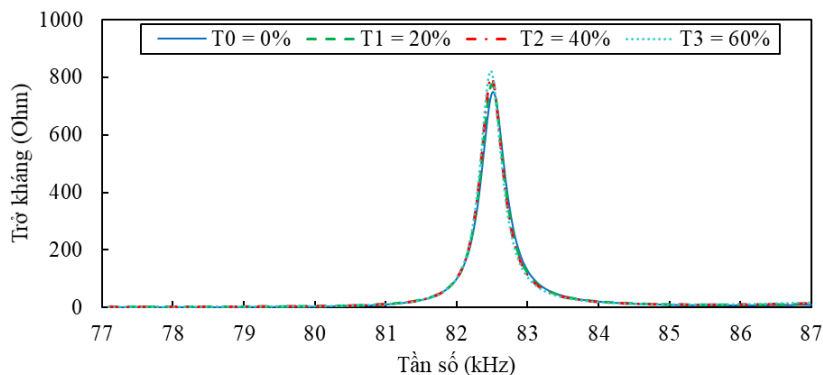
Bảng 4. Bảng so sánh đỉnh trở kháng giữa mô phỏng và thực nghiệm

Trường hợp tổn hao	Mức độ tổn hao (%)	Mô phỏng $f_1$ (kHz)	Thực nghiệm $f_1$ (kHz)	$\Delta f_1$ (%)	Mô phỏng $f_2$ (kHz)	Thực nghiệm $f_2$ (kHz)	$\Delta f_2$ (%)
T0	0	19,67	19,63	0,20	82,51	82,23	0,34
T1	20	19,63	19,63	0,00	82,50	82,15	0,43
T2	40	19,58	19,57	0,05	82,49	82,03	0,56
T3	60	19,52	19,53	0,05	82,48	-	-

Hình 6 và Hình 7 thể hiện đáp ứng trở kháng từ mô phỏng trong miền tần số từ 15 kHz đến 25 kHz và từ 77 kHz đến 87 kHz cho bốn trường hợp tổn hao T0, T1, T2, T3. Khi có tổn hao lực ứng suất trước, đáp ứng trở kháng trong miền tần số từ 15 kHz đến 25 kHz nhạy hơn so với trong miền tần số từ 77 kHz đến 87 kHz. Khi tổn hao lực ứng suất trước càng lớn, thì đáp ứng trở kháng có xu hướng dịch chuyển sang trái tương ứng với giá trị tần số giảm dần. Ví dụ như trường hợp không tổn hao T0 là 19,67 kHz và trường hợp tổn hao lớn nhất T3 là 19,52 kHz. Tuy nhiên, độ giảm của tần số là không đáng kể (nhỏ hơn 1%). Cho nên, độ giảm tần số của đáp ứng trở kháng ít được sử dụng để cảnh báo sự xuất hiện của hư hỏng, mà phải sử dụng đến các chỉ số đánh giá hư hỏng khác.



Hình 6. Đáp ứng trở kháng mô phỏng từ 15 kHz đến 25 kHz

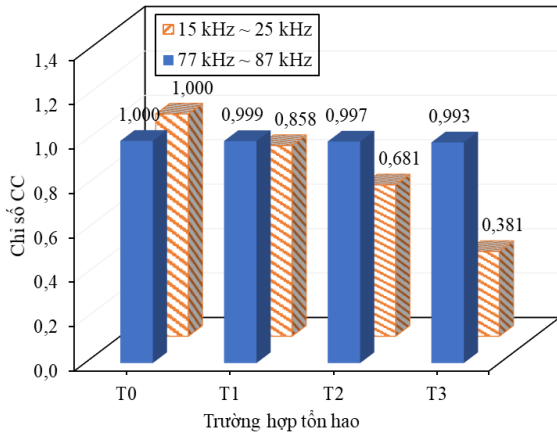


Hình 7. Đáp ứng trở kháng mô phỏng từ 77 kHz đến 87 kHz

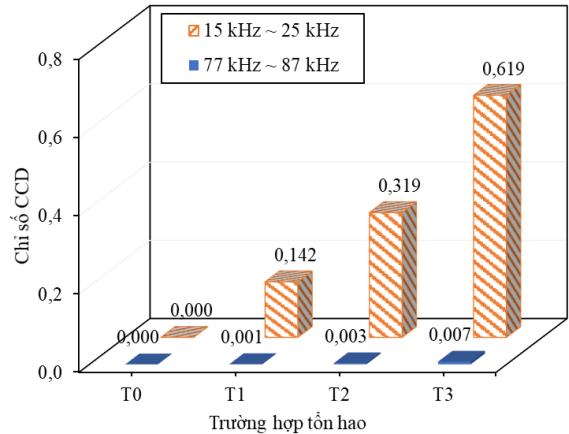


#### 4. Xác định các chỉ số đánh giá tổn hao lực ứng suất trước

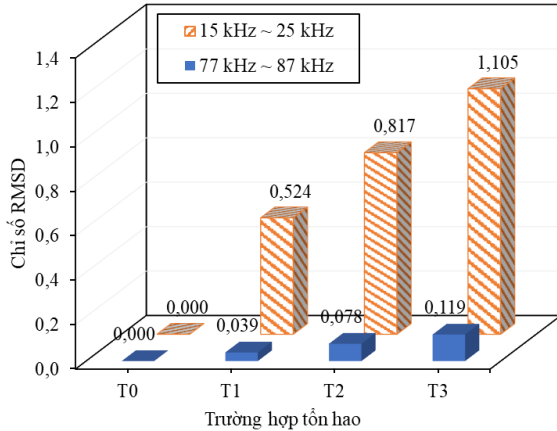
Theo mục 2.2, các chỉ số đánh giá tổn hao lực ứng suất trước CC, CCD, RMSD, MAPD được xác định theo các công thức tương ứng từ (4) đến (7), với dữ liệu đầu vào là các đáp ứng trở kháng có được từ mô phỏng. Kết quả tính toán các chỉ số đánh giá được trình bày trên Hình 8 đến Hình 11 và tổng hợp trong Bảng 5 và Bảng 6 cho hai miền tần số khảo sát (từ 15 kHz đến 25 kHz và từ 77 kHz đến 87 kHz).



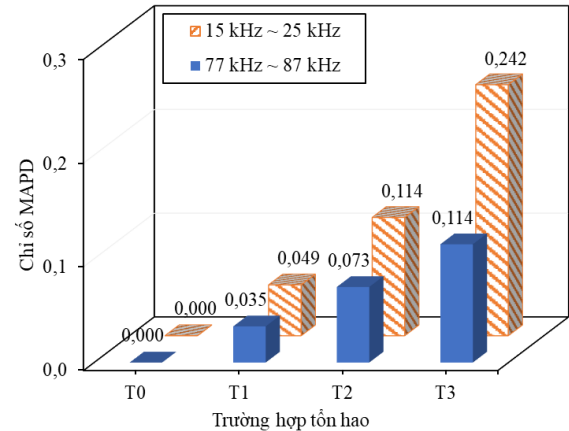
Hình 8. Chỉ số CC



Hình 9. Chỉ số CCD



Hình 10. Chỉ số RMSD



Hình 11. Chỉ số MAPD

Bảng 5. Tổng hợp các chỉ số đánh giá trong miền tần số từ 15 kHz đến 25 kHz

Trường hợp tổn hao	CC	CCD	RMSD	MAPD
T0	1,000	0,000	0,000	0,000
T1	0,858	0,142	0,524	0,049
T2	0,681	0,319	0,817	0,114
T3	0,381	0,619	1,105	0,242

Bảng 6. Tổng hợp các chỉ số đánh giá trong miền tần số từ 77 kHz đến 87 kHz

Trường hợp tổn hao	CC	CCD	RMSD	MAPD
T0	1,000	0,000	0,000	0,000
T1	0,999	0,001	0,039	0,035
T2	0,997	0,003	0,078	0,073
T3	0,993	0,007	0,119	0,114

Nhìn chung, các chỉ số đánh giá đều phản ánh đúng đắn sự làm việc của kết cấu vùng neo cáp. Đối với chỉ số CC, giá trị nhỏ hơn 1 cho trường hợp có tổn hao lực ứng suất trước và ngược lại giá trị bằng 1 cho trường hợp không có tổn hao lực ứng suất trước. Trong khi đó, đối với các chỉ số CCD, RMSD, MAPD, giá trị lớn hơn 0 cho trường hợp có tổn hao lực ứng suất trước và ngược lại giá trị bằng 0 cho trường hợp không có tổn hao lực ứng suất trước. Như vậy, sự xuất hiện của tổn hao lực ứng suất trước trong vùng neo cáp được chẩn đoán thành công khi sử dụng các chỉ số đánh giá của phương pháp trở kháng.

Trong miền tần số từ 15 kHz đến 25 kHz, chỉ số RMSD có độ nhạy đối với tổn hao cao hơn ba chỉ số còn lại; giá trị RMSD đạt 0,524 đối với trường hợp tổn hao nhỏ nhất  $T1 = 20\%$ . Trong miền tần số từ 77 kHz đến 87 kHz, chỉ số RMSD cũng thể hiện sự hiệu quả hơn khi có giá trị đạt 0,039 đối với trường hợp tổn hao nhỏ nhất  $T1 = 20\%$ . Khi mức độ tổn hao tăng dần, đồng nghĩa với lực ứng suất trước giảm dần, chỉ số CC có xu hướng giảm dần và các chỉ số CCD, RMSD, MAPD có xu hướng tăng dần. Theo kết quả thể hiện trên Hình 8, chỉ số CC kém hiệu quả trong việc chẩn đoán tổn hao lực ứng suất trước; đặc biệt là cho miền tần số từ 77 kHz đến 87 kHz, chỉ số CC hầu như không thay đổi khi tổn hao lực ứng suất trước tăng dần. Ba chỉ số CCD, RMSD, MAPD có hiệu quả khá tốt đối với việc chẩn đoán tổn hao lực ứng suất trước. Các chỉ số tăng dần đồng bộ khi tổn hao lực ứng suất trước tăng dần. Tuy nhiên, nếu so sánh với miền tần số từ 15 kHz đến 25 kHz, chỉ số CCD chỉ đạt khoảng 1% và chỉ số RMSD đạt khoảng 10% trong miền tần số từ 77 kHz đến 87 kHz. Trong khi đó, chỉ số MAPD chênh lệch không đáng kể khi so sánh giữa hai miền tần số khảo sát.

## 5. Kết luận

Nghiên cứu này đã phát triển thành công một mô hình phần tử hữu hạn cho việc chẩn đoán tổn hao lực ứng suất trước trong vùng neo cáp sử dụng đáp ứng trở kháng cơ-điện. Mô hình phân tích đáp ứng trở kháng trong phần mềm ANSYS có độ tin cậy cao. Kết quả phân tích từ mô phỏng số rất phù hợp với kết quả thực nghiệm. Bốn chỉ số đánh giá dựa vào sự thay đổi của đáp ứng trở kháng đều có khả năng phát hiện tổn hao lực ứng suất trước trong vùng neo cáp. Mỗi chỉ số có độ nhạy khác nhau đối với tổn hao lực ứng suất trước và tùy thuộc vào miền tần số khảo sát. Ba chỉ số CCD, RMSD, MAPD cho kết quả chẩn đoán tổn hao lực ứng suất trước tốt hơn chỉ số CC. Như vậy, phương pháp trở kháng có tính khả thi, hiệu quả và tiềm năng để ứng dụng vào các bài toán chẩn đoán sự xuất hiện của hư hỏng cho các kết cấu công trình trong thực tế. Thêm vào đó, phương pháp trở kháng có thể kết hợp với các thuật toán trí tuệ nhân tạo (học máy, mạng nơ-ron nhân tạo, thuật toán di truyền, ...) để chẩn đoán chính xác mức độ của hư hỏng trong kết cấu.

## 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] Balageas, D., Fritzen, C.-P., Güemes, A. (2010). *Structural health monitoring*. John Wiley & Sons.
- [2] Hung, D. V., Hung, H. M., Anh, P. H., Thang, N. T. (2020). [Structural damage detection using hybrid deep learning algorithm](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 14(2): 53–64.

- [3] Liang, C., Sun, F. P., Rogers, C. A. (1997). [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*, 8(4):335–343.
- [4] 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.
- [5] Raju, V. (1998). *Implementing impedance-based health monitoring technique*. Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- [6] Zagrai, A. N., Giurgiutiu, V. (2001). [Electro-mechanical impedance method for crack detection in thin plates](#). *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 12(10):709–718.
- [7] 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.
- [8] Park, S., Yun, C.-B., Roh, Y., Lee, J.-J. (2005). [Health monitoring of steel structures using impedance of thickness modes at PZT patches](#). *Smart Structures and Systems*, 1(4):339–353.
- [9] Park, S., Ahmad, S., Yun, C.-B., Roh, Y. (2006). [Multiple crack detection of concrete structures using impedance-based structural health monitoring techniques](#). *Experimental Mechanics*, 46(5):609–618.
- [10] Huynh, T.-C., Kim, J.-T. (2014). [Impedance-based cable force monitoring in tendon-anchorage using portable PZT-interface technique](#). *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- [11] Li, W., Fan, S., Ho, S. C. M., Wu, J., Song, G. (2018). [Interfacial debonding detection in fiber-reinforced polymer rebar-reinforced concrete using electro-mechanical impedance technique](#). *Structural Health Monitoring*, 17(3):461–471.
- [12] Bhalla, S., Kiong Soh, C. (2003). [Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers](#). *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32(12):1897–1916.
- [13] Huynh, T.-C., Park, Y.-H., Park, J.-H., Kim, J.-T. (2015). [Feasibility verification of mountable PZT-interface for impedance monitoring in tendon-anchorage](#). *Shock and Vibration*, 2015.
- [14] Johnson, K. L., Johnson, K. L. (1987). *Contact mechanics*. Cambridge University Press.
- [15] Ritdumrongkul, S., Abe, M., Fujino, Y., Miyashita, T. (2003). [Quantitative health monitoring of bolted joints using a piezoceramic actuator-sensor](#). *Smart Materials and Structures*, 13(1):20.