

# CHẨN ĐOÁN VẾT NÚT TRONG KẾT CẤU TẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG CÁC ĐẶC TRƯNG DAO ĐỘNG

Lê Thanh Cao<sup>a</sup>, Bạch Văn Sỹ<sup>a,b</sup>, Phạm Bá Linh<sup>a</sup>, Nguyễn Hữu Diệu<sup>a</sup>, Hồ Đức Duy<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>Khoa Xây dựng, Trường Đại học Nha Trang,

02 Nguyễn Đình Chiểu, Phường Vĩnh Thọ, Thành phố Nha Trang, Tỉnh Khánh Hòa, Việt Nam

<sup>b</sup>Khoa Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM,

268 Lý Thường Kiệt, Quận 10, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 27/4/2024, Sửa xong 18/6/2024, Chấp nhận đăng 17/7/2024

## Tóm tắt

Bài báo này đề xuất ba phương pháp dựa vào sự thay đổi của các đặc trưng dao động, bao gồm: tần số dao động, dạng dao động và năng lượng biến dạng để xác định sự xuất hiện, vị trí và sự phát triển của vết nứt trong kết cấu sàn bê tông cốt thép. Các đặc trưng dao động của kết cấu tấm trước và sau khi xuất hiện hư hỏng được trích xuất từ kết quả phân tích dao động để làm dữ liệu đầu vào cho việc chẩn đoán hư hỏng. Một tấm sàn bê tông cốt thép được sử dụng để kiểm chứng hiệu quả của phương pháp đề xuất với nhiều cấp tải tác dụng khác nhau. Trong đó, ứng xử phi tuyến của vật liệu được kể đến trong quá trình phân tích hư hỏng của kết cấu. Kết quả chẩn đoán cho thấy tần số và dạng dao động có thể chẩn đoán được sự xuất hiện của hư hỏng trong kết cấu tấm bê tông cốt thép. Đáng chú ý, phương pháp năng lượng biến dạng xác định được sự xuất hiện cũng như vị trí hư hỏng ngay cả khi tấm làm việc sau giai đoạn đàn hồi với độ chính xác cao.

*Từ khóa:* chẩn đoán hư hỏng; đặc trưng dao động; năng lượng biến dạng; sau đàn hồi; tấm bê tông cốt thép.

## CRACK DETECTION IN REINFORCED CONCRETE SLABS USING VIBRATION CHARACTERISTICS

### Abstract

This paper proposes three vibration-based methods for identifying the occurrence, location and distribution of cracks in reinforced concrete slabs. The vibration characteristics of both intact and cracked slabs are acquired from modal analysis to identify the damages. A reinforced concrete slab is used to verify the effectiveness of the proposed procedure with several load cases. In particular, the materials' nonlinear behavior is considered during the crack analysis process of the slab. The outcomes indicate that the natural frequency and mode shape can detect the occurrence of cracks in the slab. Significantly, the modal strain energy method identifies the occurrence and the location of cracks, even when the slab works after the post-elastic stage with high accuracy.

*Keywords:* crack detection; vibration characteristics; modal strain energy; nonlinear; reinforced concrete slab.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(3V\)-05](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(3V)-05) © 2024 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

## 1. Giới thiệu

Tấm sàn bê tông cốt thép là một dạng kết cấu quan trọng trong các kết cấu xây dựng, có vai trò tiếp nhận tải trọng đứng và truyền lên các cấu kiện dầm, cột. Trong quá trình sử dụng, sàn thường bị nứt ở vùng bê tông chịu kéo ở cấp tải tương đối nhỏ do khả năng chịu kéo thấp của vật liệu bê tông. Khi số lượng các vết nứt ít, bề rộng nhỏ thì sàn vẫn bảo đảm điều kiện làm việc bình thường. Tuy nhiên, khi tải trọng tăng lên, các vết nứt mở rộng bề rộng và lan rộng trong sàn, làm ảnh hưởng đến sự làm việc bình thường của kết cấu sàn. Về lâu dài, các vết nứt trong sàn còn làm cốt thép bị giảm cường độ do tác động của môi trường, từ đó ảnh hưởng đến độ bền của kết cấu. Do đó, việc xác định sự xuất hiện, vị trí cũng như sự phát triển các vết nứt trong sàn đóng vai trò quan trọng trong việc đảm

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

bảo sự làm việc an toàn, sử dụng bình thường và tuổi thọ lâu dài của kết cấu sàn dưới các điều kiện tải trọng khác nhau [1].

Trong số các phương pháp xác định hư hỏng thì phương pháp dựa vào các đặc trưng dao động được chú trọng nghiên cứu nhờ những ưu thế nổi trội như sử dụng các kỹ thuật không phá hủy, có độ nhạy cao; đồng thời có thể xác định được hư hỏng tổng thể trong kết cấu cũng như xác định được các hư hỏng cục bộ. Ngoài ra, việc thu thập dữ liệu dao động được thực hiện đơn giản, chi phí hợp lý nhờ các đầu đo thông dụng như gia tốc kế [2]. Nguyên lý chung của các phương pháp xác định hư hỏng dựa vào kết quả dao động là so sánh các đặc trưng dao động của kết cấu ở trạng thái hiện tại với trạng thái cơ sở. Trạng thái cơ sở là trạng thái ban đầu (nguyên dạng, chưa hư hỏng) hoặc trạng thái ở một thời điểm xác định. Dựa vào sự thay đổi đặc trưng dao động, các thuật toán có thể đưa ra các chẩn đoán về sự xuất hiện, vị trí và mức độ hư hỏng của kết cấu [2, 3].

Có nhiều nghiên cứu sử dụng các đặc trưng dao động để xác định hư hỏng được thực hiện trên kết cấu tấm được chế tạo bằng các loại vật liệu khác nhau như tấm thép, tấm nhôm hoặc tấm nhiều lớp, và các phương pháp này cho thấy tính hiệu quả trong việc xác định hư hỏng [4-7]. Trong các nghiên cứu này, các vật liệu chế tạo tấm được phân tích ở giai đoạn làm việc đàn hồi. Khi đó, các đặc trưng động học của kết cấu được giả định không thay đổi theo độ lớn của lực tác dụng. Đối với kết cấu bê tông cốt thép, khi gia tăng tải tác dụng trong kết cấu xuất hiện các vết nứt. Các vết nứt làm thay đổi các đặc trưng hình học và độ cứng của kết cấu, từ đó làm thay đổi các đặc trưng dao động của kết cấu [3]. Do đó, nếu sử dụng mô hình dao động tuyến tính thì ứng xử phi tuyến của vật liệu có thể gây trở ngại cho việc xác định và khoanh vùng hư hỏng [8, 9]. Một số nghiên cứu trên kết cấu dầm bê tông cốt thép cho thấy sự làm việc sau đàn hồi của vật liệu ảnh hưởng đến kết quả chẩn đoán hư hỏng so với việc sử dụng mô hình tuyến tính. Ngoài ra, việc sử dụng mô hình vết nứt đóng và mở không thích hợp để mô phỏng ứng xử phi tuyến của kết cấu [10]. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu khảo sát hiệu quả của phương pháp xác định hư hỏng khi kết cấu tấm làm việc sau giai đoạn đàn hồi của vật liệu.

Mục tiêu của nghiên cứu này nhằm đánh giá tính hiệu quả của các phương pháp dựa vào đặc trưng dao động trong việc xác định sự xuất hiện và phát triển của vết nứt trong kết cấu tấm làm việc sau giai đoạn đàn hồi. Điểm mới của nghiên cứu này là xem xét được ảnh hưởng của vết nứt trong kết cấu đến đặc trưng dao động của kết cấu. Từ đó, hiệu quả chẩn đoán hư hỏng trên kết cấu tấm ở các cấp tải khác nhau được nâng cao. Một bài toán mô phỏng số được thực hiện trên tấm sàn bê tông cốt thép chịu tác dụng của tải trọng phân bố đều để kiểm chứng hiệu quả của phương pháp đề xuất. Tấm được mô hình và phân tích bằng phần mềm ANSYS, trong đó có xét đến mô hình ứng xử phi tuyến của vật liệu bê tông và cốt thép. Phương pháp đề xuất sử dụng các đặc trưng dao động phổ biến như tần số dao động, dạng dao động và năng lượng biến dạng của một số dạng dao động đầu tiên để xác định hư hỏng.

## 2. Cơ sở lý thuyết

### 2.1. Phương pháp chẩn đoán hư hỏng kết cấu dựa trên sự thay đổi tần số dao động

Xét một kết cấu tấm dao động tự do không cản, khi đó phương trình phân tích dao động kết cấu tấm được cho theo phương trình sau:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{d}(t) = 0 \quad (1)$$

trong đó  $\mathbf{d}(t)$  và  $\dot{\mathbf{d}}(t)$  lần lượt là véc-tơ chuyển vị và véc-tơ gia tốc của tất cả các nút trong miền bài toán;  $\mathbf{K}$  và  $\mathbf{M}$  lần lượt là ma trận độ cứng tổng thể và ma trận khối lượng tổng thể ghép nối từ các ma trận phần tử. Với giả định phương trình dao động có dạng hình sin, tần số dao động riêng,  $\omega$  được xác định bằng việc giải phương trình đặc trưng:

$$|\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M}| = 0 \quad (2)$$

Các vết nứt hay hư hỏng làm giảm độ cứng của kết cấu, từ đó làm giảm tần số dao động của kết cấu. Đây chính là cơ sở của phương pháp chẩn đoán sự xuất hiện của hư hỏng dựa trên độ giảm tần số dao động:

$$\Delta f = \frac{f - f^*}{f} * 100 \quad (3)$$

trong đó  $\Delta f$  là độ giảm tần số của tấm ở trạng thái đang xét với tấm ban đầu (%);  $f$  là tần số dao động của tấm ở trạng thái ban đầu (Hz);  $f^*$  là tần số dao động của tấm ở trạng thái đang xét (Hz).

## 2.2. Phương pháp chẩn đoán hư hỏng kết cấu dựa trên sự thay đổi dạng dao động

Giả sử có hai tập hợp véc-tơ dạng dao động với kích thước từng véc-tơ là bằng nhau:  $\Phi^A$  có  $n$  dạng dao động và  $\Phi^B$  có  $m$  dạng dao động. Để xác định tính tương quan giữa véc-tơ dạng dao động thứ  $i$  của tập hợp véc-tơ  $A$ , ký hiệu là  $\{\Phi_i^A\}$  và thứ  $j$  của tập hợp véc-tơ  $B$ , ký hiệu là  $\{\Phi_j^B\}$ , tiêu chuẩn so sánh các dao động, gọi tắt là chỉ tiêu MAC (Modal assurance criteria) được tính toán như sau [11]:

$$MAC(i, j) = \frac{\left| \left\{ \Phi_i^A \right\}^T \left\{ \Phi_j^B \right\} \right|^2}{\left( \left\{ \Phi_i^A \right\}^T \left\{ \Phi_i^A \right\} \right) \left( \left\{ \Phi_j^B \right\}^T \left\{ \Phi_j^B \right\} \right)} \quad (4)$$

MAC là một đại lượng vô hướng có độ lớn thay đổi từ 0 đến 1. Khi giá trị MAC bằng 1 thì hai dạng dao động tương quan hoàn toàn. Ngược lại, khi MAC bằng 0 thì hai dạng dao động hoàn toàn không tương quan. Trong lĩnh vực chẩn đoán hư hỏng, tiêu chuẩn MAC có thể được sử dụng để:

- So sánh các dạng dao động của hai tập hợp véc-tơ nhằm chọn ra các dạng dao động có hình dạng tương đồng để đưa vào thuật toán chẩn đoán.
- So sánh mức độ tương quan cùng một dạng dao động của kết cấu ở hai trạng thái để phát hiện sự xuất hiện hư hỏng và đánh giá sơ bộ mức độ hư hỏng.

Khi đó, trong công thức (4),  $A$  đại diện cho trạng thái kết cấu nguyên dạng,  $B$  là trạng thái có xuất hiện hư hỏng.  $\Phi_i^A$ ,  $\Phi_j^B$  lần lượt là véc-tơ thành phần dao động thẳng đứng của dạng dao động thứ  $i$  của tấm ở trạng thái trước hư hỏng và dạng dao động thứ  $j$  của tấm ở trạng thái hư hỏng.

## 2.3. Phương pháp chẩn đoán hư hỏng kết cấu sử dụng năng lượng biến dạng

Xét một tấm mỏng, hình chữ nhật; tấm được chia thành các phần tử như Hình 1. Tương ứng với một dạng dao động thứ  $k$ ,  $\phi_k$ , năng lượng biến dạng dao động của vùng con  $(i, j)$  được xác định như sau [12]:

$$MSE_{k,ij} = \frac{D_{ij}}{2} \int_{y_j}^{y_{j+1}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left[ \left( \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 x} \right)^2 + 2\nu \left( \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 x} \right) \left( \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 y} \right) + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (5)$$

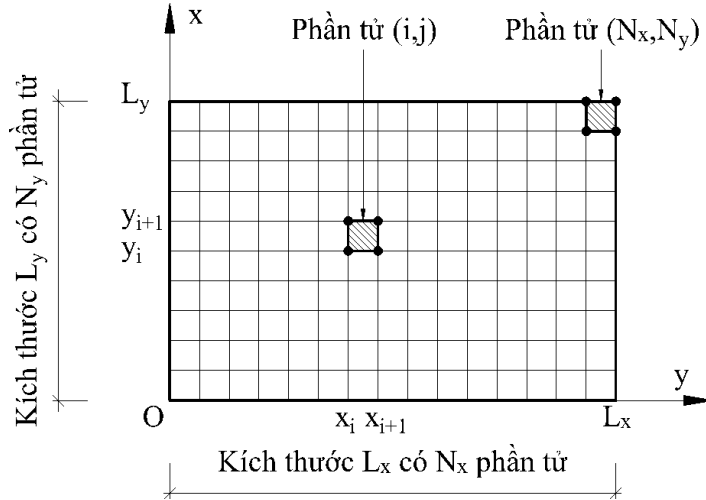
trong đó  $D_{ij}$  là độ cứng chống uốn của vùng con  $(i, j)$ ;  $\nu$  là hệ số Poisson.

Năng lượng biến dạng tổng cộng của toàn bộ tấm:

$$MSE_k = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} MSE_{k,ij} \quad (6)$$

Năng lượng biến dạng tỉ đối của vùng con thứ  $(i, j)$  được xác định như sau:

$$F_{k,ij} = \frac{MSE_{k,ij}}{MSE_k}, \quad \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} F_{k,ij} = 1 \quad (7)$$



Hình 1. Minh họa lưới phần tử tam hình chữ nhật

Khi xét  $m$  dạng dao động, trong tính toán, chỉ số hư hỏng trong vùng con  $(i, j)$  được định nghĩa là:

$$\beta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}^*}{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}} \quad (8)$$

trong đó ký hiệu “\*” tương ứng với kết cấu ở trạng thái sau khi xuất hiện hư hỏng.

Chỉ số hư hỏng được chuẩn hóa theo công thức:

$$MSEDI_{ij} = \frac{\beta_{ij} - \bar{\beta}}{\sigma} \quad (9)$$

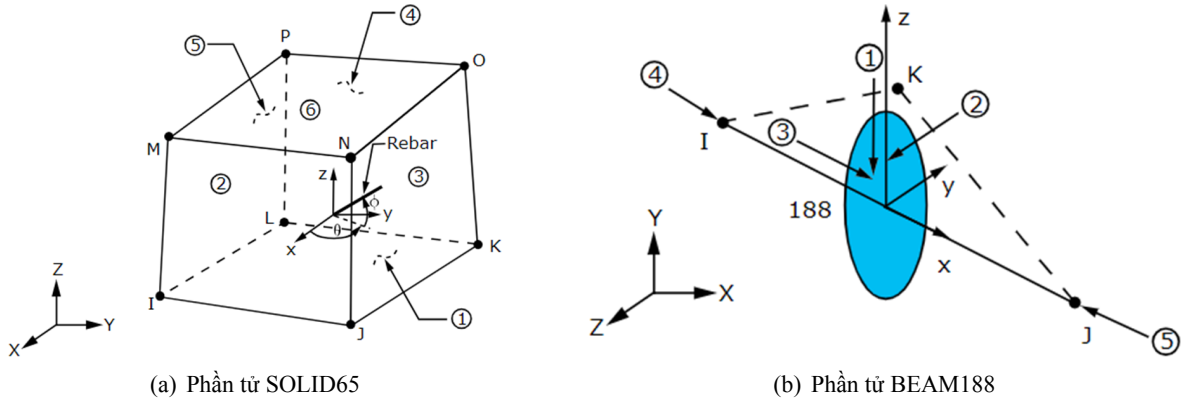
trong đó  $\bar{\beta}$ ,  $\sigma$  lần lượt là giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của các chỉ số hư hỏng.

Giá trị  $MSEDI_{ij}$  được sử dụng để chẩn đoán vị trí phần tử xuất hiện hư hỏng trong kết cấu tấm. Trong công thức tính năng lượng biến dạng (5) xuất hiện giá trị đạo hàm bậc hai của dạng dao động theo hai biến  $x$  và  $y$ . Phương pháp sai phân trung tâm được sử dụng để xác định các giá trị này [13]. Chỉ số hư hỏng được so sánh với ngưỡng hư hỏng để xác định một phần tử là hư hỏng hay chưa. Ngưỡng hư hỏng xác định bằng tỷ lệ phần trăm giá trị chỉ số hư hỏng lớn nhất trên toàn tấm,  $MSEDI_{\max}$ . Nếu chỉ số hư hỏng của một phần tử lớn hơn hoặc bằng ngưỡng hư hỏng, phần tử đó được xem là hư hỏng. Ngược lại, phần tử chưa hư hỏng [13].

#### 2.4. Ứng xử phi tuyến của vật liệu

##### a. Mô hình phần tử hữu hạn kết cấu tấm sàn bê tông cốt thép

Kết cấu bê tông cốt thép có ứng xử phi tuyến dưới tác dụng của tải trọng. Trong nghiên cứu này, phần mềm ANSYS APDL được sử dụng để phân tích ứng xử kết cấu bằng các phần tử có khả năng mô phỏng quan hệ ứng suất-biến dạng phi tuyến của vật liệu bê tông và cốt thép. Trong ANSYS APDL, phần tử bê tông được mô hình bằng phần tử ba chiều SOLID65. Phần tử khối này có tám nút, mỗi nút có ba bậc tự do là chuyển vị theo ba phương  $x, y, z$  (Hình 2). SOLID65 có thể mô phỏng biến dạng dẻo, mô phỏng nứt theo ba phương vuông góc khi chịu ứng suất kéo và mô phỏng nén vỡ khi chịu ứng suất nén.



Hình 2. Dạng hình học phần tử

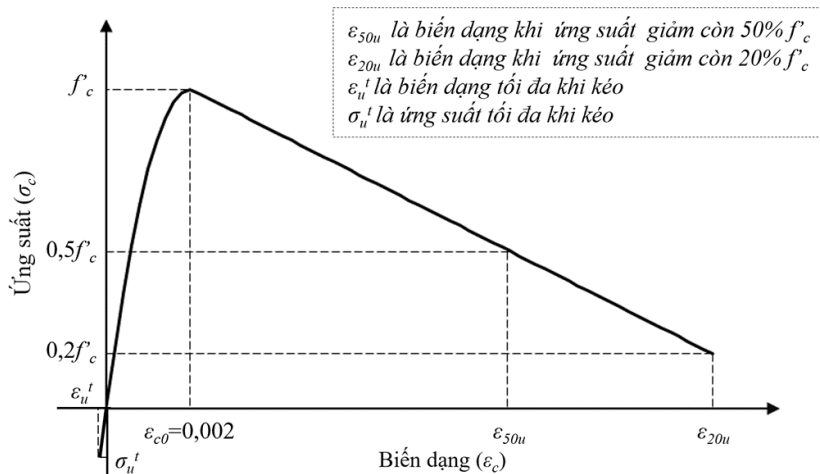
Cốt thép dọc và cốt thép đai trong cấu kiện bê tông cốt thép được mô phỏng bằng phần tử BEAM188 (Hình 2). Phần tử BEAM188 có hai nút, mỗi nút có sáu bậc tự do cơ bản và một bậc tự do tùy chọn. Sáu bậc tự do cơ bản là chuyển vị theo ba phương  $x, y, z$  và góc xoay quanh ba trục  $x, y, z$ . Bậc tự do tùy chọn thứ bảy là độ cong vênh. Sử dụng phần tử BEAM188 có thể mô phỏng được vật liệu tuyến tính và phi tuyến, đồng thời có thể gán tiết diện cho phần tử.

#### b. Ứng xử của vật liệu bê tông

Có nhiều mô hình vật liệu bê tông khác nhau, ví dụ mô hình của Desayi [14], Kachlakev [15]. Trong nghiên cứu này, quan hệ ứng suất-biến dạng của bê tông được lấy theo mô hình Kent-Park [16]. Đường cong ứng xử nén của bê tông ở giai đoạn trước khi chảy dẻo có dạng parabol như minh họa ở Hình 3 và được đặc trưng bởi công thức sau:

$$f_c = f'_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (10)$$

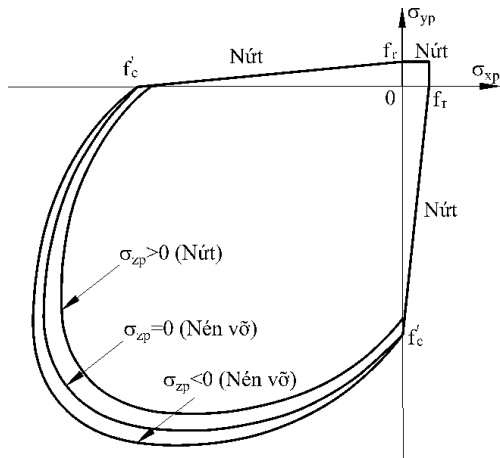
trong đó  $\varepsilon_c$  là biến dạng của phần tử bê tông;  $\varepsilon_0$  là biến dạng tại ứng suất nén tối đa  $f'_c$ , có giá trị  $\varepsilon_0 = 0,002$ ;  $f_c$  là ứng suất nén tại  $\varepsilon_c$  tương ứng (MPa).



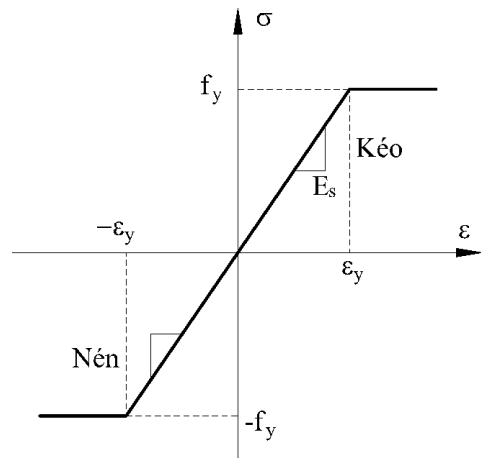
Hình 3. Quan hệ ứng suất-biến dạng trong bê tông theo mô hình Kent-Park trường hợp tải đơn điệu

Mô hình ứng xử kéo của vật liệu bê tông sử dụng mô hình tuyến tính có kể đến ứng xử của phần tử bê tông sau khi bị nứt. Cường độ chịu kéo nhập vào mô hình là cường độ chịu kéo khi uốn  $f_r$ , với giá trị được tính theo tiêu chuẩn ACI 318-02.

Phần tử SOLID65 có thể mô phỏng trạng thái nén vỡ và nứt cho vật liệu bê tông theo mô hình William và Warnke [17]. Hình 4 biểu diễn bề mặt phá hủy ba chiều của bê tông được chiếu lên mặt phẳng  $\sigma_{xp}-\sigma_{yp}$ . Các chế độ phá hủy là hàm số của ứng suất chính theo phương  $z$ ,  $\sigma_{zp}$ . Trong phần tử bê tông, nứt xảy ra khi ứng suất kéo tại bất kỳ phương nào nằm ngoài bề mặt phá hủy. Sau khi nứt, mô đun đàn hồi của phần tử bê tông bị thay đổi thành 0 theo phương ứng suất kéo gây nứt. Hiện tượng nén vỡ xảy ra khi ứng suất chính tất cả các phương đều là nén và nằm ngoài bề mặt phá hủy. Sau khi nén vỡ, mô đun đàn hồi của phần tử bê tông bị thay đổi thành 0 theo tất cả các phương và phần tử đó được xem như không còn tham gia chịu lực.



Hình 4. Mặt phá hoại của bê tông theo mô hình William và Warnke



Hình 5. Mô hình quan hệ ứng suất-biến dạng của cốt thép

### c. Ứng xử của vật liệu cốt thép

Trong ANSYS, các thông số vật liệu của cốt thép cần được khai báo gồm có: mô đun đàn hồi  $E_s$ , ứng suất chảy dẻo  $f_y$  và hệ số Poisson  $\nu$ . Hệ số Poisson cho cốt thép được giả định là 0,3. Vật liệu cốt thép được mô phỏng là vật liệu đàn dẻo tuyệt đối có mô hình ứng suất biến dạng hai đoạn thẳng (*Bilinear Isotropic Hardening*) (Hình 5). Mô hình vật liệu này có hai giai đoạn làm việc là đàn hồi và chảy dẻo. Trong giai đoạn chảy dẻo, nghiên cứu này sử dụng giả thuyết mô đun đàn hồi của thép là 0.

### d. Mô hình liên kết giữa bê tông và cốt thép

Mô hình phần tử hữu hạn cho kết cấu sàn bê tông cốt thép được giả thuyết vật liệu bê tông và vật liệu cốt thép liên kết hoàn toàn với nhau. Mô phỏng trên được thực hiện bằng cách mô hình các nút của phần tử BEAM188 trùng với các nút của phần tử SOLID65. Khi nứt của hai loại phần tử trùng nhau, chuyển vị tại nút của hai loại phần tử được đảm bảo bằng nhau và thỏa điều kiện mô phỏng.

## 2.5. Chỉ số đánh giá kết quả chẩn đoán phần tử hư hỏng

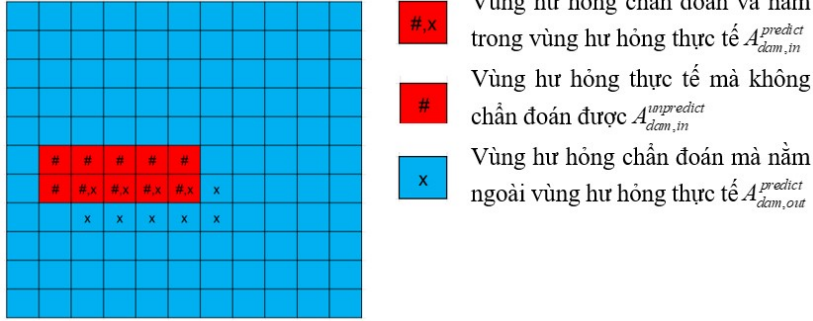
### a. Chỉ số đánh giá kết quả chẩn đoán vùng hư hỏng (chỉ số A)

Chỉ số này được định nghĩa bằng tỉ số giữa diện tích vùng hư hỏng chẩn đoán nằm trong vùng hư hỏng thực tế và diện tích vùng hư hỏng thực tế. Trong đó, vùng hư hỏng chẩn đoán bao gồm các phần

tử có chỉ số hư hỏng lớn hơn hoặc bằng ngưỡng hư hỏng. Chỉ số này nhằm đánh giá độ chính xác của phương pháp trong việc xác định các phần tử hư hỏng xuất hiện trong tấm.

$$A = \frac{A_{dam,in}^{predict}}{A_{dam}^{real}} \quad (11)$$

trong đó  $A_{dam,in}^{predict}$  là diện tích của vùng hư hỏng chẩn đoán được mà nằm trong vùng hư hỏng thực tế;  $A_{dam}^{real} = A_{dam,in}^{predict} + A_{dam,in}^{unpredict}$  là diện tích hư hỏng thực tế. Ý nghĩa của các vùng diện tích này được minh họa ở Hình 6.



Hình 6. Minh họa các đại lượng trong tính toán chỉ số đánh giá hiệu quả

b. Chỉ số đánh giá kết quả chẩn đoán vùng không hư hỏng (chỉ số  $B$ )

Chỉ số  $B$  được định nghĩa là tỉ số giữa diện tích vùng không hư hỏng chẩn đoán được và diện tích vùng không hư hỏng thực tế.

$$B = \frac{A_{undam}^{predict}}{A_{undam}^{real}} = \frac{A_{gross} - (A_{dam,in}^{predict} + A_{dam,out}^{predict})}{A_{gross} - A_{dam}^{real}} \quad (12)$$

trong đó  $A_{undam}^{predict}$  là diện tích của vùng không hư hỏng chẩn đoán;  $A_{undam}^{real}$  là diện tích vùng không hư hỏng thực tế;  $A_{dam,out}^{predict}$  là diện tích vùng hư hỏng chẩn đoán được mà nằm ngoài vùng hư hỏng thực tế;  $A_{gross}$  là diện tích toàn tấm.

c. Chỉ số đánh giá kết quả chẩn đoán tổng thể (chỉ số  $C$ )

Chỉ số  $C$  là chỉ số đánh giá tổng quát cho cả hiệu quả chẩn đoán vùng hư hỏng và vùng không hư hỏng trên toàn bộ diện tích tấm. Chỉ số  $C$  được định nghĩa bằng tổng độ chính xác chẩn đoán vùng nứt và vùng không nứt có kể đến trọng số của mỗi vùng  $w_{dam}$ ,  $w_{undam}$ . Trọng số của mỗi vùng là tỉ số diện tích vùng đó và tổng diện tích của toàn tấm.

$$C = Aw_{dam} + Bw_{undam} = A \frac{A_{dam}^{real}}{A_{gross}} + B \frac{A_{undam}^{real}}{A_{gross}} \quad (13)$$

Đối với các bài toán chẩn đoán hư hỏng theo cấp tải thì ở những cấp tải nhỏ, vùng hư hỏng có phạm vi nhỏ (trọng số  $w_{dam}$  nhỏ hơn nhiều so với trọng số  $w_{undam}$ ). Khi đó, độ chính xác tổng thể  $C$  phụ thuộc chủ yếu vào độ chính xác chẩn đoán vùng không hư hỏng  $B$ . Ngược lại, ở những cấp tải lớn, vùng hư hỏng mở rộng thì độ chính xác vùng hư hỏng  $A$  mang tính chất quyết định đến độ chính xác tổng thể  $C$ . Ở điều kiện lý tưởng, độ chính xác chẩn đoán của vùng hư hỏng  $A$  và vùng không hư hỏng  $B$  đều đạt 100% thì độ chính xác tổng thể  $C$  đạt 100%. Khi đó, thuật toán chẩn đoán chính xác hoàn toàn hư hỏng trong tấm.

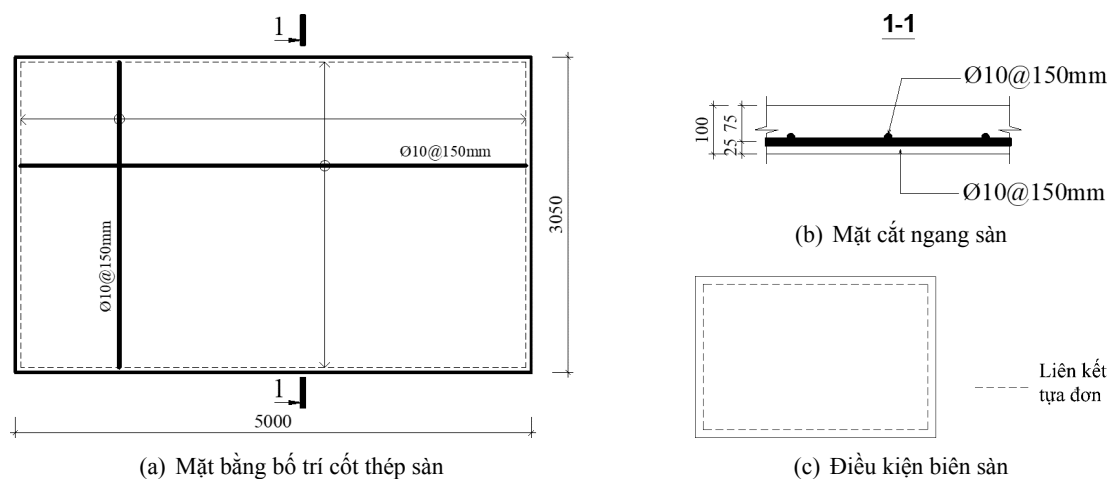
### 3. Bài toán phân tích

#### 3.1. Mô hình phần tử hữu hạn kết cấu sàn bê tông cốt thép

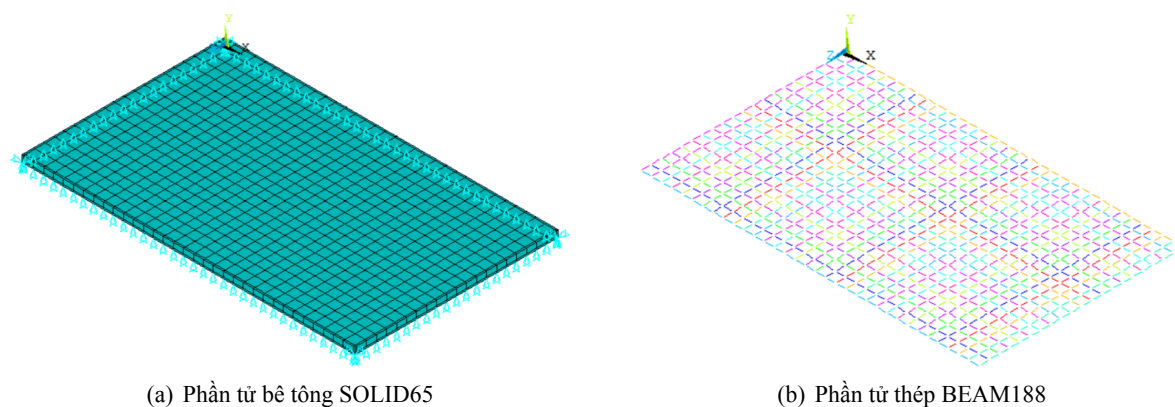
Một tấm sàn bê tông cốt thép có bốn cạnh tựa đơn, mặt bằng hình chữ nhật, có cốt thép gia cường theo hai phương được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS APDL. Một mô hình rời rạc được sử dụng để mô phỏng tấm, trong đó bê tông sử dụng phần tử SOLID65 và cốt thép sử dụng phần tử BEAM188 với giả thiết giữa bê tông và cốt thép có khả năng bám dính tốt.

##### a. Thông số mô hình

Tấm sàn bê tông cốt thép hình chữ nhật có bốn biên liên kết tựa đơn, kích thước các cạnh lần lượt là  $3,05 \times 5,00 \times 0,10$  m như minh họa ở Hình 7. Cốt thép được bố trí theo quy cách  $\varnothing 10@150$  mm theo hai phương  $x$  và  $y$  ở lớp dưới để chịu mô men dương. Trong đó, thép theo phương cạnh ngắn được đặt ở phía dưới với khoảng cách từ trọng tâm cốt thép đến mép bê tông bằng 0,025 m. Mô hình phần tử hữu hạn tấm bê tông cốt thép được thể hiện ở Hình 8, trong đó vật liệu bê tông được mô phỏng bằng phần tử SOLID65, vật liệu cốt thép sử dụng phần tử BEAM188.



Hình 7. Kích thước và điều kiện biên của tấm sàn bê tông cốt thép



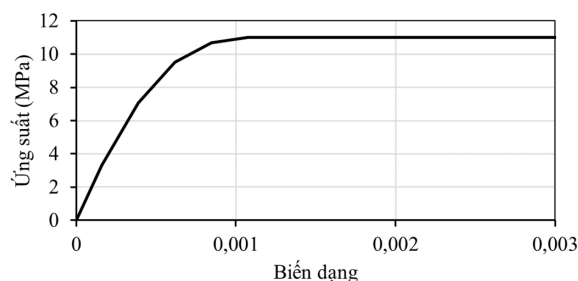
Hình 8. Mô hình tấm sàn bê tông cốt thép có 4 cạnh tựa đơn trong ANSYS

## b. Thông số vật liệu bê tông

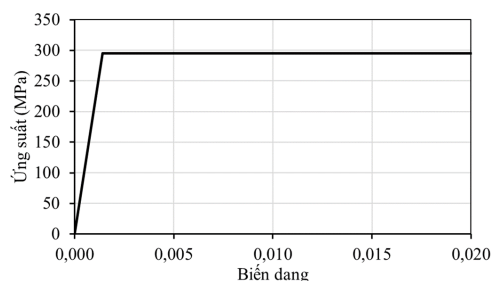
Thông số của vật liệu bê tông như sau: khối lượng riêng  $\sigma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ ; hệ số Poisson  $\nu_c = 0,2$ ; mô-đun đàn hồi  $E_c = 20500 \text{ MPa}$ . Khi xem xét nứt, ma trận đàn hồi cần được điều chỉnh thông qua hệ số truyền lực cắt (*shear transfer coefficient*) trên bề mặt vết nứt. Giá trị này nằm trong phạm vi  $[0, 1]$ , với giá trị 1 ứng với vết nứt thô ráp (vết nứt đóng) chưa mất khả năng truyền lực cắt, còn giá trị 0 ứng với vết nứt phẳng (vết nứt mở) và không thể truyền lực cắt. Đối với vết nứt đóng, tất cả ứng suất nén vuông góc với mặt vết nứt đều có thể truyền trên vết nứt, hệ số truyền lực cắt  $\beta = 1$ . Đối với vết nứt mở, hệ số này thường sử dụng trong khoảng 0,05 đến 0,25. Một số nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của hệ số truyền lực cắt bởi Kachlakev và Miller (2001) cho thấy một số vấn đề về hội tụ khi giá trị nhỏ hơn 0,2 [15]. Vì vậy, mô phỏng trong nghiên cứu này chọn giá trị hệ số truyền lực cắt  $\alpha = 0,2$  cho vết nứt mở.

Theo nghiên cứu của Kachlakev (2001) [14], sự phá hủy nén vỡ thuần túy của phần tử bê tông là khó có thể xảy ra. Với cơ sở trên, nghiên cứu này tắt cơ chế phá hoại nén vỡ của phần tử bê tông và sự phá hoại của mô hình được quyết định bởi ứng xử nứt. Trong điều kiện mô hình đã tắt cơ chế phá hoại nén vỡ của phần tử bê tông, để đảm bảo cấu kiện tấm chịu uốn ứng xử phù hợp với thực tế, cường độ chịu kéo dọc trục của bê tông được thay thế bằng cường độ chịu kéo khi thực hiện thí nghiệm uốn mẫu  $f_r$ . Trong bài toán này,  $f'_c = 11,00 \text{ MPa}$  và  $f_r = 1,25 \text{ MPa}$ .

Đồng thời, trong điều kiện bê tông không ứng xử nén vỡ, nghiên cứu này sử dụng giả thuyết vật liệu bê tông làm việc dẻo hoàn toàn sau khi đạt ứng suất nén cực đại. Đối với phần tử SOLID65, tiêu chuẩn dẻo được định nghĩa thông qua quan hệ ứng suất-biến dạng. Trước khi bê tông đạt đến trạng thái chảy dẻo, mô hình vật liệu được sử dụng là mô hình cứng hóa đẳng hướng (*multilinear isotropic hardening*). Đường quan hệ ứng suất-biến dạng theo mô hình trên được thể hiện ở Hình 9.



Hình 9. Đường cong quan hệ ứng suất-biến dạng của bê tông



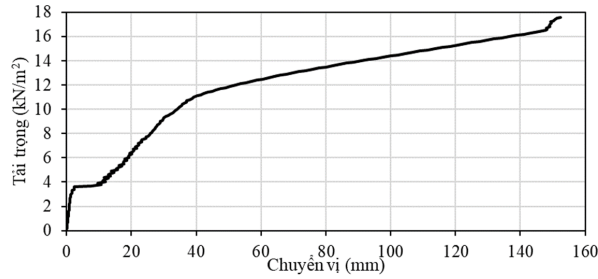
Hình 10. Đường cong quan hệ ứng suất-biến dạng của thép

## c. Thông số vật liệu cốt thép

Thông số cụ thể của vật liệu thép như sau: khối lượng riêng  $\sigma_s = 7850 \text{ kg/m}^3$ ; hệ số Poisson  $\nu_s = 0,3$ ; mô-đun đàn hồi  $E_s = 210 \text{ GPa}$ ; cường độ chảy dẻo của thép  $f_y = 295 \text{ MPa}$ . Đường quan hệ ứng suất-biến dạng của thép được đơn giản hoá như Hình 10.

## 3.2. Kết quả tính tải trọng gây nứt, tải trọng phá hoại

Sàn được gia tải phân bố đều, là loại tải trọng đơn điệu, tác dụng tĩnh, theo từng bước tải  $0,05 \text{ kN/m}^2$  cho đến khi bị phá hoại. Đường cong quan hệ tải trọng-chuyển vị tại điểm chính giữa, mặt dưới của tấm được xây dựng (Hình 11). Khi tải trọng nhỏ, quan hệ tải trọng-chuyển vị là tuyến tính và đồ thị có dạng đường thẳng. Khi tải trọng tăng đến tải gây nứt, đường quan hệ tải trọng-chuyển vị có sự thay đổi độ dốc. Ứng với cấp tải trọng đó, bê tông bị nứt ở vùng kéo. Khi tải trọng tiếp tục tăng lên, vết nứt mở rộng lên phía thớ nén và lan rộng sang xung quanh. Đồng thời ứng suất kéo trong bê tông được truyền vào các thanh cốt thép.



Hình 11. Đường cong quan hệ tải trọng-chuyển vị tại tâm của tấm

Căn cứ theo đường quan hệ giữa tải trọng-chuyển vị tại điểm giữa tấm, tải trọng phân bố đều gây nứt  $q_{cr}$  được xác định là  $3,05 \text{ kN/m}^2$ . Tại cấp tải đó, có sự thay đổi tỷ lệ tăng của tải trọng và chuyển vị so với vùng đàn hồi. Đồng thời, theo kết quả phân tích nứt từ ANSYS, cấp tải  $3,05 \text{ kN/m}^2$  là cấp tải bắt đầu xuất hiện phần tử bị nứt. Tải trọng gây nứt và tải trọng phá hoại tính được tính toán theo tiêu chuẩn ACI 318-02 dựa vào các đặc trưng cơ học của vật liệu, kích thước tiết diện và điều kiện biên [18]. Các giá trị này chưa xét đến hệ số tổ hợp tải trọng, hệ số độ tin cậy về vật liệu và hệ số giảm độ bền. Do đó, giá trị tải trọng gây nứt được so sánh với kết quả phân tích bằng ANSYS để đánh giá sự phù hợp của mô hình vật liệu sử dụng và mô hình phỏng tấm sàn bê tông cốt thép với sự làm việc thực tế của kết cấu.

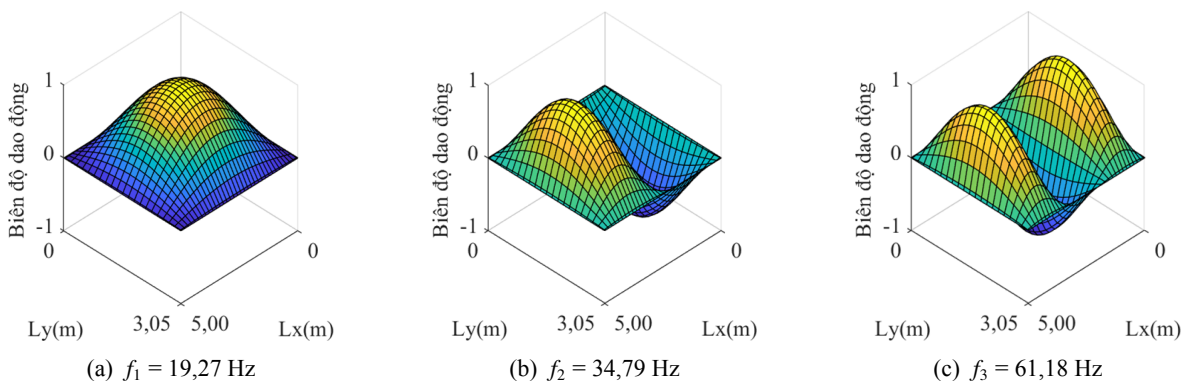
Bảng 1. Bảng so sánh tải gây nứt, tải phá hoại ô bản kê bốn cạnh

| Phương pháp tính                 | ACI 318-02 | ANSYS | Chênh lệch (%) |
|----------------------------------|------------|-------|----------------|
| Tải gây nứt ( $\text{kN/m}^2$ )  | 2,97       | 3,05  | 2,62           |
| Tải phá hoại ( $\text{kN/m}^2$ ) | 17,99      | 17,70 | 1,66           |

Kết quả so sánh ở Bảng 1 cho thấy tải trọng gây nứt và tải trọng phá hoại của tấm sàn bê tông cốt thép làm việc hai phương xác định bằng mô phỏng gần sát với kết quả tính toán theo tiêu chuẩn ACI 318-02, với sai số nhỏ hơn 3%. Như vậy, mô hình vật liệu và mô phỏng tấm sàn bê tông cốt thép bằng ANSYS là phù hợp và được sử dụng cho bài toán chẩn đoán. Tiếp đến, tấm sàn bê tông cốt thép khi chưa nứt và đã xuất hiện vết nứt được phân tích dao động để trích xuất dữ liệu dạng dao động làm đầu vào cho thuật toán chẩn đoán vị trí hư hỏng.

### 3.3. Phân tích dao động tấm bê tông cốt thép có bốn cạnh tựa đơn

#### a. Dạng dao động và tần số tự nhiên



Hình 12. Ba dạng dao động đầu tiên, tấm chưa hư hỏng

Dao động tự do của tấm ở trạng thái chưa hư hỏng được phân tích bằng ANSYS theo phương pháp trị riêng (*eigenvalue method*). Kết quả phân tích dạng dao động của ba dạng đầu tiên được thể hiện ở Hình 12.

#### b. Kiểm chứng kết quả

Kết quả tần số của ba dạng dao động được kiểm chứng bằng công thức tính tần số dao động của kết cấu tấm theo Blevins [19]. Do cốt thép không có ảnh hưởng nhiều đến tần số dao động, nên công thức trên có thể được áp dụng cho tấm sàn bê tông cốt thép. Kết quả phân tích tần số ba dạng dao động đầu tiên bằng ANSYS được so sánh với phương pháp giải tích và được trình bày ở Bảng 2. Kết quả so sánh tần số cho thấy độ chênh lệch của tần số dao động từ phân tích bằng ANSYS và tính theo phương pháp giải tích nhỏ hơn 4%. Như vậy, kết quả phân tích dao động tấm bê tông cốt thép bằng ANSYS với các mô hình vật liệu được đề xuất ở trên là đáng tin cậy.

Bảng 2. So sánh tần số giữa các phương pháp

| Mode | Giải tích [18] | ANSYS | Chênh lệch (%) |
|------|----------------|-------|----------------|
| 1    | 19,95          | 19,27 | 3,41           |
| 2    | 36,18          | 34,81 | 3,79           |
| 3    | 63,57          | 62,19 | 2,17           |

#### 3.4. Chẩn đoán sự xuất hiện hư hỏng

Kết quả chẩn đoán hư hỏng được thực hiện ở 3 cấp tải: cấp tải gây nứt,  $q_1 = q_{crack} = 3,05 \text{ kN/m}^2$ , cấp tải  $q_2 = 3,10 \text{ kN/m}^2$  và cấp tải  $q_3 = 3,15 \text{ kN/m}^2$ . Các đặc trưng dao động sử dụng lần lượt là tần số, dạng dao động và năng lượng biến dạng của ba dạng dao động đầu tiên.

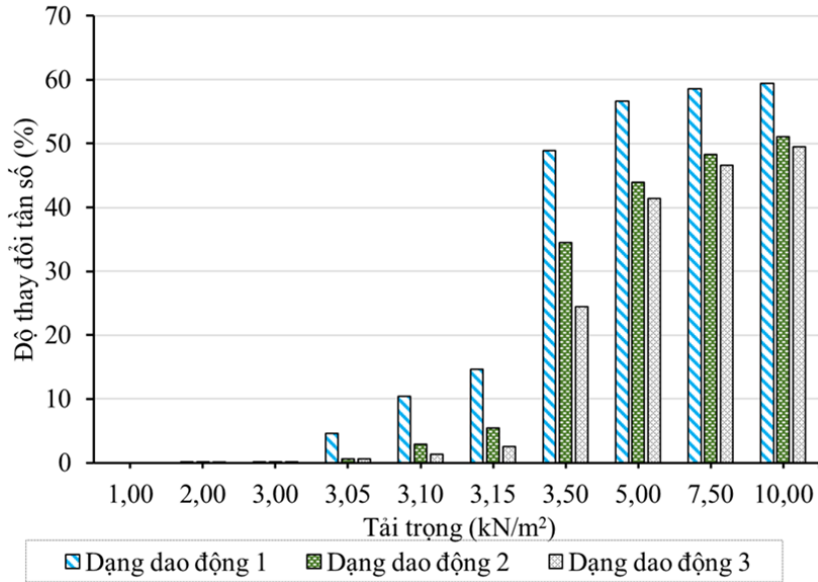
##### a. Sử dụng tần số dao động

Kết quả phân tích dao động của mô hình tấm bê tông cốt thép với các cấp tải khác nhau từ  $1,00 \text{ kN/m}^2$  đến  $10,00 \text{ kN/m}^2$  được thể hiện tại Bảng 3. Kết quả tính toán độ giảm tần số của ba dạng dao động đầu tiên tại các cấp tải này so với tấm chưa hư hỏng được trình bày ở Hình 13.

Bảng 3. Tần số dao động của tấm sàn tại các cấp tải (Hz)

| Tải trọng ( $\text{kN/m}^2$ ) | 1,00  | 2,00  | 3,00  | 3,05  | 3,10  | 3,15  | 3,50  | 5,00  | 7,50  | 10,00 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dạng dao động 1               | 19,27 | 19,26 | 19,26 | 18,38 | 17,26 | 16,43 | 9,84  | 8,35  | 7,97  | 7,82  |
| Dạng dao động 2               | 34,79 | 34,78 | 34,78 | 34,58 | 33,79 | 32,88 | 22,76 | 19,49 | 17,97 | 17,02 |
| Dạng dao động 3               | 61,18 | 61,26 | 61,17 | 60,78 | 60,40 | 59,59 | 46,20 | 35,81 | 32,66 | 30,87 |

Kết quả phân tích độ giảm của tần số dao động cho thấy sự phù hợp khi so sánh với kết quả phân tích trạng thái làm việc của tấm, biểu hiện thông qua việc tại cấp tải bắt đầu xuất hiện vết nứt là  $3,05 \text{ kN/m}^2$ , tần số dao động tự nhiên của cả ba dạng dao động bắt đầu có sự khác biệt so với tần số dao động của tấm nguyên dạng. Kể từ sau cấp tải gây nứt, tại các cấp tải tiếp theo phương pháp đều đưa ra chẩn đoán là tấm có xuất hiện vết nứt. Độ thay đổi tần số trên Hình 13 cho thấy tải trọng càng tăng thì sự khác biệt giữa tần số dao động so với trạng thái ban đầu càng lớn, đồng thời cả ba dạng dao động đều có thể được sử dụng để chẩn đoán sự có mặt của hư hỏng. Trong ba dạng dao động uốn đầu tiên thì dạng dao động thứ nhất chẩn đoán tốt nhất, tiếp đến là dạng dao động thứ hai, cuối cùng là dạng dao động thứ ba. Dạng dao động thứ nhất là dạng dao động đối xứng. Trong khi dạng dao động thứ hai và thứ ba là dạng dao động phản xứng. Đối với tấm sàn đang khảo sát thì vết nứt được hình thành từ tâm của tấm, sau đó lan truyền về các biên. Đây là nguyên nhân khiến cho dạng dao động đối xứng nhạy hơn với hư hỏng so với dạng dao động phản xứng.



Hình 13. Độ giảm tần số dao động so với tần nguyên dạng theo các cấp tải của ba dạng dao động đầu tiên

#### b. Sử dụng dạng dao động

Kết quả tính toán chỉ số *MAC* được trình bày trong Bảng 4 cho thấy phương pháp có khả năng nhận diện sự xuất hiện của hư hỏng. Tại cấp tải gây nứt,  $3,05 \text{ kN/m}^2$ , phương pháp cho kết quả chẩn đoán đây là cấp tải có xuất hiện hư hỏng, trong đó chỉ số *MAC* bắt đầu khác 1 tại dạng dao động thứ ba (bằng 0,999). Tuy nhiên, tại cấp tải này chỉ số *MAC* của hai dạng dao động uốn đầu tiên đều bằng 1. Từ cấp tải  $3,05 \text{ kN/m}^2$  trở đi, chỉ số *MAC* luôn nhỏ hơn 1 và có sự giảm rõ rệt hơn. Như vậy, phương pháp cho kết quả chẩn đoán là tấm có sự xuất hiện hư hỏng từ cấp tải trọng  $3,05 \text{ kN/m}^2$  trở đi. Kết quả chẩn đoán cho thấy sự phù hợp khi so sánh với bài toán thuận phân tích trạng thái làm việc của tấm đã trình bày trong 3.2. Tuy nhiên, chỉ số *MAC* không thể hiện được mối liên hệ đối với mức độ hư hỏng, biểu hiện qua việc từ cấp tải  $3,05 \text{ kN/m}^2$  đến cấp tải  $5 \text{ kN/m}^2$ , tấm có mức độ hư hỏng tăng lên và vùng nứt mở rộng ra, tuy nhiên chỉ số *MAC* của dạng dao động thứ nhất lại tăng từ 0,994 đến 0,998 tức biểu hiện tấm lại đang ít hư hỏng hơn. Ngoài ra, dạng dao động thứ hai và dạng dao động thứ ba có độ nhạy cao hơn so với dạng dao động thứ nhất khi áp dụng trong chẩn đoán sự có mặt của hư hỏng bằng chỉ số *MAC*.

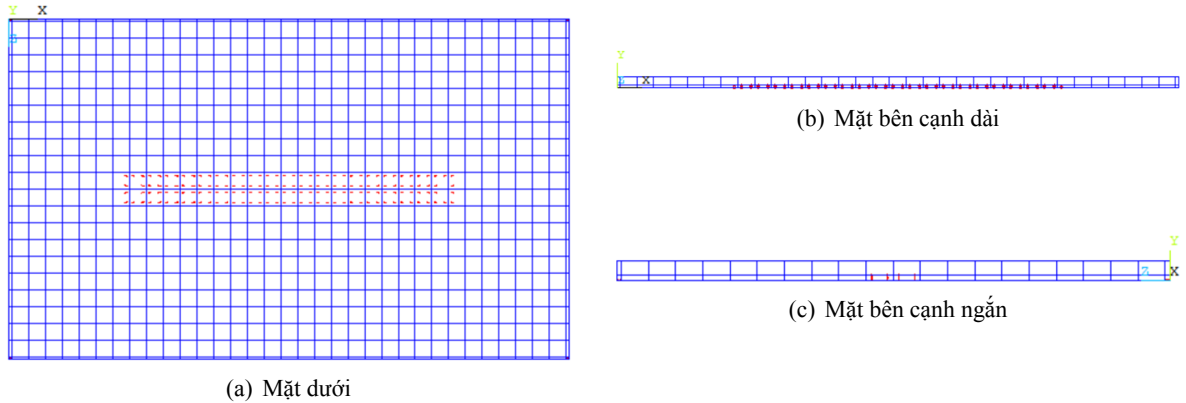
Bảng 4. Chỉ số *MAC* của ba dạng dao động đầu tiên ở các cấp tải khác nhau

| Tải trọng (kN/m <sup>2</sup> ) | 1     | 2     | 3     | 3,05  | 3,1   | 3,15  | 3,5   | 5     | 7,5   | 10    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dạng dao động 1                | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,998 | 0,994 | 0,998 | 0,999 | 0,999 |
| Dạng dao động 2                | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,994 | 0,993 | 0,995 | 0,996 |
| Dạng dao động 3                | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,981 | 0,973 | 0,978 | 0,984 |

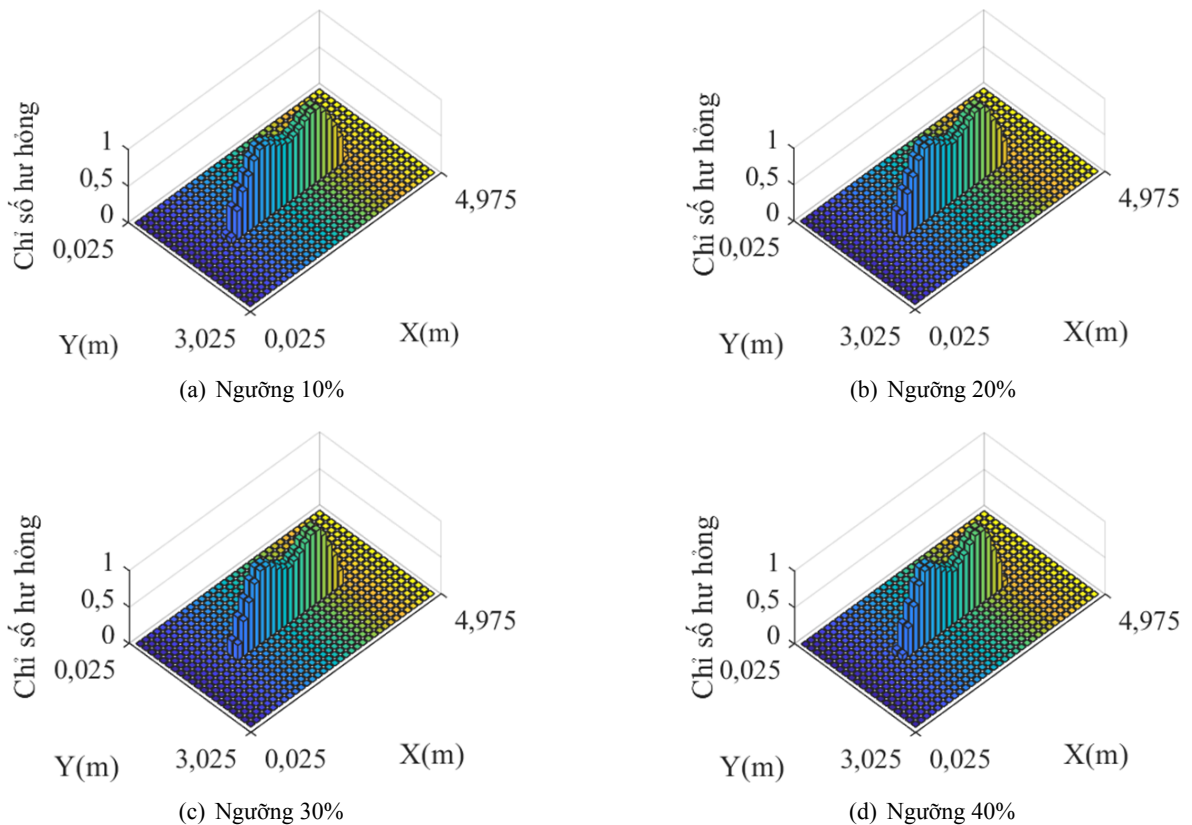
#### c. Sử dụng năng lượng biến dạng

- Cấp tải gây nứt,  $q_1 = q_{crack} = 3,05 \text{ kN/m}^2$

Tại cấp tải gây nứt, vết nứt xuất hiện tại mặt dưới tấm ở khu vực giữa tấm và phân bố theo phương cạnh dài tấm. Các vết nứt xuất hiện ở thớ bê tông chịu kéo và phân bố theo phương cạnh dài phù hợp với tính chất làm việc của bản kê bốn cạnh làm việc hai phương. Trong đó, tấm chủ yếu làm việc theo phương cạnh ngắn. Hình dạng vết nứt được thể hiện chi tiết ở Hình 14.



Hình 14. Hình dạng vết nứt ở cấp tải  $q_1$



Hình 15. Biểu đồ chỉ số hư hỏng sử dụng kết hợp ba dạng dao động đầu tiên ở cấp tải  $q_1$

Tại trạng thái xuất hiện vết nứt, các thông số về hình học và độ cứng của tấm bị thay đổi. Sự thay đổi này dẫn đến sự thay đổi của tần số dao động và dạng dao động của tấm so với trạng thái tấm chưa bị nứt. Tuy nhiên, như đã trình bày ở phần 3.4.a và 3.4.b, sự thay đổi tần số và dạng dao động là không đáng kể, ngoài ra phương pháp sử dụng tần số và dạng dao động có hạn chế là không xác định được sự phân bố của vết nứt. Cách tiếp cận dựa vào thay đổi năng lượng biến dạng sẽ giải quyết hạn chế trên. Kết quả chẩn đoán được tính toán cho ba trường hợp: sử dụng dạng dao động thứ nhất, sử dụng kết hợp hai dạng dao động thứ nhất và thứ hai, sử dụng kết hợp cả ba dạng dao động đầu. Ngưỡng hư

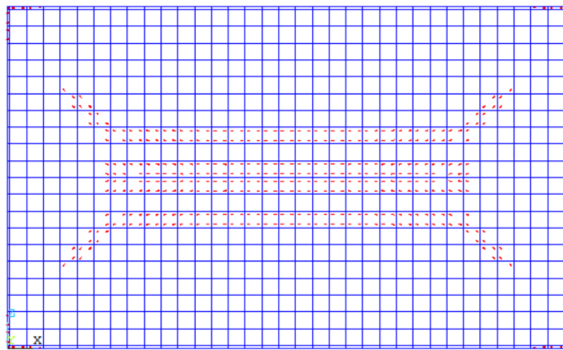
hồng  $Z_0$  sử dụng: 10%, 20%, 30% và 40% của chỉ số hư hỏng lớn nhất. Kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng ở Hình 15 cho thấy rằng, việc sử dụng kết hợp ba dạng đầu tiên đều chẩn đoán được vùng hư hỏng với các ngưỡng khảo sát.

Hiệu quả chẩn đoán vị trí hư hỏng của từng trường hợp kết hợp dạng dao động và ngưỡng hư hỏng sử dụng được đánh giá dựa vào ba chỉ số  $A, B, C$ . Bảng 5 cho thấy trường hợp sử dụng kết hợp ba dạng dao động đầu tiên với ngưỡng hư hỏng 10% cho ra kết quả chẩn đoán hư hỏng tốt nhất, với tất cả các chỉ tiêu đều gần bằng 100%. Trường hợp sử dụng kết hợp ba dạng dao động đầu tiên với ngưỡng hư hỏng 20% cũng cho kết quả chẩn đoán khá cao với chỉ số  $A$  bằng 90%, chỉ số  $B$  bằng 99% và chỉ số  $C$  bằng 99%.

Bảng 5. Hiệu quả chẩn đoán hư hỏng ở cấp tải  $q_1$ 

| $Z_0$ | Sử dụng một dạng dao động |         |         | Sử dụng kết hợp hai dạng dao động |         |         | Sử dụng kết hợp ba dạng dao động |         |         |
|-------|---------------------------|---------|---------|-----------------------------------|---------|---------|----------------------------------|---------|---------|
|       | $A$ (%)                   | $B$ (%) | $C$ (%) | $A$ (%)                           | $B$ (%) | $C$ (%) | $A$ (%)                          | $B$ (%) | $C$ (%) |
| 10%   | 100,00                    | 98,54   | 98,64   | 100,00                            | 99,68   | 99,70   | 100,00                           | 99,68   | 99,70   |
| 20%   | 100,00                    | 99,51   | 99,55   | 95,24                             | 99,68   | 99,39   | 90,48                            | 99,36   | 98,79   |
| 30%   | 100,00                    | 99,68   | 99,70   | 90,48                             | 99,36   | 98,79   | 90,48                            | 99,36   | 98,79   |
| 40%   | 90,48                     | 99,52   | 98,94   | 90,48                             | 99,36   | 98,79   | 90,48                            | 99,36   | 98,79   |
| 50%   | 90,48                     | 99,52   | 98,94   | 80,95                             | 98,72   | 97,59   | 80,95                            | 98,72   | 97,59   |

- Cấp tải  $q_2 = 3,10 \text{ kN/m}^2$



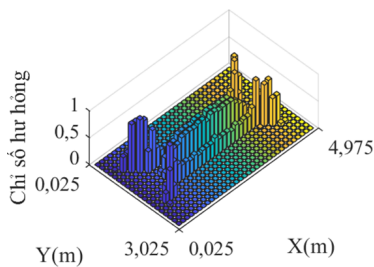
(a) Mặt dưới



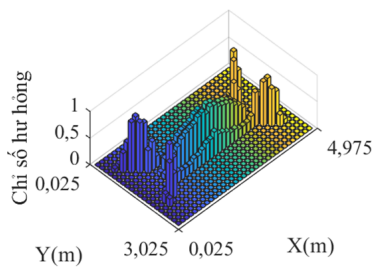
(b) Mặt bên cạnh dài



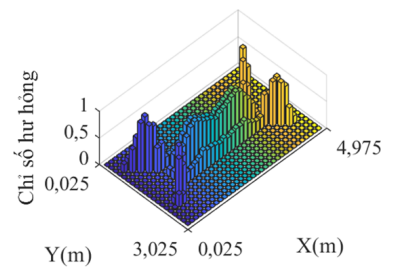
(c) Mặt bên cạnh ngắn

Hình 16. Hình dạng vết nứt ở cấp tải  $q_2$ 

(a) Sử dụng dạng thứ nhất



(b) Sử dụng hai dạng đầu tiên



(c) Sử dụng ba dạng đầu tiên

Hình 17. Biểu đồ chỉ số hư hỏng ở cấp tải  $q_2$

Tại cấp tải này, vết nứt ở giữa nhịp lan rộng ra xung quanh và phát triển về phía bốn góc. Đồng thời, vết nứt mở rộng lên phía thớ nén của bê tông. Hình dạng vết nứt được thể hiện chi tiết ở Hình 16. Kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng sử dụng kết hợp từ một đến ba dạng dao động đầu tiên với ngưỡng hư hỏng 20% chỉ số hư hỏng lớn nhất được thể hiện ở Hình 17 và Bảng 6. Kết quả cho thấy rằng, việc sử dụng dạng dao động đầu tiên hoặc kết hợp hai hoặc ba dạng đầu tiên với ngưỡng 20% chẩn đoán được vùng hư hỏng với hình dạng giống như hình dạng vết nứt thực tế.

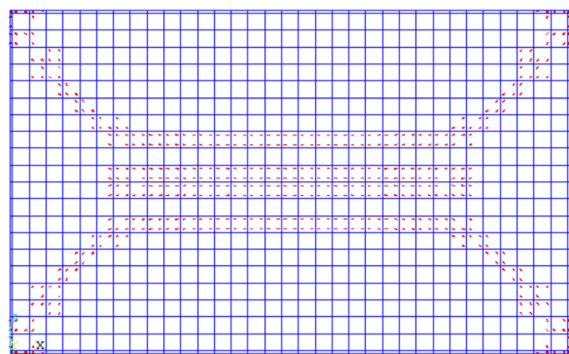
Bảng 6. Hiệu quả chẩn đoán hư hỏng ở cấp tải  $q_2$ 

| $Z_0$ | Sử dụng một dạng dao động |       |       | Sử dụng kết hợp hai dạng dao động |       |       | Sử dụng kết hợp ba dạng dao động |       |       |
|-------|---------------------------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|
|       | A (%)                     | B (%) | C (%) | A (%)                             | B (%) | C (%) | A (%)                            | B (%) | C (%) |
| 10%   | 98,21                     | 88,69 | 90,30 | 96,43                             | 88,69 | 90,00 | 96,43                            | 88,32 | 89,70 |
| 20%   | 95,54                     | 98,54 | 98,03 | 96,43                             | 98,36 | 98,03 | 96,43                            | 97,08 | 96,97 |
| 30%   | 91,07                     | 99,10 | 97,73 | 91,96                             | 98,92 | 97,74 | 96,43                            | 99,82 | 99,24 |
| 40%   | 83,93                     | 96,99 | 94,77 | 25,89                             | 86,98 | 76,62 | 81,25                            | 96,48 | 93,89 |
| 50%   | 50,89                     | 90,88 | 84,09 | 54,46                             | 91,49 | 85,20 | 55,36                            | 91,79 | 85,61 |

Hiệu quả chẩn đoán vị trí hư hỏng của từng trường hợp kết hợp dạng dao động và ngưỡng hư hỏng sử dụng được đánh giá dựa vào ba chỉ số A, B, C. Hiệu quả chẩn đoán hư hỏng ở Bảng 6 cho thấy trường hợp sử dụng kết hợp ba dạng dao động đầu tiên với ngưỡng hư hỏng 30% cho ra kết quả chẩn đoán hư hỏng tốt nhất, với chỉ tiêu B và C gần đều bằng 100%. Trường hợp sử dụng kết hợp ba dạng dao động đầu tiên với ngưỡng hư hỏng 20% cũng cho kết quả chẩn đoán khá cao với chỉ số A bằng 96%, chỉ số B bằng 97% và chỉ số C bằng 97%.

- Cấp tải  $q_3 = 3,15 \text{ kN/m}^2$

Tại cấp tải này, vết nứt ở giữa đã lan về phía bốn góc. Đồng thời, vết nứt tiếp tục mở rộng lên phía thớ nén của bê tông. Hình dạng vết nứt được thể hiện ở Hình 18. Kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng sử dụng kết hợp một đến ba dạng dao động đầu tiên với ngưỡng hư hỏng 20% chỉ số hư hỏng lớn nhất được thể hiện ở Hình 19. Kết quả cho thấy rằng, việc sử dụng dạng dao động đầu tiên hoặc kết hợp hai hoặc ba dạng đầu tiên với ngưỡng 20% chẩn đoán được vùng hư hỏng với hình dạng giống như hình dạng vết nứt thực tế.



(a) Mặt dưới



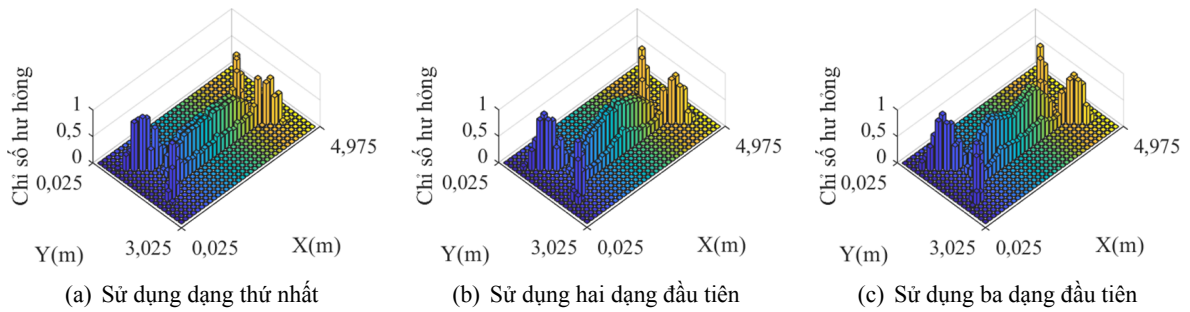
(b) Mặt bên cạnh dài



(c) Mặt bên cạnh ngắn

Hình 18. Hình dạng vết nứt ở cấp tải  $q_3$ 

Hiệu quả chẩn đoán vị trí hư hỏng của từng trường hợp kết hợp dạng dao động và ngưỡng hư hỏng sử dụng được đánh giá dựa vào ba chỉ số A, B, C. Kết quả chẩn đoán ở Bảng 7 cho thấy trường hợp sử dụng kết hợp hai dạng dao động đầu tiên với ngưỡng hư hỏng 10% cho ra kết quả chẩn đoán hư hỏng

Hình 19. Biểu đồ chỉ số hư hỏng ở cấp tải  $q_3$ 

với chỉ tiêu  $A$  lớn nhất. Trường hợp sử dụng kết hợp ba dạng dao động đầu tiên với ngưỡng hư hỏng 20% cho kết quả chẩn đoán với chỉ số  $B$  và  $C$  lớn nhất, với  $B$  bằng 96% và  $C$  bằng 92%, đồng thời chỉ số  $A$  khá cao bằng 77%.

Bảng 7. Hiệu quả chẩn đoán hư hỏng ở cấp tải  $q_3$ 

| $Z_0$ | Sử dụng một dạng dao động |         |         | Sử dụng kết hợp hai dạng dao động |         |         | Sử dụng kết hợp ba dạng dao động |         |         |
|-------|---------------------------|---------|---------|-----------------------------------|---------|---------|----------------------------------|---------|---------|
|       | $A$ (%)                   | $B$ (%) | $C$ (%) | $A$ (%)                           | $B$ (%) | $C$ (%) | $A$ (%)                          | $B$ (%) | $C$ (%) |
| 10%   | 81,76                     | 94,92   | 91,97   | 82,43                             | 94,92   | 92,12   | 81,76                            | 94,53   | 91,67   |
| 20%   | 76,35                     | 94,81   | 90,67   | 77,03                             | 94,99   | 90,96   | 77,03                            | 96,24   | 91,93   |
| 30%   | 69,59                     | 92,59   | 87,43   | 70,27                             | 92,59   | 87,58   | 75,68                            | 93,60   | 89,58   |
| 40%   | 64,19                     | 90,78   | 84,82   | 53,38                             | 88,28   | 80,45   | 61,49                            | 90,14   | 83,72   |
| 50%   | 37,84                     | 84,91   | 74,35   | 40,54                             | 85,48   | 75,40   | 41,89                            | 85,76   | 75,92   |

#### 4. Kết luận

Từ các kết quả phân tích, các kết luận quan trọng được rút ra như sau:

- Vết nứt trong kết cấu ảnh hưởng đến đặc trưng dao động của kết cấu. Các vết nứt này được xem xét thông qua quan hệ ứng suất-biến dạng phi tuyến của vật liệu trong mô hình phần tử hữu hạn. Từ đó, các đặc trưng dao động của kết cấu tầm theo các cấp tải khác nhau được xác định chính xác. Điều này giúp nâng cao hiệu quả chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu.

- Các đặc trưng dao động cơ bản như tần số dao động và dạng dao động có khả năng chẩn đoán được sự xuất hiện của hư hỏng trong kết cấu tầm kể cả khi xét đến sự làm việc của vật liệu sau giai đoạn đàn hồi. Đặc biệt, phương pháp năng lượng biến dạng có khả năng chẩn đoán được cả sự xuất hiện và vị trí hư hỏng trong tấm bê tông cốt thép làm việc ở giai đoạn sau đàn hồi.

- Biểu đồ chỉ số hư hỏng sau khi đã áp dụng ngưỡng hư hỏng đề xuất thể hiện được hình ảnh trực quan về phân bố vết nứt trong tấm. Trong nghiên cứu này, biểu đồ chỉ số hư hỏng được xây dựng dựa vào năng lượng biến dạng cho thấy hiệu quả tốt trong việc khoanh vùng vị trí vết nứt. Tuy nhiên, để xác định được mức độ hư hỏng, phương pháp năng lượng biến dạng cần được kết hợp thêm với các thuật toán tối ưu hoặc sử dụng các mô hình trí tuệ nhân tạo.

- Việc sử dụng kết hợp từ hai đến ba dạng dao động đầu tiên cho kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng chính xác và ổn định hơn so với việc chỉ sử dụng duy nhất dạng dao động đầu tiên đối với các ngưỡng hư hỏng khảo sát. Phương pháp năng lượng biến dạng chẩn đoán chính xác vùng hư hỏng và vùng không hư hỏng khi sử dụng kết hợp ba dạng dao động đầu tiên với ngưỡng hư hỏng 20%. Độ chính xác tổng thể của kết quả chẩn đoán đạt trên 90%.

## Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Nha Trang cho đề tài “Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm bê tông cốt thép sử dụng các đặc trưng dao động kết hợp với thuật toán trí tuệ nhân tạo”, mã số TR2023-13-31.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Chen, H., Ni, Y. (2018). *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*. Wiley.
- [2] Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M., Inman, D. J. (2021). *A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147:107077.
- [3] Hanif, M. U., Ibrahim, Z., Ghaedi, K., Hashim, H., Javanmardi, A. (2018). *Damage assessment of reinforced concrete structures using a model-based nonlinear approach – A comprehensive review*. *Construction and Building Materials*, 192:846–865.
- [4] Dinh-Cong, D., Vo-Duy, T., Ho-Huu, V., Nguyen-Thoi, T. (2018). *Damage assessment in plate-like structures using a two-stage method based on modal strain energy change and Jaya algorithm*. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 27(2):166–189.
- [5] Bach, V.-S., Le, T.-C., Nguyen, C.-T., Tran, M.-H., Pham, M.-N., Ho, D.-D. (2022). *Damage Identification for Steel Frame Structures Using Two-Step Approach Combining Modal Strain Energy Method and Genetic Algorithm*. *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Nature Singapore, 767–775.
- [6] Le, T.-C., Bach, V.-S., Vo, T.-S., Pham, N.-L., Huynh, T.-C., Ho, D.-D. (2022). *Development of Modal Strain Energy Method Combined with Multi-phase Genetic Algorithm for Structural Damage Detection in Plates*. *Recent Advances in Structural Health Monitoring and Engineering Structures*, Springer Nature Singapore, 247–255.
- [7] Cao, L. T., Sỹ, B. V., Duy, H. Đ. (2020). *Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với thuật toán di truyền*. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 14(4V):16–28.
- [8] Chatzi, E. N., Smyth, A. W. (2009). *The unscented Kalman filter and particle filter methods for nonlinear structural system identification with non-collocated heterogeneous sensing*. *Structural Control and Health Monitoring*, 16(1):99–123.
- [9] Masri, S. F., Smyth, A. W., Chassiakos, A. G., Caughey, T. K., Hunter, N. F. (2000). *Application of neural networks for detection of changes in nonlinear systems*. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(7):666–676.
- [10] Tan, C. M. (2003). *Nonlinear vibrations of cracked reinforced concrete beams*. PhD Thesis, University of Nottingham.
- [11] Pastor, M., Binda, M., Harčarik, T. (2012). *Modal Assurance Criterion*. *Procedia Engineering*, 48: 543–548.
- [12] Hu, H.-W., Wu, C.-B. (2008). *Nondestructive Damage Detection of Two Dimensional Plate Structures Using Modal Strain Energy Method*. *Journal of Mechanics*, 24(4):319–332.
- [13] Le, T.-C., Ho, D.-D., Huynh, T.-C., Bach, V.-S. (2021). *Crack Detection in Plate-Like Structures Using Modal Strain Energy Method considering Various Boundary Conditions*. *Shock and Vibration*, 2021:1–17.
- [14] Desayi, P., Krishnan, S. (1964). *Equation for the stress-strain curve of concrete*. 61(3):345–350.
- [15] Kachlakev, D. I., Miller, T. H., Potisuk, T., Yim, S. C., Chansawat, K. (2001). *Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates*. Technical Report, SPR 316.
- [16] Kent, D. C., Park, R. (1971). *Flexural Members with Confined Concrete*. *Journal of the Structural Division*, 97(7):1969–1990.
- [17] William, K. J., Warnke, E. P. (1975). *Constitutive model for the triaxial behavior of concrete*. *Proceedings of IABSE, Structural Engineering Report 19, Section III*, 1–30.
- [18] American Concrete Institute (2002). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-02) and Commentary (ACI 318RM-02): Metric Version*.
- [19] Blevins, R. D., Plunkett, R. (1980). *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*. *Journal of Applied Mechanics*, 47(2):461–462.