

XÁC ĐỊNH CÁC ĐẶC TRƯNG ĐỘNG CỦA TẦM SÀN ỨNG LỰC TRƯỚC CĂNG TRƯỚC DỰA VÀO PHƯƠNG PHÁP ĐO DAO ĐỘNG

Phạm Ngọc Lâm^{a,*}, Nguyễn Hướng Dương^b, Đặng Việt Hưng^c, Nguyễn Trung Hiếu^c

^aKhoa Doanh trại, Học viện Hậu Cần, phường Bồ Đề, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

^cKhoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 17/12/2025, Sửa xong 26/01/2026, Chấp nhận đăng 02/02/2026

Tóm tắt

Nghiên cứu này trình bày phương pháp và quy trình xử lý dữ liệu từ thí nghiệm đo dao động một tầm sàn bê tông ứng lực trước căng trước một phương. Mẫu thí nghiệm là một bản sàn dự ứng lực nhịp đơn giản dài 3m. Trên bề mặt sàn, hệ lưới đo dao động gồm 33 cảm biến gia tốc được bố trí thành 3 hàng, mỗi hàng có 11 cảm biến. Tầm sàn được kích thích dao động bằng búa cao su và tín hiệu dao động được ghi lại thông qua hệ thống thu thập dữ liệu NI. Quy trình xử lý tín hiệu được thực hiện bằng kỹ thuật phân tích trên miền tần số (FDD) để xác định tần số và dạng dao động uốn của sàn. Ngoài ra, nghiên cứu còn khảo sát ảnh hưởng của mật độ cảm biến đến độ chính xác của dạng dao động. Kết quả thấy rằng, với phép đo 33 cảm biến, ba tần số riêng và dạng dao động uốn của sàn thu được từ thí nghiệm có tương quan tốt với mô phỏng số khi sai lệch về tần số dao động không vượt quá 4% và chỉ số MAC của dạng dao động thứ nhất lớn hơn 99%. Tuy nhiên, khi số cảm biến giảm đi thì độ chính xác, độ mượt của các dạng dao động giảm nhanh đặc biệt là dạng dao động bậc cao.

Từ khóa: thí nghiệm đo dao động; sàn ứng lực trước căng trước; FDD; tần số; dạng dao động.

DETERMINATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A PRE-TENSIONED PRESTRESSED CONCRETE SLAB USING VIBRATION MEASUREMENTS

Abstract

This study presents the methodology and data-processing framework for vibration measurements performed on a one-way prestressed concrete slab. The experimental specimen was a simply supported prestressed slab with a span of 3m instrumented with a grid of 33 accelerometers arranged in three rows of eleven sensors. The slab was excited using a rubber hammer, and the vibration responses were recorded through a National Instruments (NI) data-acquisition system. The signals were processed using the Frequency Domain Decomposition (FDD) technique to extract natural frequencies and flexural mode shapes, and the influence of sensor density on the accuracy of the identified mode shapes was also examined. With the full 33-sensor configuration, the first three natural frequencies and corresponding bending mode shapes showed good agreement with numerical simulations, with frequency discrepancies below 4% and MAC values above 99% for the first mode. However, reducing the number of sensors led to a noticeable decline in the accuracy and smoothness of the identified mode shapes, particularly for higher-order modes.

Keywords: vibration measurement; pre-tensioned prestressed concrete slab; FDD; natural frequency; mode shape.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20\(1V\)-03](https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(1V)-03) © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Các tầm sàn bê tông ứng lực trước căng trước được sử dụng rộng rãi trong các công trình nhà công nghiệp và lắp ghép nhờ khả năng vượt nhịp lớn, giảm độ võng và hạn chế nứt. Tuy nhiên, theo thời gian kết cấu có thể bị hư hỏng do nhiều nguyên nhân khác nhau như tổn hao ứng lực, từ biến, co ngót, quá tải hay cháy nổ. Điều này làm ảnh hưởng đến độ cứng của sàn và tuổi thọ công trình. Từ đó, đặt ra yêu cầu về đánh giá hiện trạng sức khỏe của kết cấu để đưa ra các giải pháp xử lý kịp thời nhằm phòng chống nguy cơ sụp đổ và đảm bảo thời gian sử dụng. Đánh giá sức khỏe công trình bằng phương pháp dao động cho thấy nhiều ưu điểm nổi bật so với phương pháp tĩnh thông thường vì đem lại kết quả nhanh chóng, tốn ít kinh phí, thi công dễ dàng, đảm bảo độ tin cậy và đặc biệt không gây

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: phamngoclaml11191@gmail.com (Lâm, P. N.)

tác động lớn lên cấu kiện [1]. Phương pháp này có thể đánh giá được độ cứng tổng thể, các hư hỏng cục bộ dựa trên sự thay đổi các đặc trưng động như tần số hay dạng dao động [2, 3].

Trong đánh giá kết cấu bằng phương pháp đo dao động, tùy thuộc vào mức độ hư hỏng của cấu kiện, mục tiêu nhận dạng và trang thiết bị có sẵn mà ta có thể chỉ cần xác định tần số dao động hoặc cả tần số và dạng dao động của kết cấu. Tần số dao động rất nhạy với độ cứng tổng thể của kết cấu. Đồng thời, việc xác định tham số này tương đối dễ dàng có thể chỉ cần một cảm biến gia tốc với kỹ thuật xử lý đơn giản bằng phép biến đổi FFT (Fast Fourier Transform). Một số tác giả trong các nghiên cứu thực nghiệm [4–6] đã xác định tần số dao động riêng của dầm ứng lực trước để khảo sát ảnh hưởng của tổn hao ứng lực trong cáp. Noble và cs. [7] xác định tần số dao động của dầm ứng lực trước để đánh giá ảnh hưởng của độ lệch tâm cáp, tuy nhiên kết quả chưa thể hiện quy luật rõ ràng. Cù Việt Hưng và cs. [8] nghiên cứu xác định tần số của dầm cầu An Thượng tiết diện chữ I sử dụng vật liệu bê tông siêu tính năng UHPC với một đầu đo gia tốc đặt ở giữa nhịp. Tương tự, Ercolani và cs. [9] tìm kiếm hư hỏng do nứt của dầm ứng lực trước căng trước bằng đo tần số dao động. Bên cạnh đó, nhóm tác giả Jaini [10] sử dụng 15 cảm biến gia tốc để xác định tần số dao động của một sàn Composite trọng lượng nhẹ để khảo sát ảnh hưởng của chiều dày sàn đến tần số. Trong khi đó, nghiên cứu của Allahyari và cs. [11] chỉ sử dụng 1 cảm biến gia tốc để xác định tần số của tấm sàn liên hợp bê tông – thép có chiều dày 0,094 m.

Tuy nhiên, đối với các kết cấu hư hỏng nhỏ chỉ dựa vào sự thay đổi tần số dao động là không đủ để nhận dạng và thông tin này cũng không thể xác định được các hư hỏng cục bộ. Do đó các thí nghiệm xác định dạng dao động được thực hiện. Nghiên cứu của Kim và cs. [12] sử dụng 7 cảm biến gia tốc cách nhau 1 m để xác định bốn tần số và dạng dao động uốn của kết cấu dầm bê tông ứng lực trước tiết diện chữ T nhịp 6 m. Bằng cách đánh giá sự thay đổi của dạng dao động nhóm tác giả xác định vị trí hư hỏng trên dầm khi đặt vật nặng lên. Tương tự, nhóm tác giả Alfredo [13] sử dụng 20 cảm biến gia tốc bố trí đều trên bề mặt dầm chữ nhật dài 6 m để xác định hư hỏng do tổn hao ứng lực trong cáp. Trong khi đó, nghiên cứu của Unger và cs. [14] lại sử dụng 74 cảm biến để nhận dạng hư hỏng của dầm ứng lực trước. Gandelli và cs. [15] tìm kiếm hư hỏng trên hai dầm ứng lực trước tiết diện chữ I nhịp 10 m có vết nứt do cắt và uốn bằng tần số và dạng dao động đo được khi sử dụng 5 cảm biến gia tốc. Ngoài ra, Duong Huong Nguyen và cs. [16] nghiên cứu sử dụng 15 cảm biến gia tốc xác định tần số và dạng dao động của bản thép nhằm đánh giá hư hỏng. Ferreira và cs. [17] nghiên cứu thực hiện xác định ba tần số và dạng dao động uốn của hai sàn bê tông cốt thép một phương dày 0,08 m để nhận dạng hư hỏng do nứt. Thí nghiệm động được thực hiện bằng cách sử dụng búa xung có cảm biến lực và kích thích dao động tại nhiều điểm trên sàn. Bên cạnh đó, Lê Thanh Cao và cs. [18] nghiên cứu sự thay đổi về tần số và dạng dao động của sàn bê tông để chẩn đoán vết nứt sàn bằng phương pháp mô phỏng số. Nguyễn Hướng Dương và cs. [19, 20] đã xác định vị trí và chẩn đoán hư hỏng của một sàn thép làm việc một phương sử dụng tần số, dạng dao động bằng phương pháp ma trận độ mềm và đường cong dạng dao động hai chiều.

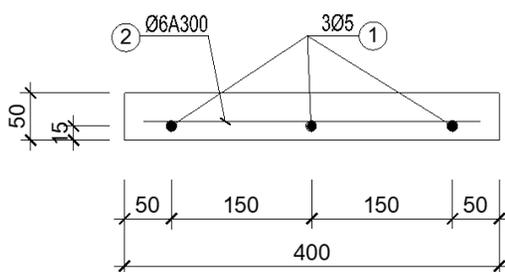
Qua các nghiên cứu trên, có thể thấy rằng đối với kết cấu ứng lực trước các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào phân tích dao động của cấu kiện dầm một chiều (1D). Đối với kết cấu sàn làm việc một phương dạng phẳng hai chiều (2D) thì chưa có phân tích động cho sàn ứng lực trước căng trước. Việc lựa chọn số lượng và bố trí cảm biến phụ thuộc vào thời gian, trang thiết bị thí nghiệm và đóng vai trò quan trọng trong xác định độ chính xác của dạng dao động. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu, ảnh hưởng của mật độ cảm biến vẫn chưa được xem xét rõ ràng. Ngoài ra, các nghiên cứu thường tập trung vào kết quả và ít đề cập đến quá trình xử lý dữ liệu sau thí nghiệm. Vì vậy, bài báo này trình bày chi tiết quy trình thí nghiệm, xử lý dữ liệu để xác định tần số, dạng dao động của kết cấu sàn ứng lực trước căng trước bằng kỹ thuật phân tích FDD (Frequency Domain Decomposition). Bên cạnh đó, mô

hình số cũng được xây dựng để so sánh với kết quả thực nghiệm. Đồng thời, một khảo sát ảnh hưởng của việc giảm số lượng cảm biến đến độ chính xác của dạng dao động được thực hiện. Một tham số quan trọng được sử dụng để nhận dạng hư hỏng của kết cấu.

2. Thí nghiệm đo dao động

2.1. Mẫu thí nghiệm

Một tấm sàn bê tông ứng lực trước căng trước có kích thước chiều dài là 3000 mm, rộng là 400 mm và dày là 50 mm được chế tạo tại phòng thí nghiệm và kiểm định công trình trường Đại học Xây dựng Hà Nội với mặt cắt ngang thể hiện ở Hình 1(a). Bản sàn sử dụng bê tông cường độ cao có $f'_c = 52$ MPa. Cốt thép dọc là ba thanh thép cường độ cao đường kính 5 mm, đặt cách nhau 150 mm và cách mặt dưới của sàn là 15 mm. Cốt thép ngang có đường kính 6 mm, đặt cách nhau 300 mm và có $f_y = 240$ MPa. Thí nghiệm kéo thanh thép cường độ cao được thực hiện bằng máy kéo vạn năng INSTRON 5985 tại phòng thí nghiệm sức bền vật liệu được thể hiện ở Hình 1(b) cho cường độ kéo đứt $f_{pu} = 1900$ MPa, cường độ giới hạn chảy lấy theo quy ước 0,2% biến dạng $f_{py} = 1650$ MPa và mô đun đàn hồi $E_p = 150$ GPa. Mức độ ứng lực trong mỗi thanh thép dọc dự kiến là $0,3f_{py}$. Ứng lực trong các thanh thép được theo dõi bởi thiết bị thu thập số liệu điện tử Digital Data Logger P3 thông qua các cảm biến biến dạng (Strain gauge) gắn trên các thanh thép. Kết quả cho thấy ứng lực trong mỗi thanh thép là 10 kN. Mẫu sàn thí nghiệm sau khi đổ bê tông và thiết bị Digital Data Logger P3 được minh họa ở Hình 1(c).



(a) Mặt cắt ngang tấm sàn ứng lực trước căng trước



(b) Thí nghiệm kéo thép



(c) Mẫu thí nghiệm sàn sau khi đổ bê tông

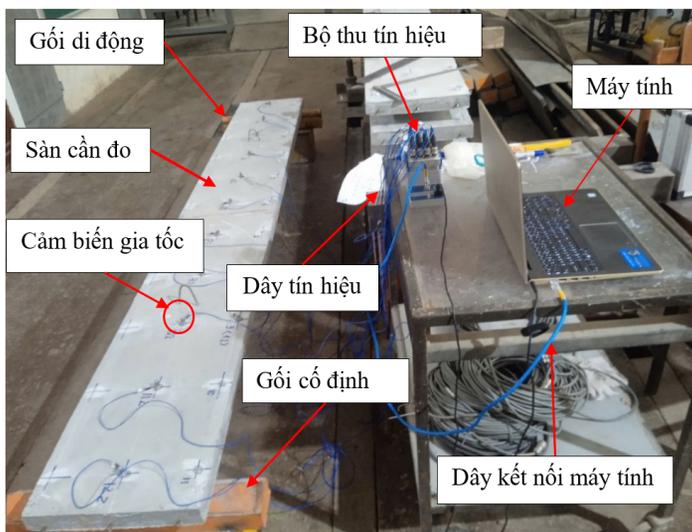
Hình 1. Tấm sàn ứng lực trước căng trước

2.2. Thí nghiệm đo dao động

a. Sơ đồ bố trí thiết bị đo

Tấm sàn ứng lực trước căng trước được kê trên các gối tựa đơn, bề mặt của sàn được vệ sinh sạch sẽ. Sau đó, thực hiện định vị, làm nhãn, sạch các điểm đo và gắn cảm biến gia tốc vào các vị trí. Từ đó

quá trình thu thập dữ liệu được tiến hành với các thiết bị đo được bố trí như Hình 2. Để thu được tín hiệu đo dao động, bản sàn được kích thích dao động cơ học bằng búa cao su. Các cảm biến gia tốc có trọng lượng 7,8 g và độ nhạy trong khoảng 10,13 – 19,5 mV/m/s² có vai trò chuyển đổi dao động cơ học thành tín hiệu điện nhờ một khối lượng quán tính bên trong cảm biến. Tín hiệu điện từ các cảm biến được truyền qua dây tín hiệu tới bộ thu tín hiệu NI (National Instruments). Tại đây, hệ thống NI sẽ lọc nhiễu, khuếch đại tín hiệu điện và chuyển tín hiệu này thành tín hiệu theo thời gian với tần số lấy mẫu được xác định trước. Dạng tín hiệu theo thời gian của từng cảm biến được thu thập và ghi lại bằng máy tính thông qua dây cáp kết nối.



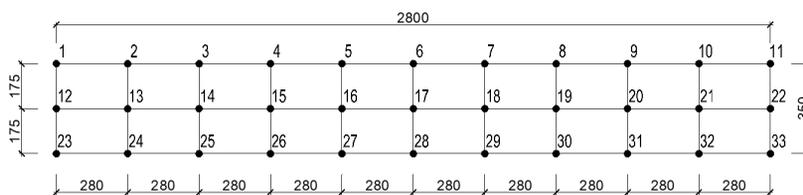
Hình 2. Sơ đồ bố trí thiết bị đo dao động tấm sàn

b. Thí nghiệm đo dao động

Bản sàn làm việc một phương nhưng ở dạng phẳng hai chiều, dẫn đến khi sàn dao động có thể xuất hiện uốn ngang hoặc xoắn do ảnh hưởng của điều kiện biên, sự phân bố khối lượng và tính không đối xứng hình học. Do đó, việc đo dao động theo một đường một chiều không thể phản ánh đầy đủ đặc trưng không gian của dạng dao động. Vì vậy, bề mặt sàn được bố trí 33 cảm biến với 3 hàng, mỗi hàng 11 cảm biến nhằm thu dạng dao động trên toàn sàn. Khoảng cách giữa các cảm biến theo phương dọc là 0,28 m đảm bảo dạng dao động thu được có đủ độ mịn, thể hiện rõ hình dạng cong của sàn, bao gồm vị trí biên độ lớn và các vùng biến đổi nhanh của dạng dao động. Đặc biệt là các dạng dao động bậc cao khi so sánh với mô hình số. Với số lượng cảm biến có hạn do đó cần thực hiện 3 tổ hợp với ba điểm tham chiếu của 13 cảm biến. Vị trí bố trí các cảm biến ở các tổ hợp 1, 2, 3 và ba điểm tham chiếu là 9, 14, 29 được thể hiện ở Hình 3 và Bảng 1.

Bảng 1. Sơ đồ bố trí các cảm biến gia tốc ở mỗi tổ hợp

Tổ hợp	Đầu đo gia tốc thứ												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	14	29
2	9	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	29
3	9	14	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33



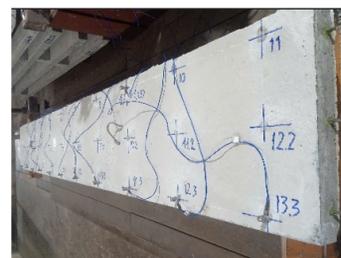
(a) Bề mặt sàn



(b) Tổ hợp 1



(c) Tổ hợp 2



(d) Tổ hợp 3

Hình 3. Vị trí các cảm biến trên bề mặt sàn

Tấm sàn được kê lên gối tựa cố định và gối tựa di động với khoảng cách từ các gối tựa đến đầu sàn là 100 mm. Sau đó, tấm sàn được vệ sinh sạch sẽ và định vị sơ bộ tất cả vị trí cảm biến bằng phấn trắng. Toàn bộ vị trí gắn cảm biến được mài phẳng, nhẵn bằng máy mài cầm tay để giảm ảnh hưởng do nhiễu và được đánh dấu lại bằng bút màu. Thực hiện lần đo thứ nhất với tổ hợp 1, số thứ tự đánh trên sàn được ghi trùng với số trên các cảm biến để tránh nhầm lẫn. Đầu tiên, gắn đế cảm biến vào các vị trí định vị ở tổ hợp 1 trên bề mặt sàn bằng một lớp keo 502 mỏng. Sau khi liên kết đảm bảo, cảm biến được gắn vào đế, đồng thời dây kết nối giữa cảm biến và bộ thu tín hiệu được lắp để xử lý và ghi dữ liệu vào máy tính. Tiếp theo, thực hiện kiểm tra tín hiệu đầu vào trên máy tính ở các cổng kết nối của bộ thu tín hiệu. Thí nghiệm được bắt đầu bằng cách dùng búa cao su gõ vào một vị trí bất kỳ trên sàn một lần duy nhất trong mỗi lần đo. Tần số lấy mẫu $F_s = 2560$ Hz. Thời gian lấy mẫu cho mỗi lần đo là 200 giây đảm bảo đủ dài để thu toàn bộ các tín hiệu dao động tự do của sàn sau khi kích thích, đồng thời tăng độ phân giải phổ, giảm ảnh hưởng của nhiễu làm tín hiệu thu được ổn định hơn. Thực hiện 5 lần đo với tổ hợp 1 để tránh các sai số, thông thường kết quả của lần đo thứ nhất sẽ loại bỏ do nhiễu. Kết quả mỗi lần đo là miền thời gian ở từng cảm biến được lưu vào máy tính. Tiếp tục thực hiện đo dao động sàn với tổ hợp 2, đầu tiên tháo đế, cảm biến ở tổ hợp 1 và vệ sinh sạch sẽ các đế, vị trí tham chiếu bị dính keo 502. Sau đó, thực hiện lại các bước trong lần đo thứ nhất. Cuối cùng, thực hiện đo sàn với tổ hợp 3 như làm ở tổ hợp 2 và kết thúc đo dao động sàn. Thí nghiệm được thực hiện trong phòng với nhiệt độ và độ ẩm ổn định nên có thể bỏ qua ảnh hưởng của các tham số này đến kết quả đo.

3. Xử lý tín hiệu đo dao động

3.1. Lý thuyết FDD

Phương pháp phân tích trên miền tần số FDD là một kỹ thuật nhận dạng dạng dao động chỉ sử dụng dữ liệu đầu ra được sử dụng rộng rãi trong việc phân tích tín hiệu dao động thực nghiệm. FDD cho phép xác định tần số và dạng dao động dựa trên dữ liệu đo tại các vị trí cảm biến gia tốc trên kết cấu mà không cần biết lực kích thích. Phương pháp lần đầu tiên được đề xuất bởi Brincker và cs. [21].

Xét một hệ dao động chịu tác dụng ngẫu nhiên $y(t)$. Mọi tín hiệu dao động $y(t)$ thu được trên kết

cầu đều có thể được biểu diễn dưới dạng tổ hợp của các dạng dao động riêng thể hiện ở công thức (1).

$$y(t) = \sum_{k=1}^n \phi_k q_k(t) \quad (1)$$

trong đó $y(t)$ là tín hiệu miền thời gian đo được ở cảm biến; ϕ_k là dạng dao động thứ k ; $q_k(t)$ là vectơ cột của hệ trục tọa độ riêng.

Sau đó, tín hiệu miền thời gian thu được tại các cảm biến sẽ được chuyển sang miền tần số bằng phép biến đổi Fourier trình bày ở công thức (2) hoặc (3).

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)e^{-j\omega t} dt \quad \text{khi tín hiệu liên tục} \quad (2)$$

$$Y(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n)e^{-j\omega_k n} \quad \text{khi tín hiệu rời rạc} \quad (3)$$

trong đó $Y(\omega)$ là tín hiệu miền tần số đo được ở cảm biến; ω là tần số góc; $y(n)$ là tín hiệu miền thời gian rời rạc; N là số điểm dữ liệu trong miền thời gian.

Kết quả miền tần số xác định từ công thức (2) hoặc (3) được sử dụng trong tính toán ma trận mật độ phổ công suất PSD (Power Spectral Density). Ma trận PSD cho biết năng lượng và tương quan dao động của tất cả các cảm biến ở một tần số dao động. Ma trận PSD của m cảm biến được viết dưới dạng sau:

$$S_{xx}(\omega_k) = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{m1} & S_{m2} & \dots & S_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S_{ii}(\omega_k) = Y_i(\omega_k)\overline{Y_i(\omega_k)} \quad (5)$$

$$S_{ij}(\omega_k) = Y_i(\omega_k)\overline{Y_j(\omega_k)} \quad (6)$$

trong đó $S_{ii}(\omega_k)$ là năng lượng dao động của cảm biến i ở tần số góc ω_k ; $S_{ij}(\omega_k)$ là tương quan dao động giữa cảm biến i và cảm biến j ở tần số góc ω_k .

Sau khi tính toán được ma trận mật độ phổ công suất PSD tại từng tần số góc ω_k , ta thực hiện phân tích giá trị kỳ dị SVD (Singular Value Decomposition) để xác định dạng dao động chiếm ưu thế tại từng tần số, từ đó nhận dạng tần số riêng và dạng dao động của kết cấu. Phép phân tích SVD được biểu diễn bởi công thức (7).

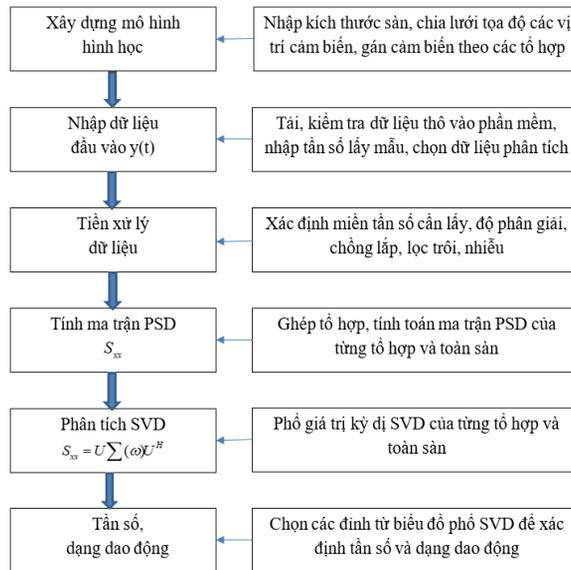
$$S_{xx}(\omega_k) = U(\omega_k) \sum (\omega_k) U^H(\omega_k) \quad (7)$$

trong đó $U(\omega_k)$ chứa các vectơ riêng kỳ dị, cột chứa vectơ riêng có giá trị kỳ dị lớn nhất chính là dạng dao động; $\sum (\omega_k)$ là ma trận đường chéo chứa các giá trị kỳ dị.

Từ đó, phổ SVD được tạo thành bằng cách vẽ các giá trị kỳ dị theo các tần số của kết cấu. Tần số riêng và dạng dao động tương ứng thường được xác định thông qua việc chọn đỉnh trong phổ này.

3.2. Xử lý tín hiệu dao động

Xử lý tín hiệu dao động là quá trình sử dụng kỹ thuật FDD để xác định tần số và dạng dao động từ dữ liệu thô đo được khi thí nghiệm. Quy trình xử lý này được thực hiện bằng phần mềm ARTeMIS có các bước chính thể hiện ở Hình 4 bao gồm xây dựng mô hình hình học, nhập dữ liệu đầu vào, tiền xử lý dữ liệu, tính toán ma trận PSD, phân tích SVD, chọn đỉnh để xác định tần số riêng và dạng dao động. Từ 5 lần đo lặp lại của các tổ hợp, các tập dữ liệu được tổ hợp và so sánh thông qua phổ PSD để lựa chọn những tập ổn định nhất cho quá trình nhận dạng dao động. Tiền xử lý dữ liệu đóng vai trò quan trọng đảm bảo chất lượng dữ liệu đầu vào cho FDD. Dữ liệu thô thu được từ thí nghiệm trước hết được xử lý để loại bỏ giá trị trung bình và xu thế trôi nhằm khử sai lệch nền và trôi tín hiệu. Dải tần phân tích ban đầu được chọn từ 0 đến 320 Hz bao phủ các dạng dao động cần thiết của sàn được lọc trong dải 1–300 Hz để loại bỏ nhiễu nền tần số thấp và nhiễu cao tần. Tiếp theo, tín hiệu được chia thành các đoạn có chiều dài 4096 điểm và chồng lấp 66% giữa các đoạn liên tiếp, qua đó giúp giảm nhiễu ngẫu nhiên và nâng cao độ ổn định của ma trận mật độ phổ công suất trong quá trình phân tích FDD.



Hình 4. Sơ đồ khối xử lý tín hiệu dao động bằng phần mềm ARTeMIS

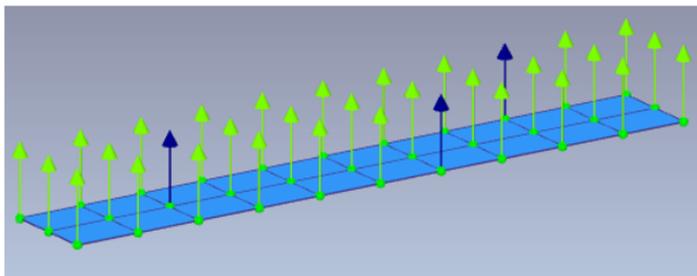
Hình 5 trình bày việc xây dựng mô hình hình học, dữ liệu miền thời gian đo được của một tổ hợp 13 cảm biến gia tốc, phổ SVD toàn sàn và chọn đỉnh được thực hiện trong phần mềm ARTeMIS. Qua Hình 5(c), phổ SVD cho thấy nhiều đỉnh rõ rệt trong dải tần khảo sát, trong đó giá trị kỳ dị ở các tần số thấp chiếm ưu thế so với các bậc còn lại. Điều này chứng tỏ các dạng dao động được tách tốt bằng phương pháp FDD. Nền nhiễu ở mức thấp và có sự suy giảm mạnh ở vùng tần số cao cho thấy dải tần phân tích là phù hợp và chất lượng dữ liệu đo là đáng tin cậy cho nhận dạng dao động.

Thông qua việc chọn đỉnh trong phổ SVD ở Hình 5(d), ta xác định được tần số và dạng dao động của sàn. Kết quả ba tần số và dạng dao động uốn tương ứng được thể hiện ở Bảng 2 và Hình 6.

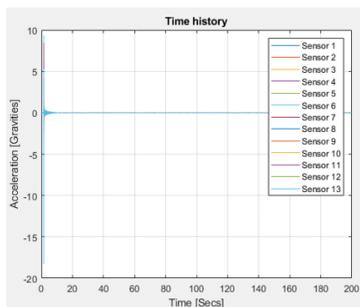
4. Kiểm chứng và khảo sát ảnh hưởng của mật độ cảm biến

4.1. Kiểm chứng với mô phỏng số

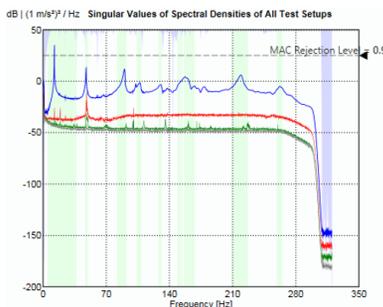
Tấm sàn ứng lực trước căng trước được mô phỏng số bằng phần mềm ANSYS. Phần tử SOLID65 và LINK180 được lựa chọn để mô phỏng cho bê tông và cốt thép. Tấm sàn có kích thước 3000×400×50 mm được liên kết đơn giản ở hai đầu cạnh ngắn đối diện. Ứng lực trước được đưa vào mỗi thanh thép



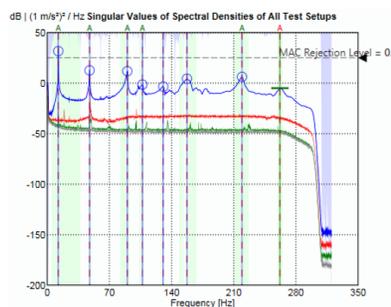
(a) Xây dựng mô hình và gắn cảm biến



(b) Miền thời gian của một tổ hợp

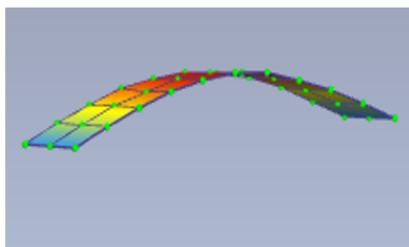


(c) Phổ SVD của toàn sàn

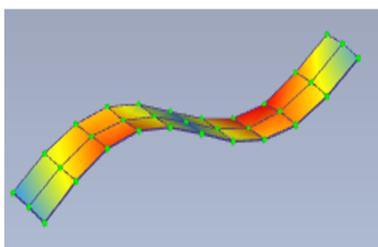


(d) Chọn đỉnh trên phổ SVD toàn sàn

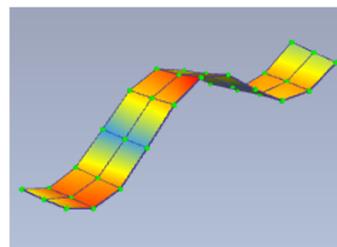
Hình 5. Quá trình xử lý dữ liệu bằng phần mềm ARTEMIS



(a) Dạng dao động thứ nhất



(b) Dạng dao động thứ hai



(c) Dạng dao động thứ ba

Hình 6. Dạng dao động uốn của sàn ứng lực trước căng trước

Bảng 2. Tần số dao động của sàn ứng lực trước căng trước

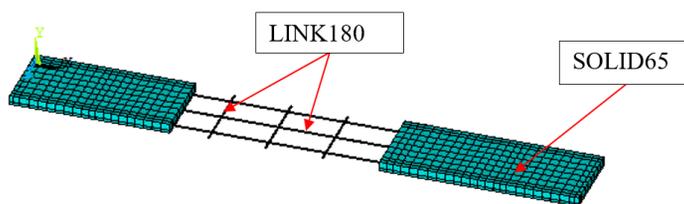
Tần số dao động riêng	Độ lớn (Hz)
Tần số dao động riêng uốn thứ nhất	12,422
Tần số dao động riêng uốn thứ hai	47,656
Tần số dao động riêng uốn thứ ba	107,109

cường độ cao là 10 kN, thông qua biến dạng ban đầu. Liên kết giữa các thanh thép và bê tông được xem là bám dính tuyệt đối do các thanh thép được bao phủ hoàn toàn và liên kết trực tiếp với bê tông xung quanh. Đồng thời, khi làm việc ở giai đoạn đàn hồi, hiện tượng trượt giữa thép với bê tông là không đáng kể và do đó không gây ảnh hưởng nhiều đến các đặc trưng động của sàn. Bản sàn được chia nhỏ thành 1770 phần tử đảm bảo sự hội tụ của kết quả. Mô hình 3D của tấm sàn được thể hiện ở Hình 7 và các đặc trưng cơ lý của vật liệu được thể hiện ở Bảng 3.

Kết quả phân tích và so sánh tần số và dạng dao động của sàn được trình bày ở Hình 8 và Bảng 4.

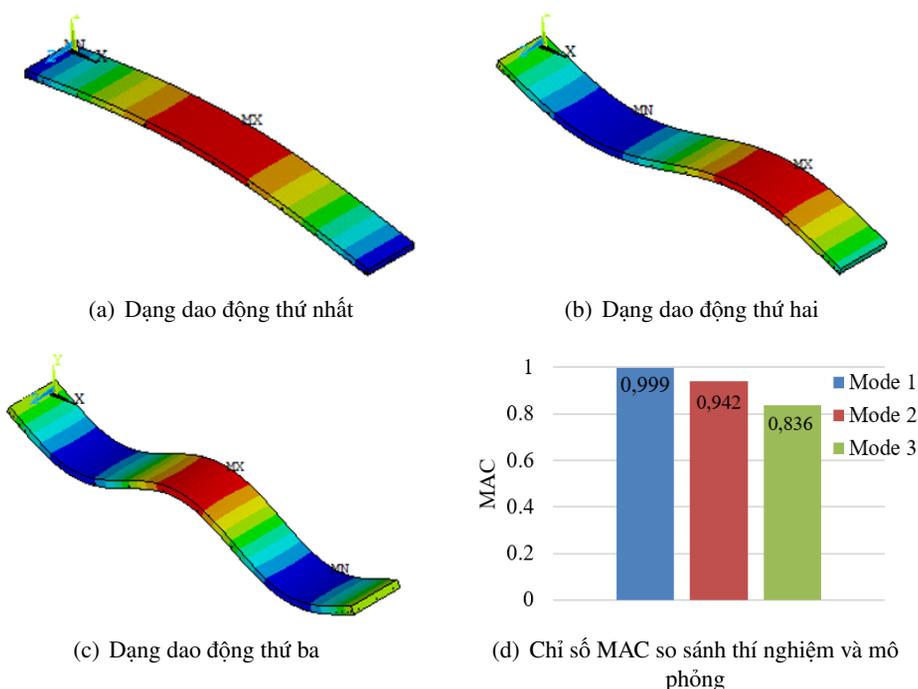
Bảng 3. Đặc trưng cơ lý của vật liệu

Vật liệu	Mô đun đàn hồi (GPa)	Khối lượng riêng (kg/m ³)
Bê tông	40,5	2520
Thép cường độ cao	150	7850
Cốt thép thường	200	7850



Hình 7. Mô phỏng 3D tấm sàn bằng ANSYS

Qua đó có thể thấy, tần số dao động riêng thu được từ mô phỏng có sai số với thí nghiệm lần lượt là 0,98%, 2,53% và 4,03% cho ba dạng dao động uốn đầu tiên. Đồng thời, mức độ tương quan giữa dạng dao động thí nghiệm và mô phỏng được đánh giá thông qua chỉ số MAC (Modal Assurance Criterion) [22], với dạng dao động thứ nhất lên tới 0,999, dạng thứ hai và ba là 0,942 và 0,836. Các giá trị MAC cao này cho thấy rằng việc bố trí mật độ cảm biến với lưới đo gồm 33 cảm biến gia tốc phân bố đều trên bề mặt sàn đã thể hiện đầy đủ và chính xác các dạng dao động. Điều này chứng tỏ mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng có sự tương quan tốt, đáng tin cậy và có thể sử dụng để khảo sát các tham số ảnh hưởng khác.



Hình 8. Dạng dao động uốn của sàn phân tích bằng ANSYS

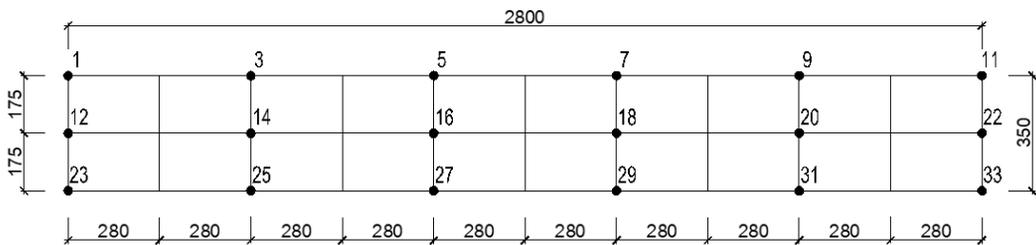
Bảng 4. So sánh tần số dao động sàn thí nghiệm và mô phỏng số

Tần số dao động riêng	Thí nghiệm (Hz)	Mô phỏng (Hz)	Sai số (%)
Tần số dao động riêng uốn thứ nhất	12,422	12,300	0,98
Tần số dao động riêng uốn thứ hai	47,656	46,448	2,53
Tần số dao động riêng uốn thứ ba	107,109	102,790	4,03

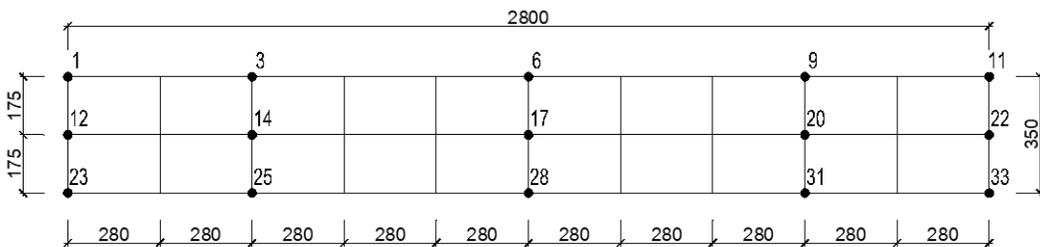
4.2. Ảnh hưởng của mật độ cảm biến đến dạng dao động

Trong các thí nghiệm đo dao động, hệ thống cảm biến đóng vai trò quan trọng trong việc nhận dạng dao động. Tuy nhiên, những hạn chế về trang thiết bị, thời gian lắp đặt và điều kiện thí nghiệm, trong nhiều trường hợp không thể bố trí đầy đủ số lượng cảm biến theo mật độ mong muốn. Vì vậy, nội dung phần này sẽ tiến hành khảo sát hai kịch bản giảm số lượng cảm biến bố trí trên sàn. Kết quả thu được từ hai kịch bản này được so sánh với dạng đầy đủ cảm biến ban đầu và mô phỏng số để đánh giá ảnh hưởng của mật độ cảm biến đến độ chính xác của các dạng dao động.

Hình 9 thể hiện hai kịch bản bố trí cảm biến. Kịch bản thứ nhất số lượng cảm biến giảm từ 33 xuống 18, khoảng cách hai cảm biến tăng từ 0,28 m lên 0,56 m được minh họa ở Hình 9(a). Trong khi đó, kịch bản thứ hai chỉ bố trí 15 cảm biến với khoảng cách lớn nhất giữa hai cảm biến là 0,84 m thể hiện ở Hình 9(b).



(a) Số lượng và vị trí cảm biến kịch bản 1

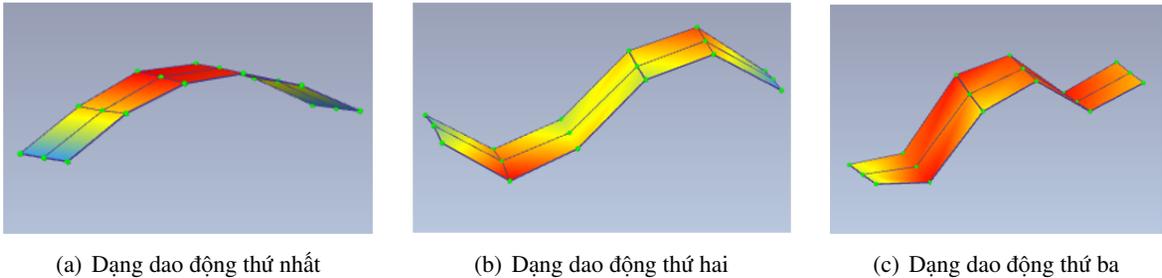


(b) Số lượng và vị trí cảm biến kịch bản 2

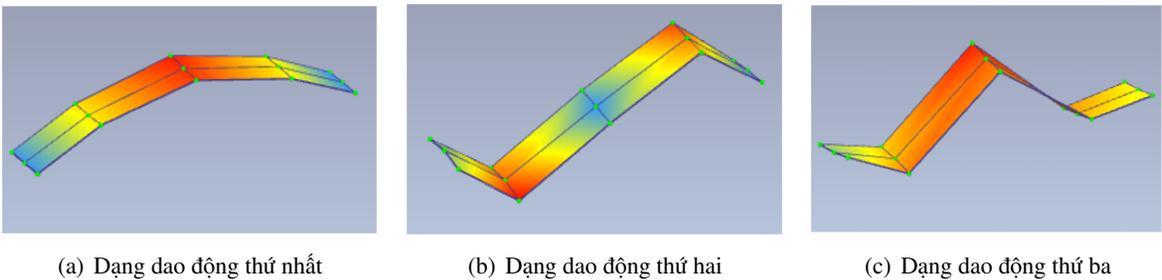
Hình 9. Hai kịch bản bố trí cảm biến

Kết quả ba dạng dao động uốn thu được từ kịch bản thứ nhất và thứ hai thể hiện ở Hình 10 và Hình 11. Qua quan sát hình dạng dao động uốn thể hiện ở Hình 8, Hình 10 và Hình 11, có thể thấy rằng đối với dạng dao động thứ nhất, ở kịch bản thứ nhất hình dạng uốn tổng thể của kết cấu vẫn tương đồng với trường hợp 33 cảm biến, tuy nhiên đã giảm độ trơn hình học. Ở kịch bản thứ hai khi mật độ giảm lớn hơn, dạng dao động chỉ còn phản ánh được xu thế biến dạng chung, trong khi độ cong đã sai khác rõ so với trường hợp mật độ cao. Đối với dạng dao động thứ hai, kịch bản thứ nhất đã xuất hiện sự suy giảm về tính liên tục của đường cong, các đường gấp khúc thể hiện rõ ràng. Trong kịch bản thứ hai khi dùng 15 cảm biến cho thấy dạng dao động bị gãy khúc mạnh, hình dạng sai khác rõ rệt so với

trường hợp ban đầu. Đặc biệt, dạng dao động thứ ba, độ nhảy với mật độ cảm biến thể hiện rõ nhất, ở cả hai kích bản đều cho thấy sự khác nhau đáng kể về tính liên tục của đường cong, dạng dao động trở nên rời rạc rõ rệt, sai khác rất lớn so với trường hợp mật độ cao và rất khó nhận diện chính xác dạng dao động.

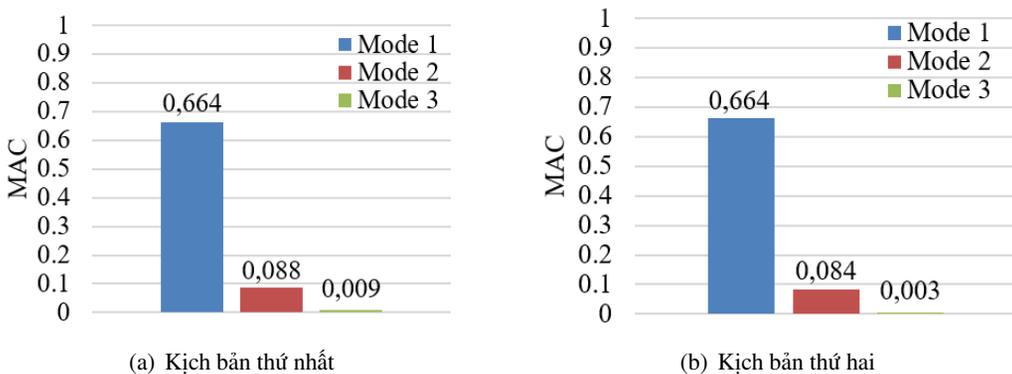


Hình 10. Dạng dao động uốn kích bản 1



Hình 11. Dạng dao động uốn kích bản 2

Hình 12 cho thấy kết quả so sánh chỉ số MAC của ba dạng dao động uốn ở kích bản thứ nhất và kích bản thứ hai với mô phỏng số. Qua đó có thể thấy rằng, khi giảm mật độ cảm biến sẽ không nhận diện được dạng dao động uốn thứ 2 và thứ 3 khi chỉ số MAC nhỏ hơn 0,1. Dạng dao động thứ nhất cũng cho thấy sự tương quan tương đối thấp so với mô phỏng số với chỉ số MAC là 0,664. Điều này thể hiện sự giảm độ chính xác của đường cong dao động. Tuy nhiên, tần số dao động riêng của sàn thì không thay đổi khi giảm số lượng cảm biến so với thí nghiệm đầy đủ cảm biến và sai số so với mô phỏng số được thể hiện ở Bảng 5.



Hình 12. So sánh chỉ số MAC của hai kích bản với mô phỏng số

Bảng 5. Tần số dao động của hai kích bản và sai số so với mô phỏng số

Tần số dao động riêng	Kích bản 1 (Hz)	Kích bản 2 (Hz)	Sai số (%)
Tần số dao động riêng uốn thứ nhất	12,422	12,422	0,98
Tần số dao động riêng uốn thứ hai	47,656	47,656	2,53
Tần số dao động riêng uốn thứ ba	107,109	107,109	4,03

Từ các kết quả so sánh trên, có thể thấy rằng ảnh hưởng của mật độ cảm biến đến độ chính xác dạng dao động là đáng kể. Mật độ cảm biến càng cao thì dạng dao động thu được càng trơn, mượt và phản ánh chính xác dạng dao động của sàn. Ngược lại, khi mật độ cảm biến giảm, các dạng dao động bậc thấp vẫn có thể xác định được hình dạng tổng thể, trong khi các dạng bậc cao cho thấy sự thay đổi rõ rệt về hình dạng hình học và giảm đi độ tin cậy.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã thực hiện đo dao động một tấm sàn ứng lực trước căng trước sử dụng 33 cảm biến gia tốc. Dữ liệu đo dao động từ thí nghiệm được xử lý bằng kỹ thuật phân tích FDD trên phần mềm ARTeMIS để xác định tần số và dạng dao động. Kết quả thu được ba tần số và dạng dao động uốn tương ứng. Kết quả này được so sánh với mô phỏng số cho thấy độ tin cậy cao khi sự sai khác về tần số nhỏ hơn 4% và chỉ số MAC của dạng dao động thứ nhất lớn hơn 99%. Đồng thời, nghiên cứu đã khảo sát ảnh hưởng của mật độ cảm biến đến độ chính xác của dạng dao động thông qua hai kích bản, qua đó chỉ ra rằng mật độ cảm biến có ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng mô tả hình học của các dạng dao động, đặc biệt đối với các dạng dao động bậc cao.

Tuy nhiên, để có thể tối ưu được mật độ cảm biến thì cần phải có thêm các khảo sát trên sàn và trên các cấu kiện khác. Bên cạnh đó, các thí nghiệm có thể tiếp tục được thực hiện để khảo sát ảnh hưởng của các tham số khác như mức độ ứng lực trước, đặc trưng vật liệu, hình học và các hư hỏng đến các đặc trưng động của sàn.

Tài liệu tham khảo

- [1] Carden, E. P., Fanning, P. (2004). [Vibration-based condition monitoring: A review](#). *Structural Health Monitoring*, 3(4):355–377.
- [2] Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B. (1998). [A summary review of vibration-based damage identification methods](#). *The Shock and Vibration Digest*, 30(2):91–105.
- [3] Salawu, O. S. (1997). [Detection of structural damage through changes in frequency: A review](#). *Engineering Structures*, 19(9):718–723.
- [4] Saiidi, M., Douglas, B., Feng, S. (1994). [Prestress force effect on vibration frequency of concrete bridges](#). *Journal of Structural Engineering*, 120(7):2233–2241.
- [5] Li, J., Zhang, F. (2016). [Experimental research and numerical simulation of influence of pre-stress values on the natural vibration frequency of concrete simply supported beams](#). *Journal of Vibroengineering*, 18(7):4592–4604.
- [6] Jang, J.-B., Lee, H.-P., Hwang, K.-M., Song, Y.-C. (2010). [A sensitivity analysis of the key parameters for the prediction of the prestress force on bonded tendons](#). *Nuclear Engineering and Technology*, 42(3): 319–328.
- [7] Noble, D., Nogal, M., Pakrashi, V. (2016). [The effect of prestress force magnitude and eccentricity on the natural bending frequencies of uncracked prestressed concrete beams](#). *Journal of Sound and Vibration*, 365:22–44.
- [8] Cù, V. H., Bùì, Q. B., Trần, A. Q., Trần, V. H. (2025). [Nghiên cứu dao động kết cấu nhịp cầu dầm đơn giản sử dụng vật liệu bê tông chất lượng siêu cao \(UHPC\)](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 19(1V):46–59.
- [9] Ercolani, G. D., Felix, D. H., Ortega, N. F. (2018). [Crack detection in prestressed concrete structures by measuring their natural frequencies](#). *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(4):661–671.

- [10] Jaini, Z. M., Sugiura, K., Abdul Kudus, S., Rum, R. H. M., Hakim, S. J. S., Abd Ghafar, N. H. (2023). [Natural frequency of lightweight composite slabs based on experimental study and numerical modelling](#). *International Journal of Integrated Engineering*, 15(6):87–97.
- [11] Allahyari, H., Nikbin, I. M., Rahimi, S., Allahyari, A. (2018). [Experimental measurement of dynamic properties of composite slabs from frequency response](#). *Measurement*, 114:150–161.
- [12] Kim, J.-T., Park, J.-H., Hong, D.-S., Park, W.-S. (2010). [Hybrid health monitoring of prestressed concrete girder bridges by sequential vibration-impedance approaches](#). *Engineering Structures*, 32(1):115–128.
- [13] Cigada, A., Caprioli, A., Vanali, M. (2010). Experimental investigation of the pre-tension effects on the modal parameters of a slender pre-tensioned concrete beam. *Proceedings of the IMAC-XXVIII Conference*, Jacksonville, Florida, USA.
- [14] Unger, J. F., Teughels, A., De Roeck, G. (2006). [System identification and damage detection of a prestressed concrete beam](#). *Journal of Structural Engineering*, 132(11):1691–1698.
- [15] Gandelli, E., Rossini, G., Mantelli, S. G., Minelli, F. (2024). [Damage detection of prestressed concrete beams affected by shear and flexure cracks through vibration monitoring](#). *Engineering Structures*, 304: 117572.
- [16] Nguyen, D. H., Ho, L. V., Bui-Tien, T., De Roeck, G., Wahab, M. A. (2020). [Damage evaluation of free-free beam based on vibration testing](#). *Applied Mechanics*, 1(2):142–152.
- [17] Ferreira, G. S., Pimentel, R. L., Barbosa, F. d. S. (2020). [Evaluation of two crack models for reinforced concrete one-way slabs subjected to bending by means of modal tests](#). *Structures*, 28:2013–2022.
- [18] Cao, L. T., Sỹ, B. V., Linh, P. B., Diêu, N. H., Duy, H. Đ. (2024). [Chẩn đoán vết nứt trong kết cấu tấm bê tông cốt thép sử dụng các đặc trưng dao động](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 18(3V):64–80.
- [19] Nguyễn, H. D., Nguyễn, Q. B. (2023). [Xác định vị trí hư hỏng trên kết cấu dạng bản sử dụng ma trận độ mềm và số liệu đo dao động](#). *Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải*, 74(5):570–581.
- [20] Nguyen, D. H., Abdel Wahab, M. (2023). [Damage detection in slab structures based on two-dimensional curvature mode shape method and Faster R-CNN](#). *Advances in Engineering Software*, 176:103371.
- [21] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. (2001). [Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition](#).
- [22] Pastor, M., Binda, M., Harčarik, T. (2012). [Modal Assurance Criterion](#). *Procedia Engineering*, 48:543–548.