



DAMAGE LOCALIZATION IN SLAB STRUCTURES USING FLEXIBILITY MATRIX AND VIBRATION MEASUREMENT

Nguyen Huong Duong*, Nguyễn Quốc Bảo

Hanoi University of Civil Engineering, No 55 Giai Phong Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 15/03/2023

Revised: 17/04/2023

Accepted: 06/06/2023

Published online: 15/06/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.2>

* *Corresponding author*

Email: duongnh2@huce.edu.vn ; Tel: +84973092239

Abstract. Structural health monitoring based on vibration measurement methods belongs to the group of non-destructive methods and has potential in practice. Research using these methods is necessary, providing the chance for early detection and localization of damaged area. Based on accelerometer data, the dynamic characteristic of the structure will be found and used to determine the location of the damage. Despite analyzing the modal parameters of slab structures in two directions with complex operations, the flexibility matrix method only calculates at each degree of freedom and uses the same calculations with the beam structure. In this paper, the damage indexes that are calculated from the difference in the flexibility matrix in the damaged scenarios and the intact are used to locate the damage in the slab structure. This method is applied to a simply supported numerical slab model with one and two damaged positions. As a result, the damage indexes accurately show the location of the damage on this model. Moreover, the method that uses a flexibility matrix could determine the location of the damage in a slab prototype.

Keywords: structural health monitoring, slab structure, vibration-based damage detection method, flexibility matrix



XÁC ĐỊNH VỊ TRÍ HƯ HỒNG TRÊN KẾT CẤU DẠNG BẢN SỬ DỤNG MA TRẬN ĐỘ MỀM VÀ SỐ LIỆU ĐO DAO ĐỘNG

Nguyễn Hương Dương *, Nguyễn Quốc Bảo

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Số 55 Giải Phóng, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 15/03/2023

Ngày nhận bài sửa: 17/04/2023

Ngày chấp nhận đăng: 06/06/2023

Ngày xuất bản Online: 15/06/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.2>

* Tác giả liên hệ

Email: duongnh2@huce.edu.vn; Tel: +84973092239

Tóm tắt. Đánh giá sức khỏe công trình dựa vào phương pháp đo dao động thuộc nhóm phương pháp không phá hoại và có khả năng áp dụng trong thực tế. Việc nghiên cứu áp dụng sử dụng các phương pháp này là cần thiết, tạo điều kiện phát hiện sớm và khoanh vùng được vị trí hư hỏng. Dựa vào số liệu đo gia tốc, dạng dao động riêng của hệ sẽ được tìm thấy và sử dụng để xác định vị trí của hư hỏng trong kết cấu. Nếu như các phương pháp đánh giá sức khỏe công trình sử dụng dạng dao động riêng khi áp dụng cho kết cấu dạng bản thì cần phân tích hệ làm việc theo 2 phương với các phép toán phức tạp thì phương pháp sử dụng ma trận độ mềm chỉ tính độ mềm của hệ tại từng bậc tự do và sử dụng các phép tính tương tự với hệ kết cấu dạng dầm. Trong bài báo này, hệ số hư hỏng được tính toán từ sai khác ma trận độ mềm ở trạng thái hư hỏng và trạng thái nguyên được sử dụng để xác định vị trí hư hỏng của kết cấu dạng bản. Phương pháp được áp dụng trên mô hình số kết cấu bản giản đơn có một và hai vị trí hư hỏng. Kết quả là hệ số hư hỏng phản ánh hoàn toàn chính xác vị trí hư hỏng trên mô hình này. Với mô hình bản giản đơn trong phòng thí nghiệm, phương pháp sử dụng ma trận độ mềm xác định tương đối chính xác vị trí hư hỏng.

Từ khóa: đánh giá sức khỏe công trình, kết cấu bản, vị trí hư hỏng, phương pháp đo dao động, ma trận độ mềm.

© 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

1 ĐẶT VẤN ĐỀ

Phương pháp đánh giá sức khỏe công trình sử dụng các đặc tính dao động đã được nghiên cứu từ đầu những năm 1980 [1]. Trong phương pháp này, phản ứng đo dao động của công trình trên miền thời gian được ghi lại bởi nhiều loại đầu đo khác nhau như đầu do biến dạng,

gia tốc, chuyển vị. Các dữ liệu đo dao động này có thể được chuyển qua miền tần số bằng cách sử dụng các phép biến đổi Fourier, từ đó tìm ra các thông số đặc trưng dao động của hệ. Mặc dù số liệu đo dao động thu thập được từ phản ứng của hệ là trên miền tần số nhưng các thuật toán đánh giá sức khỏe công trình thường phân tích số liệu trên miền thời gian và miền đặc trưng dao động. Các thuật toán xử lý số liệu đo dao động cũng được đề xuất để dữ liệu đo được chuyển đổi dễ dàng và hạn chế tối đa ảnh hưởng của nhiễu [2-4].

Đối với kết cấu dạng bản như bản mặt cầu, khi áp dụng các phương pháp sử dụng các đáp ứng dao động của hệ sẽ phức tạp hơn so với các kết cấu dạng dầm. Phương pháp sử dụng dạng dao động riêng khi áp dụng cho kết cấu dạng bản cần tính toán toán dạng dao động riêng và độ cong của dạng dao động theo hai phương [5]. Các phương pháp sử dụng tần số dao động riêng thì khá đơn giản nhưng lại dễ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố tác động từ môi trường. Phương pháp sử dụng ma trận độ mềm có thể xác định được vị trí hư hỏng của kết cấu với quy trình tính toán đơn giản, không cần sử dụng các dạng dao động bậc cao nên nhận được khá nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu. Bởi vì khi sử dụng dữ liệu đo hiện trường, các dạng dao động bậc cao với tần số lớn rất khó để đo chính xác. Ma trận độ mềm được định nghĩa là nghịch đảo của ma trận độ cứng, do đó sẽ liên quan tới chuyển vị của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng. Mỗi cột trong ma trận độ mềm đại diện cho một bậc tự do của hệ dưới tác dụng của ngoại lực đơn vị. Ma trận độ mềm lần đầu được đề xuất bởi Bernan và cs [6] và đến nay vẫn được sử dụng rộng rãi. Một ví dụ cho việc sử dụng ma trận độ mềm là nghiên cứu được thực hiện bởi Li và cs [7], Dionisio [8]. Li và cs [7] đề xuất một biện pháp nhằm xác định hư hỏng trong các kết cấu mảnh như là nhà cao tầng, ống khói bằng cách giả thiết mô hình các kết cấu này như là một dầm nút thừa. Hư hỏng trong mô hình số dầm liên tục hai nhịp và khung hai tầng được xác định chính xác nhờ sự thay đổi của ma trận độ mềm và tần số dao động riêng [9]. Bên cạnh đó các thuật toán mới dựa trên ma trận độ mềm cũng được phát triển [10, 11]. Sử dụng ma trận độ mềm còn có thể xác định được vị trí hư hỏng trên kết cấu dạng bản khi mà dạng dao động riêng tìm được bị khuyết [12].

Trong bài báo này, ma trận độ mềm và các tần số dao động riêng được sử dụng để tìm ra vị trí hư hỏng trong kết cấu dạng bản. Bài báo gồm 5 phần. Phần đầu tiên là phần đặt vấn đề và tiếp theo là phần cơ sở lý thuyết. Mô hình số cầu bản với các kích bản hư hỏng khác nhau được trình bày ở phần 3. Phần 4 trình bày mô hình bản trong phòng thí nghiệm và phần 5 là phần kết luận.

2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Phương trình cân bằng dao động của hệ có thể được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{K}\Phi = \mathbf{M}\Phi\Omega \quad (1)$$

Trong đó:

\mathbf{K} : là ma trận độ cứng

\mathbf{M} : là ma trận khối lượng

$\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n]$ là ma trận dạng dao động bao gồm các véc tơ dao động riêng tương ứng với n là số dạng dao động riêng phân tích.

$\Omega = \text{diag}(\omega_i^2)$ is the ma trận đường chéo trong đó ω_i là tần số dao động riêng tại dạng dao động thứ i .

Giả sử ta quy đồng ma trận dạng dao động riêng về đơn vị sao cho $\Phi\mathbf{M}\Phi^T = \mathbf{I}$, trong đó \mathbf{I} là ma trận đơn vị thì ma trận độ cứng \mathbf{K} và ma trận độ mềm \mathbf{FM} là nghịch đảo của ma trận độ cứng được Pandey et al. [13] viết lại như sau:

$$\mathbf{K} = \mathbf{M}\Phi\Omega\Phi^T\mathbf{M} = \mathbf{M}\left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \Phi_i\Phi_i^T\right)\mathbf{M} \quad (2)$$

$$\mathbf{FM} = \mathbf{K}^{-1} = \Phi\Omega^{-1}\Phi^T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^2} \Phi_i\Phi_i^T \quad (3)$$

Khi hư hỏng xuất hiện tại một vị trí nào trong kết cấu thì sẽ làm giảm độ cứng của hệ tại vị trí đó. Bởi vì ma trận độ mềm được định nghĩa là nghịch đảo của ma trận độ cứng nên sự xuất hiện của hư hỏng sẽ làm tăng giá trị của ma trận độ mềm. Chính vì vậy ma trận độ mềm có thể được sử dụng để xác định vị trí hư hỏng trong hệ kết cấu có nhiều bậc tự do. Ma trận độ hư được định nghĩa là sự sai khác của ma trận độ mềm tại thời điểm hệ đã bị hư hỏng và thời điểm hệ nguyên. Ma trận độ hư được tính như sau:

$$\Delta = \mathbf{FM}_d - \mathbf{FM}_u = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_{di}^2} \Phi_{di}\Phi_{di}^T - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_{ui}^2} \Phi_{ui}\Phi_{ui}^T \quad (4)$$

Trong đó:

\mathbf{FM}_d : là ma trận độ mềm khi hệ kết cấu đã bị hư hỏng

\mathbf{FM}_u : là ma trận độ mềm khi hệ kết cấu nguyên

Φ_{di} và Φ_{ui} là dạng dao động riêng thứ i tương ứng với hệ hư hỏng và hệ nguyên

ω_{di} và ω_{ui} là tần số dao động riêng i tương ứng với hệ hư hỏng và hệ nguyên

Hệ số hư hỏng tại mỗi bậc tự do thứ j được định nghĩa là hệ số lớn nhất trên ma trận độ hư Δ . Hệ số hư hỏng sẽ lớn nhất tại vị trí xảy ra hư hỏng. Hệ số hư hỏng tại mỗi vị trí bậc tự do j của hệ được tính như sau:

$$DI_j = \max_j |\Delta_{ij}| \quad (5)$$

3 MÔ HÌNH SỐ

Một mô hình phần tử hữu hạn mô hình kết cấu dạng bản nhíp giản đơn được mô phỏng trong phần mềm SAP2000 V22. Mô hình bản có chiều dài 2,5m rộng 0,35m và dày 0,01m. Điều kiện biên của tấm được mô phỏng một gối cố định và một gối tự do. Khoảng cách giữa hai gối là 2m. Vật liệu mô phỏng là thép có mô đun đàn hồi $E_s = 200000 \text{ MPa}$ và khối lượng riêng $\rho = 7820 \text{ kg/m}^3$. 1020 phần tử tấm chịu uốn được dùng để mô phỏng toàn bộ kết cấu tấm. Hình 1 thể hiện mô hình kết cấu cầu bản nhíp giản đơn.

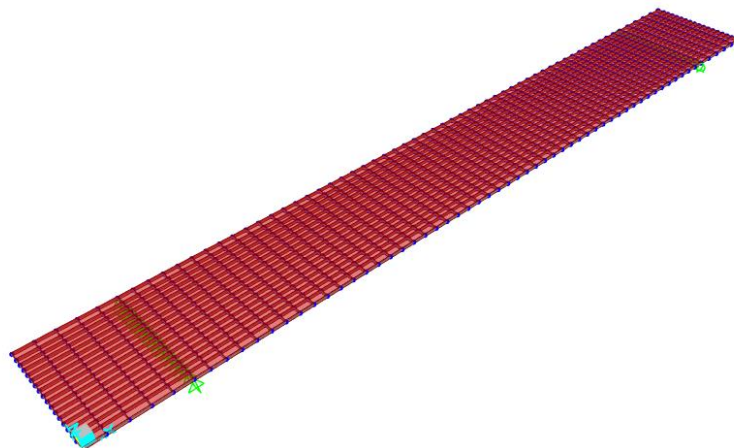
Các kịch bản hư hỏng khác nhau được tạo ra trên mô hình số. Trong các kịch bản này hư hỏng được giả thiết là trên bản xuất hiện các lỗ có kích thước (0,08;0,04) m. Hình 2 mô phỏng lại vị trí các hư hỏng trong từng kịch bản. Kịch bản hư hỏng thứ 1 và 2 có 1 vị trí hư hỏng và kịch bản 3 có 2 vị trí hư hỏng. Tấm bản được chia thành 45 vùng diện tích khác nhau được

đánh số theo phương dọc và ngang như trong Hình 2. Hệ số hư hỏng xác định từ phương pháp sử dụng ma trận độ mềm được sử dụng để xác định vùng hư hỏng trong từng kích bản.

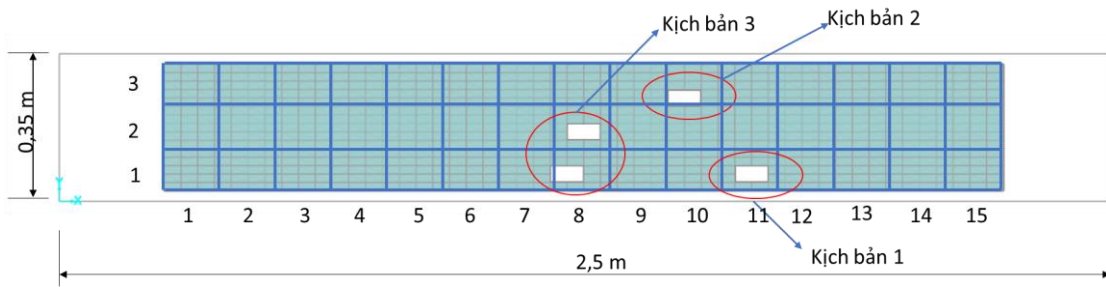
Bảng 1 thể hiện tần số dao động riêng của 6 dạng dao động đầu tiên của bản cho trường hợp bản nguyên không hư và 3 kích bản hư hỏng. Ta nhận thấy rằng khi hư hỏng xảy ra tần số dao động riêng thay đổi rất ít, và tỷ lệ thay đổi là khác nhau giữa các dạng dao động. Dựa vào tần số dao động riêng rất khó để xác định được hư hỏng cũng như vị trí của hư hỏng trên tấm.

Để tính toán được hệ số hư hỏng dựa vào ma trận độ mềm, bên cạnh tần số dao động riêng, các dạng dao động được cũng cần được phân tích. Ma trận dạng dao động Φ được chuẩn hóa về đơn vị sao cho $\Phi\mathbf{M}\Phi^T = \mathbf{I}$, trong đó \mathbf{I} là ma trận đơn vị. Ma trận khối lượng \mathbf{M} và ma trận dạng dao động Φ được xác định tại các vị trí được quan sát. Trong bài toán này là 16 vị trí theo phương dọc và 4 vị trí theo phương ngang. Ma trận độ mềm được tính toán dựa vào ma trận dao động Φ sau chuẩn hóa theo công thức (3) cho trường hợp bản nguyên và bản hư hỏng. Sau đó, sử dụng công thức (4) và (5), hệ số hư hỏng được xác định và thể hiện trên Hình 3.

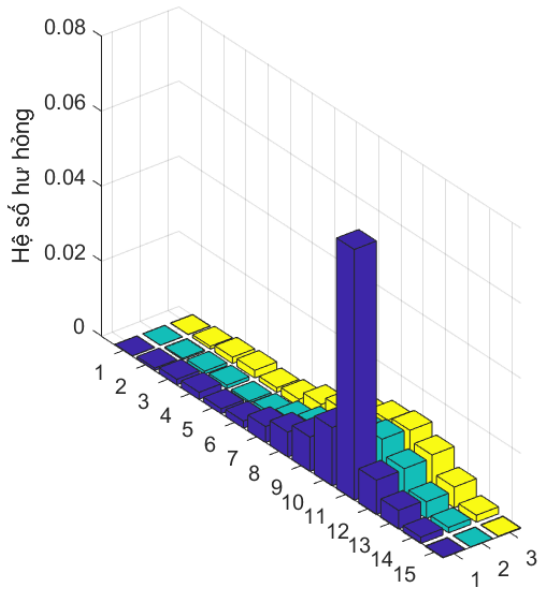
Quan sát Hình 3 thấy rằng dựa vào hệ số hư hỏng thì vùng hư hỏng của cả 3 kích bản đều được tìm thấy. Với kích bản 1, vùng hư hỏng nằm trọn vẹn trong vùng số 11 theo phương dọc và số 1 theo phương ngang. Hình 3a cho thấy hệ số hư hỏng trong vùng này lớn hơn tất cả các vùng còn lại. Với kích bản 2, vùng hư hỏng nằm ở mép vùng số 10 theo phương dọc và số 3 theo phương ngang. Vì vùng hư hỏng nằm tại mép nên hệ số hư hỏng không những lớn tại vị trí này mà còn tương đối lớn ở các vị trí lân cận gần với vùng bị hư. Tương tự với kích bản 3, cả hai vị trí hư hỏng trên kích bản này đều được tìm thấy dựa vào hệ số hư hỏng. Với vùng hư hỏng nằm tại mép các vùng tính toán trên bản, hệ số hư hỏng không những cao tại vị trí hư mà còn cao tại các vị trí lân cận. Hệ số hư hỏng trong các kích bản được tính toán với trường hợp sử dụng cả 6 dạng dao động và trường hợp chỉ sử dụng 2 dạng dao động riêng đầu tiên. Kết quả cho thấy rằng khi chỉ sử dụng 2 dạng dao động riêng, hệ số hư hỏng tính toán được sẽ nhỏ hơn khi sử dụng cả 6 dạng dao động nhưng không nhiều. Chỉ sử dụng 2 dạng dao động cũng tìm ra được chính xác vị trí của vùng hư hỏng như khi sử dụng nhiều dạng dao động. Như vậy, phương pháp đề xuất xác định được chính xác vùng chứa hư hỏng trong cả hai trường hợp có một vùng hư, có nhiều vùng hư ngay cả khi chỉ sử dụng 2 dạng dao động riêng đầu tiên.



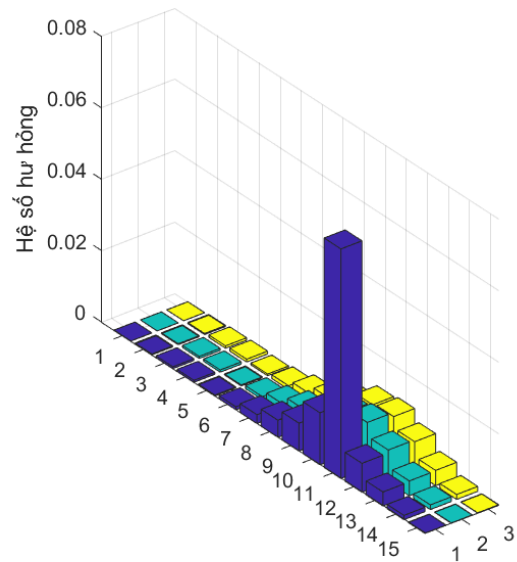
Hình 1. Mô hình bản trong phần mềm SAP2000.



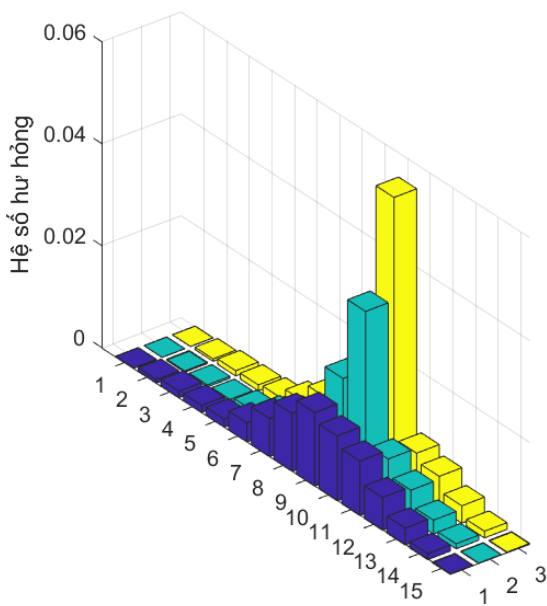
Hình 2. Các kịch bản hư hỏng.



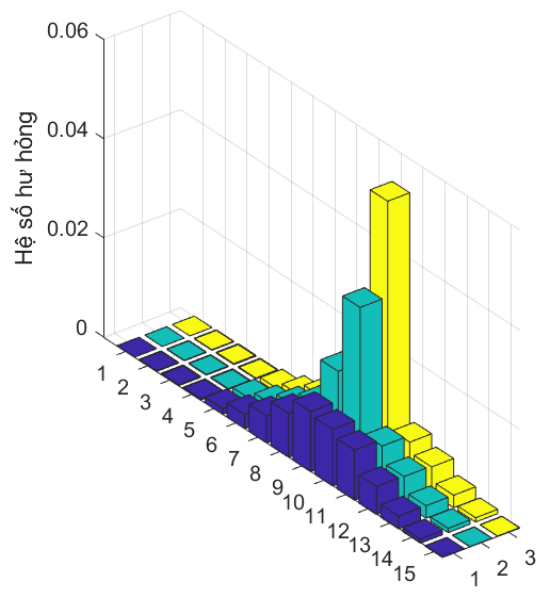
a. Kịch bản 1 (6 dạng dao động)



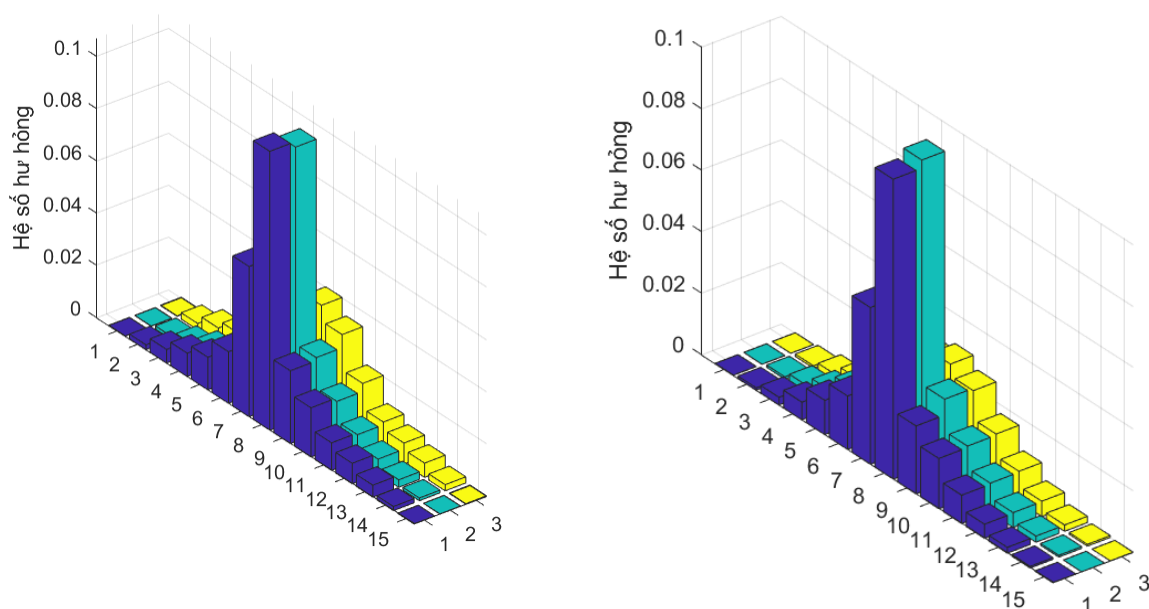
a1. Kịch bản 1 (2 dạng dao động)



b. Kịch bản 2 (6 dạng dao động)



b1. Kịch bản 2 (2 dạng dao động)



c. Kích bản 3 (6 dạng dao động)

c1. Kích bản 3 (2 dạng dao động)

Hình 3. Hệ số hư hỏng tính cho trường hợp sử dụng 6 và 2 dạng dao động.

Bảng 1. Tần số dao động riêng của tấm bản nguyên và ba kích bản hư hỏng.

Dạng dao động	Tần số dao động				Sự sai khác so với tấm nguyên (%)		
	Bản nguyên	Kịch bản 1	Kịch bản 2	Kịch bản 3	Kịch bản 1	Kịch bản 2	Kịch bản 3
1	5,69	5,68	5,67	5,65	-0,18	-0,18	-0,35
2	21,94	21,89	21,92	21,94	-0,23	0,14	0,09
3	45,49	45,48	45,47	45,28	-0,02	-0,02	-0,42
4	47,13	47,19	47,18	47,41	0,13	-0,02	0,49
5	69,04	68,99	68,96	69,02	-0,07	-0,04	0,09
6	90,95	90,89	90,94	90,67	-0,07	0,06	-0,30

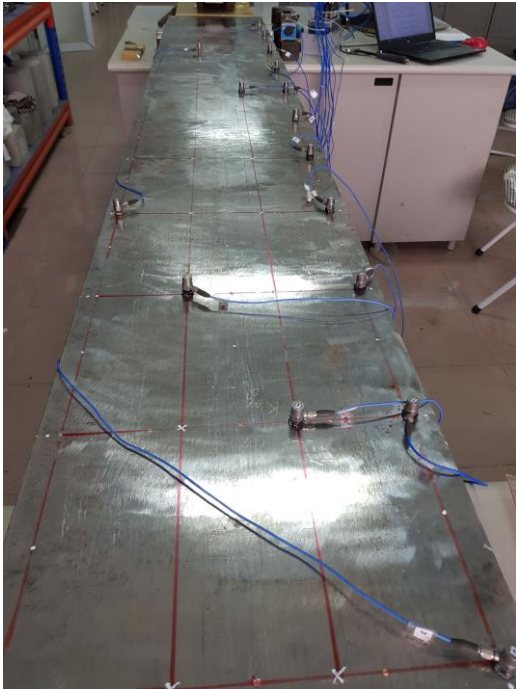
4 MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM

4.1 Bản nguyên

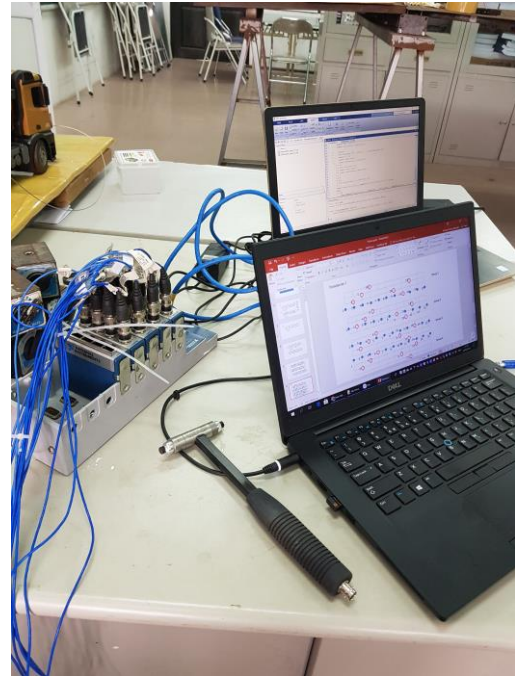
Mô hình cầu bản nhịp giản được được thiết lập trong phòng thí nghiệm của bộ môn Cầu Công trình ngầm, trường Đại học Xây Dựng Hà nội. Mô hình bản làm bằng thép, bố trí một gối cố định và 1 gối di động. Khoảng cách giữa hai gối là 2 m. Tấm bản dài 2,5 m rộng 0,35 m và dày 0,01 m. Hình 4 thể hiện mô hình bản và các thiết bị sử dụng trong phòng thí nghiệm.

Để xác định tần số dao động riêng, dạng dao động trong bản thí nghiệm, thiết bị đo gia tốc NI được sử dụng. Các đầu đo gia tốc có trọng lượng khoảng 7,8g và độ nhạy từ 10,13 –

$10,50 \text{ mV/m/s}^2$. Tần số lấy mẫu là 1260 Hz và thời gian lấy mẫu là 300s . Búa chuyên dụng gõ lên bề mặt bản để kích thích dao động. 15 đầu đo gia tốc, 4 sơ đồ được sử dụng để đo lại dao động của 44 vị trí trên dầm. 6 vị trí đo được cố định trên tất cả các sơ đồ. Vị trí và sơ đồ đo được thể hiện trên Hình 5. Thuật toán phân tích dữ liệu đo SSI [14] được sử dụng để tìm ra tần số và dạng dao động riêng của hệ. Hình 6 thể hiện hai dạng dao động riêng được tìm thấy từ dữ liệu đo dao động bản và tương đồng với hình dạng dao động riêng của kết cấu bản theo lý thuyết và mô hình. Bảng 2 thể hiện tần số dao động riêng của bản nguyên thí nghiệm. Tần số riêng của dạng dao động thứ nhất là $5,74 \text{ Hz}$, sai khác $0,87\%$ so với mô hình số là $6,69 \text{ Hz}$. Tương tự, tần số riêng của dạng dao động thứ hai là $21,89 \text{ Hz}$, sai khác $0,23\%$ so với mô hình số. Dạng dao động và tần số riêng của mô hình thí nghiệm và mô hình số có độ tương đồng cao.

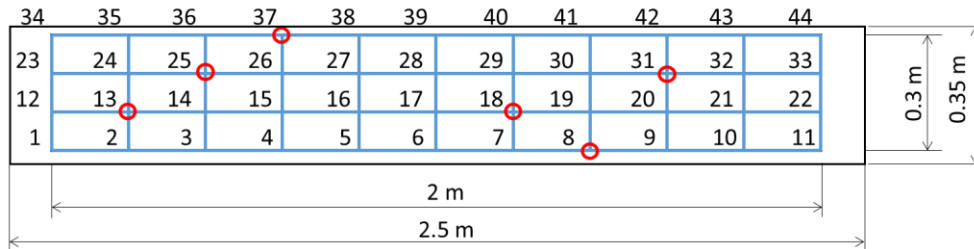


a. Sơ đồ bản thí nghiệm



b. Các thiết bị thí nghiệm

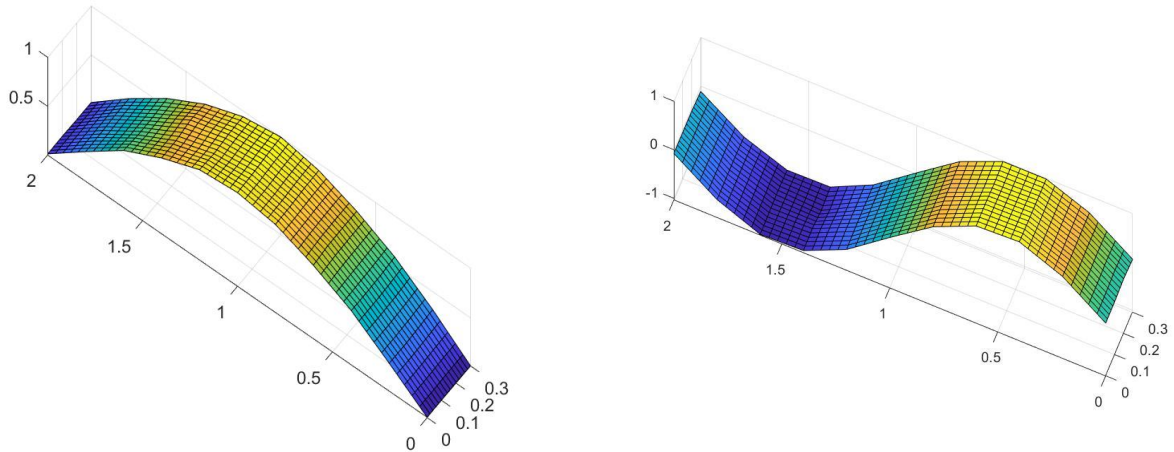
Hình 4. Mô hình thí nghiệm trong phòng.



○ Vị trí cố định

- Sơ đồ 1: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 18, 25, 31, 37
- Sơ đồ 2: 8, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 31, 37
- Sơ đồ 3: 8, 13, 18, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 37
- Sơ đồ 4: 8, 13, 18, 25, 31, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44

Hình 5. Sơ đồ các vị trí đo trên bản.



a. Dạng dao động thứ nhất

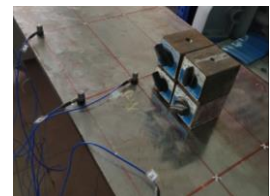
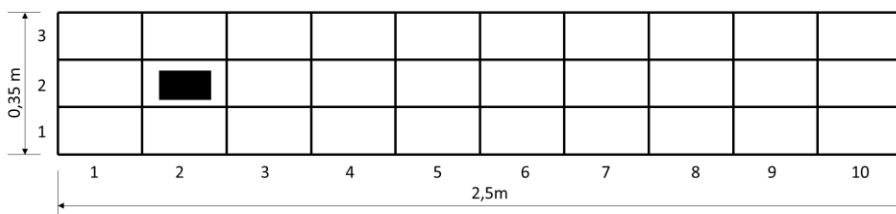
b. Dạng dao động thứ hai

Hình 6. Dạng dao động của mô hình bản thí nghiệm xác định từ số liệu đo dao động.

4.2 Bản hư hỏng

Dầm được chia thành 30 vị trí tương ứng với các vị trí đặt đầu đo gia tốc như trên Hình 7. Để mô phỏng dầm bị hư hỏng, tải trọng có khối lượng 9kg được đặt trên tấm bản tại vị trí thứ 2 theo phương dọc và thứ 2 theo phương ngang. Các đầu đo gia tốc và 4 sơ đồ đo được bố trí như trong trường hợp dầm nguyên. Từ đó 2 dạng dao động đầu tiên của dầm hư hỏng mô phỏng cũng được tìm ra.

Bảng 2 thể hiện tần số dao động riêng của hệ bản nguyên và bản có chất tải mô phỏng hư hỏng. Khi thêm tải trọng thì tần số dao động riêng của hệ có thay đổi nhưng không nhiều. Nếu chỉ sử dụng dữ liệu tần số dao động riêng thì có thể xác định được trong bản có hư hỏng nhưng không thể xác định được vị trí của hư hỏng.



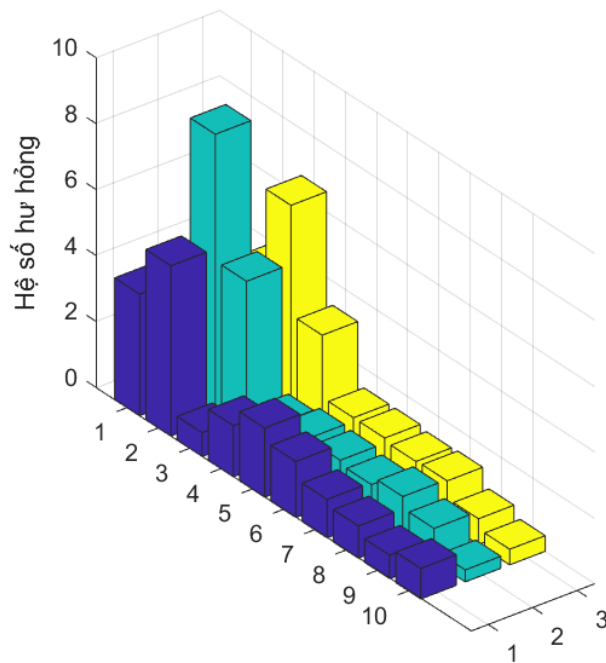
Hình 7. Sơ đồ mô phỏng các vùng và vị trí đặt tải trọng trên bản thí nghiệm.

Bảng 2. Tần số dao động riêng của tấm bản thí nghiệm.

Dạng dao động	Bản nguyên	Bản hư mô phỏng	Sai khác (%)
1	5,74	5,51	4,00
2	21,89	20,31	2,64

4.3 Kết quả

Để xác định vị trí của hư hỏng, hệ số hư hỏng xác định từ ma trận độ mềm được sử dụng. Các dạng dao động riêng đo được của bản ở hai trường hợp không hư hỏng và có hư hỏng được dùng để xác định ma trận độ mềm và độ hư Δ theo công thức (3), (4). Khi sử dụng số liệu thí nghiệm ma trận khối lượng M được lấy gần đúng từ mô hình số. Việc sử dụng ma trận khối lượng từ mô hình số là chấp nhận được đã được khẳng định trong tài liệu tham khảo [15]. Từ đó hệ số hư hỏng được xác định theo công thức (5) và thể hiện trên Hình 8. Hệ số hư hỏng cao nhất ở vị trí đặt tải trọng và được thể hiện chính xác. Tuy nhiên các vị trí lân cận cũng có hệ số hư hỏng khá cao. Điều này cho thấy rằng khi đặt tại trọng tải 1 vùng trên bản có ảnh hưởng tới giá trị đo gia tốc tại các vùng khác. Trong tương lai, thực hiện các vết cắt ở giữa tấm để xác định lại phương pháp thì sẽ có kết quả chính xác hơn.



Hình 8. Hệ số hư hỏng của bản thí nghiệm.

5 KẾT LUẬN

Bài báo này đã xác định vị trí hư hỏng trên kết cấu dạng bản sử dụng hệ số hư hỏng xác định từ ma trận độ mềm và số liệu đo dao động trên mô hình số và mô hình thí nghiệm. Ma trận độ mềm là nghịch đảo của ma trận độ cứng và được tính cho từng bậc tự do của kết cấu. Do đó khi hư hỏng xảy ra tại 1 vị trí nào đó trên hệ sẽ làm thay đổi ma trận độ mềm và hệ số hư hỏng được định nghĩa là sự thay đổi ma trận độ mềm của kết cấu nguyên và kết cấu bị hư sẽ giúp xác định hư hỏng xảy ra tại vị trí nào. Mặc dù kết cấu bản là dạng kết cấu làm việc theo 2 phương nhưng phương pháp này vẫn giúp xác định chính xác vị trí hư hỏng trên mô hình số đối với cả trường hợp bản có 1 vị trí hay 2 vị trí hư hỏng. Sử dụng các đầu đo gia tốc được gắn ở mặt trên của bản và phương pháp phân tích dữ liệu SSI, 2 dạng dao động riêng đầu tiên của mô hình bản trong phòng thí nghiệm cũng được tìm ra. Một vị trí hư hỏng được

giả thiết trên mô hình bản và việc tính toán hệ số hư hỏng giúp xác định được tương đối chính xác vị trí hư hỏng trên tấm.

Việc tính được ma trận dạng dao động riêng, ma trận độ mềm dựa vào phép đo dao động, việc chỉ sử dụng một hai dạng dao động đầu tiên giúp chứng minh cho khả năng áp dụng của phương pháp đề xuất trong thực tế. Tuy nhiên việc xác định dạng dao động riêng bằng các phép đo gia tốc cần được loại bỏ nhiều, các yếu tố ảnh hưởng của môi trường. Việc sử dụng nhiều đầu đo và nhiều sơ đồ đo sẽ cho kết quả chính xác hơn. Tuy nhiên việc phải đo dao động tại nhiều điểm cũng là hạn chế của phương pháp này.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2022-XDA-03

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. C.R. Farrar, K. Worden, An introduction to structural health monitoring, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365 (2006) 303-315.
2. N.M.M. Maia, J.M.M. e Silva, Theoretical and experimental modal analysis, Research Studies Press, 1997.
3. M. Friswell, J. Penny, Is damage location using vibration measurements practical. in Euromech 365 international workshop: Damas, 1997.
4. U. Lee, J. Shin, A frequency response function-based structural damage identification method. Computers & Structures, 80 (2002) 117-132. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00170-5](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00170-5)
5. D.H. Nguyen, M.A. Wahab, Damage detection in slab structures based on two-dimensional curvature mode shape method and Faster R-CNN, Advances in Engineering Software, 176 (2023) 103371. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103371>
6. A. Berman, W.G Flannelly, Theory of incomplete models of dynamic structures, AIAA journal, 9 (1971) 1481-1487.
7. G.-Q. Li, K.-C. Hao, Y. Lu, S.-W. Chen, A flexibility approach for damage identification of cantilever-type structures with bending and shear deformation, Computers & structures, 73 (1999) 565-572.
8. D. Bernal, Load vectors for damage localization, Journal of Engineering Mechanics, 128 (2002) 7-14.
9. J. Li, Z. Li, H. Zhong, B. Wu, Structural damage detection using generalized flexibility matrix and changes in natural frequencies, AIAA journal, 50 (2012) 1072-1078.
10. Liu, H. , Z. Li, An improved generalized flexibility matrix approach for structural damage detection, Inverse Problems in Science and Engineering, 28 (2020) 877-893.
11. S. Khatir, S. Tiachacht, C. Le Thanh, H. Tran-Ngoc, S. Mirjalili, M.A. Wahab, A new robust flexibility index for structural damage identification and quantification, Engineering Failure Analysis, 129 (2021) 105714.
12. H. Liu, B. Wu, Z. Li, The generalized flexibility matrix method for structural damage detection with incomplete mode shape data, Inverse Problems in Science and Engineering, 29 (2021) 2019-2039.

- 13.A. Pandey, M. Biswas, Damage detection in structures using changes in flexibility. Journal of sound and vibration,. 169 (1994) 3-17.
- 14.B. Peeters, G. De Roeck, Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis, Mechanical systems and signal processing, 13(1999) 855-878.
15. R. Brincker, C. Ventura, Introduction to operational modal analysis, John Wiley & Sons, 2015.