

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



ĐÀO THỊ BÍCH THẢO

**PHÁT HIỆN HƯ HỎNG CỦA KẾT CẤU DẠNG
DẦM SỬ DỤNG KHỐI LƯỢNG TẬP TRUNG HOẶC
DI ĐỘNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP DAO ĐỘNG**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
KỸ THUẬT CƠ KHÍ VÀ CƠ KỸ THUẬT**

Ngành: Cơ kỹ thuật

Mã số: 9 52 01 01

Hà Nội - 2026

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học: GS.TS. Nguyễn Việt Khoa

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

L luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi giờ, ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài (tính cấp thiết, tình hình nghiên cứu và những vấn đề đặt ra trong đề tài);

Trong quá trình xây dựng và hoạt động kết cấu sẽ thường xuyên chịu những tác động của ngoại lực có cường độ lớn hoặc các ngoại lực lặp lại gây ra những hư hỏng cục bộ hoặc gây ra những tổn thương môi. Theo thời gian các hư hỏng này, ví dụ như vết nứt, sẽ phát triển làm giảm độ cứng và suy giảm sức chịu lực của kết cấu. Khi các hư hỏng này phát triển đến một mức độ nào đó, nếu không được phát hiện sớm và gia cố thì kết cấu có thể bị sụp đổ hoàn toàn khi chịu một tác động của tải trọng thông thường, gây ra những thiệt hại nghiêm trọng về người và của. Do đó, việc phát hiện sớm các hư hỏng đã và đang được nghiên cứu và triển khai ứng dụng trên thế giới và đã có nhiều phương pháp phân phát hiện hư hỏng dựa trên dao động được phát triển và và ứng dụng.

Hiện nay trên thế giới việc nghiên cứu các phương pháp phát hiện hư hỏng phục vụ giám sát kết cấu đã và đang được phát triển và ứng dụng mạnh mẽ đối với các công trình xây dựng. Trong các phương pháp đó, phương pháp phát hiện hư hỏng dựa trên tín hiệu đo dao động là một hướng đang rất được quan tâm do các ưu điểm của nó như đơn giản, dễ áp dụng, ít tốn kém. Vì vậy, việc phát triển để tiến tới ứng dụng các phương pháp dao động để có thể phát hiện hư hỏng trong kết cấu như cầu là cần thiết. Vì vậy, tác giả của Luận án đề xuất đề tài “Phát hiện hư hỏng của kết cấu dạng dầm sử dụng khối lượng tập trung hoặc di động bằng phương pháp dao động” là chủ đề nghiên cứu của Luận án.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu của luận án này là: Phát triển các phương pháp dao động để phát hiện hư hỏng nhằm giám sát và cảnh báo nguy cơ mất an toàn của kết cấu. Các mục tiêu cụ thể của đề tài như sau:

- Phát triển phương pháp dao động để phát hiện hư hỏng của dầm có tính chất vật liệu thay đổi dọc trục (Axially Functionally Graded - AFG) có thiết diện thay đổi dựa trên sự thay đổi của hàm phản ứng tần số của dầm khi có khối lượng tập trung.

- Phát triển phương pháp dao động để phát hiện hư hỏng của kết cấu dầm dựa trên sự phân tích tín hiệu dao động của hệ dầm – khối lượng di động.

3. Nội dung nghiên cứu

Luận án tập trung nghiên cứu sử dụng phương pháp dao động để phát hiện hư hỏng của dầm có khối lượng tập trung hoặc di động. Chương 1 trình bày tổng quan tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước, chỉ ra những hạn chế còn tồn tại và định hướng phát triển. Chương 2 thiết lập và giải các phương trình động lực học của dầm có thiết diện và tính chất vật liệu thay đổi dọc theo trục của dầm, có vết nứt và khối lượng tập trung. Hàm receptance chính xác của dầm được tìm dưới dạng chuỗi lũy thừa dựa trên phương pháp Adomian. Dựa trên việc phân tích hàm receptance của dầm khi không có và có vết nứt, luận án sẽ đề xuất phương pháp phát hiện vị trí nứt của dầm. Chương 3 thiết lập và giải phương trình động lực học của hệ dầm có hư hỏng (dạng vết nứt và suy giảm thiết diện) – khối lượng di động được để tìm phản ứng động của hệ. Dựa trên việc phân tích wavelet, ảnh hưởng của hư hỏng lên phản ứng động của dầm khi có tải trọng di chuyển qua sẽ được phát hiện. Dựa trên phân tích này, vị trí, độ rộng và độ sâu của hư hỏng sẽ được xác định. Chương 4 trình bày hai thí nghiệm kiểm chứng đối với mô hình dầm thép đồng chất có thiết diện thay đổi, có khối lượng tập trung và dây cáp có hư hỏng, có rô bốt di động di động trên cáp. Các kết quả mô phỏng số thu được ở Chương 2 và 3 được so sánh với các kết quả thí nghiệm để khẳng định tính đúng đắn của các phương pháp đề xuất trong luận án.

4. Những đóng góp mới của luận án

Luận án đã xây dựng phương trình động lực học và tìm được công thức chính xác cho hàm receptance của dầm có thiết diện và tính chất vật liệu thay đổi dọc trục, có vết nứt và có khối lượng tập trung.

Luận án đã xây dựng phương trình động lực học của hệ dầm có hư hỏng - khối lượng di động. Giải phương trình động lực học đã phát triển để thu được ứng xử động lực học của hệ.

Từ các công thức đã phát triển, luận án đã tính toán, mô phỏng số và phân tích ảnh hưởng đồng thời của khối lượng tập trung hoặc khối lượng di động đến các tính chất động lực học của dầm. Từ các kết quả đó, đề xuất các phương pháp phát hiện vết nứt của dầm dựa trên hàm receptance sử dụng khối lượng tập trung và phương pháp phát hiện hư hỏng của dầm có rô bốt di động dựa trên biến đổi wavelet.

Chương 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Chương này trình bày tổng quan tình hình nghiên cứu đối với bài toán phát hiện hư hỏng của kết cấu bằng phương pháp dao động. Khi có hư hỏng thì các tính chất động lực học của kết cấu sẽ bị thay đổi. Dựa trên sự thay đổi này, các phương pháp phát hiện hư hỏng có thể được thiết lập.

Trong thực tế, có nhiều yếu tố có thể kết hợp với hư hỏng gây ảnh hưởng đồng thời đến dao động của kết cấu, ví dụ như khối lượng tập trung, khối lượng di động v.v. Trong nghiên cứu tổng quan này, các nghiên cứu về ảnh hưởng đồng thời của khối lượng tập trung hoặc khối lượng di động cùng với hư hỏng lên các đặc trưng động lực học của các kết cấu dạng dầm sẽ được phân tích. Từ việc phân tích các ưu nhược điểm của các nghiên cứu hiện tại, luận án sẽ xác định những vấn đề còn tồn tại, chưa được giải quyết để từ đó dẫn đến định hướng nghiên cứu của luận án, đó là phát triển các phương pháp phát hiện hư hỏng của kết cấu dạng dầm sử dụng khối lượng tập trung hoặc di động bằng phương pháp dao động.

Chương 2. PHÁT HIỆN HƯ HỎNG CỦA DẦM AFG CÓ THIẾT DIỆN THAY ĐỔI, CÓ VẾT NÚT VÀ KHỐI LƯỢNG TẬP TRUNG

Trong chương này, ảnh hưởng của các tính chất của dầm AFG và vết nứt cùng với khối lượng tập trung đến hàm receptance sẽ được nghiên cứu để từ đó đề xuất một phương pháp phát hiện vết nứt của dầm AFG.

2.1. Hàm receptance của dầm AFG có vết nứt, có khối lượng tập trung

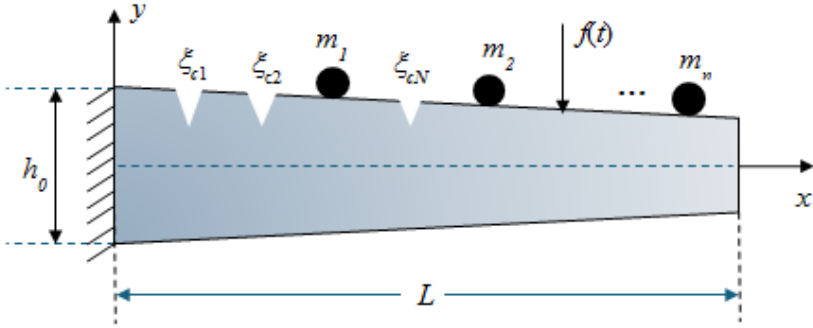
Xét dầm Euler-Bernoulli có tính chất vật liệu thay đổi dọc dầm (AFG) mang n khối lượng tập trung m_i , với $i=1, \dots, n$; và chịu tác dụng của một lực $f(t)$ như minh họa trong Hình 1.

Phương trình dao động uốn của dầm trong bài toán này theo Wu cùng cộng sự [60] được viết trong hệ tọa độ không thứ nguyên $\xi = \frac{x}{L}$ như sau:

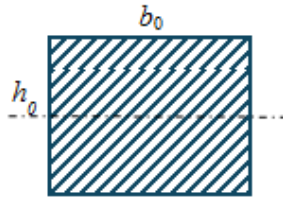
$$\left[E(\xi)I(\xi)y'' \right]'' + L^4 \rho(\xi)A(\xi)\ddot{y} + L^4 \sum_{k=1}^n m_k \delta(\xi - \xi_{mk}) \ddot{y} = L^4 \delta(\xi - \xi_f) f(t) \quad (2.1)$$

trong đó, E là mô đun đàn hồi Young; I là mô men quán tính mặt cắt ngang, ρ mật độ khối lượng của dầm; $A(x)$ là diện tích thiết diện của dầm; m_k là khối lượng tập trung thứ k ở vị trí x_{mk} ; $y(x, t)$ là độ uốn của dầm tại vị trí x

và thời gian t ; $f(t)$ là lực tác động lên dầm ở vị trí x_f ; $\delta(x - x_f)$ là hàm delta Dirac.



a) Mô hình dầm



b) Thiết diện của dầm tại đầu ngàm

Hình 2. 1. Dầm Euler-Bernoulli mang n khối lượng tập trung

Ta có thể coi phương trình (2.1) như là phương trình dao động cường bức của một dầm không có khối lượng tập trung, chịu tác dụng của các lực quán tính từ n khối lượng tập trung và lực ngoài $f(t)$. Nghiệm của phương trình (2.1) có thể được tìm dưới dạng

$$y(\xi, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(\xi) q_i(t) \quad (2.2)$$

trong đó, ϕ_i là dạng dao động riêng thứ i của dầm không có khối lượng tập trung và q_i là tọa độ tổng quát thứ i của dầm.

Thế phương trình (2.2) vào phương trình (2.1), rồi nhân hai vế của phương trình với $\phi(\xi)$ và lấy tích phân từ 0 đến 1 hai vế của biểu thức sau khi nhân ta được:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{\Phi}(\xi_f) f(t) \quad (2.4)$$

Trong đó, ma trận khối lượng $\mathbf{M}$ là ma trận vuông đối xứng cấp $N \times N$ và ma trận độ cứng $\mathbf{K}$ của dầm là ma trận đường chéo chính cấp $N \times N$. $\mathbf{\Phi}$, $\mathbf{q}$ tương ứng là véc tơ dạng riêng, véc tơ vị trí kích thước $N \times 1$

Nếu dầm không có lực kích động, phương trình (2.4) trở thành:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{0} \quad (2.5)$$

Phương trình (2.5) là phương trình dao động tự do của hệ dầm có khối lượng tập trung. Tần số riêng Ω của dầm mang các khối lượng tập trung có thể tính được từ việc giải các bài toán giá trị riêng dựa vào phương trình (2.5).

Nếu lực kích động tác động lên dầm là lực điều hòa $f(t) = \bar{f}e^{i\omega t}$ thì hàm receptance tại vị trí ξ do lực kích động tại vị trí ξ_f gây ra được tính bằng:

$$\alpha(\xi, \xi_f, \omega) = \frac{\mathbf{\Phi}^T(\xi)\bar{\mathbf{q}}}{\bar{f}} = \mathbf{\Phi}^T(\xi)(\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M})^{-1}\mathbf{\Phi}(\xi_f) \quad (2.6)$$

Trong đó, thành phần $\mathbf{\Phi}^T(\xi)\bar{\mathbf{q}}$ và $\bar{f}$ tương ứng lần lượt là độ lớn của đáp ứng tại vị trí ξ và độ lớn của lực ở vị trí ξ_f .

Như vậy, nếu xác định được dạng riêng của dầm thì hàm receptance của dầm sẽ được xác định.

2.2. Dạng dao động riêng của dầm AFG có thiết diện thay đổi, có vết nứt và khối lượng tập trung

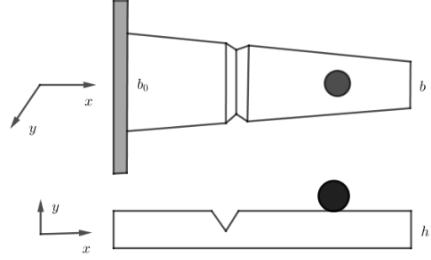
Xét dầm AFG Euler-Bernoulli có thiết diện mặt cắt ngang là hình chữ nhật thay đổi dọc theo chiều dài của dầm, có vết nứt và có khối lượng tập trung như minh họa trong Hình 2.2.

Kích thước và tính chất vật liệu của dầm thay đổi theo quy luật:

$$\begin{aligned} E(\xi) &= E_0(1 - \alpha_1 \xi^{n_1}); & b &= b_0(1 - \alpha_2 \xi^{n_2}) \\ h &= h_0(1 - \alpha_3 \xi^{n_3}); & \rho &= \rho_0(1 - \alpha_4 \xi^{n_4}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

trong đó, E_0, b_0, h_0 và ρ_0 tương ứng là mô đun đàn hồi Young, chiều rộng, chiều dài và mật độ khối lượng của dầm tại đầu ngàm $\xi = 0$; $0 \leq \alpha_i \leq 1$;

$n_i, i=1,4$ là các tỉ số biến đổi của tính chất vật liệu.



Hình 2.2

Khi dầm có vết nứt tại vị trí ξ_{cj} ($0 < \xi_{cj} < 1$) trên dầm, biểu thức mô đun chống uốn EI có dạng [7]:

$$E(\xi)I(\xi) = E(\xi)I(\xi)[1 - f^*(\xi)] \quad (2.8)$$

trong đó,

$$f^*(\xi) = \sum_{j=1}^N \gamma_j \delta(\xi - \xi_{cj}) \quad (2.9)$$

với, γ_j là một tham số biểu thị cường độ vết nứt của vết nứt tập trung thứ j nằm tại vị trí ξ_{cj} trên dầm.

Dạng dao động riêng của dầm ϕ_i được giải từ bài toán trị riêng của phương trình:

$$\left\{ E(\xi)I(\xi)[1 - f^*(\xi)] \phi_i''(\xi) \right\}'' q_i(t) + L^4 \mu(\xi) \phi_i(\xi) \ddot{q}_i(t) = 0 \quad (2.10)$$

Nghiệm dạng riêng ϕ_i được biểu diễn dưới dạng tổng vô hạn của một chuỗi hội tụ:

$$\phi_i(\xi) = \sum_{k=0}^{\infty} C_k \xi^k \quad (2.11)$$

với, C_k là các hệ số cần tìm.

Để tìm hàm dạng riêng, toán tử vi phân tuyến tính $\ell = \frac{d^4}{d\xi^4}$ và toán tử tích phân tuyến tính $\ell^{-1} = \int_0^\xi \int_0^\xi \int_0^\xi \int_0^\xi (\dots) d\xi d\xi d\xi d\xi$ được sử dụng.

Khi đó, dạng dao động riêng của dầm được tính theo biểu thức:

$$\phi_i = \sum_{k=0}^3 C_{0k} \xi^k + \ell^{-1} \{ \mathcal{A} \} + \ell^{-1} \{ \mathcal{B} \} \quad (2.12)$$

Ở biểu thức trên, thành phần $\mathcal{A}$ là thành phần chỉ liên quan đến dầm nguyên vẹn. Để thiết lập ảnh hưởng của vết nứt đến nghiệm của dạng riêng, luận án đã đưa vào thành phần $\mathcal{B}$ là thành phần liên quan đến ảnh hưởng của vết nứt. Thành phần $\mathcal{B}$ này sẽ chỉ tham gia vào bốn thành phần đầu tiên của chuỗi lũy thừa mà không ảnh hưởng đến bất cứ thành phần nào khác.

Khi dầm chưa có vết nứt, biểu thức dạng dao động riêng của dầm được tính theo biểu thức:

$$\phi_i = \sum_{k=0}^3 C_{0k} \xi^k + \ell^{-1} \{ A \} \quad (2.13)$$

Khi dầm có vết nứt, ảnh hưởng của vết nứt được thêm vào trong biểu thức dạng dao động của dầm nguyên vẹn. Khi đó, biểu thức dạng riêng của dầm nguyên vẹn và ảnh hưởng của vết nứt được tính riêng và sau đó chúng được cộng lại với nhau tạo thành biểu thức dạng riêng của dầm có vết nứt.

Sau khi tính rút ra được ảnh hưởng của vết nứt đối với dạng riêng, biểu thức của dạng riêng của dầm bằng:

$$\phi_i = \sum_{k=0}^3 C_{0k} \xi^k + \sum_{k=0}^3 (\hat{b}_k + B_k^*) \xi^k + \sum_{k=4}^{\infty} C_k \xi^k = \sum_{k=0}^3 C_k \xi^k + \sum_{k=4}^{\infty} C_k \xi^k \quad (2.14)$$

với,

$$C_k = C_{0k} + \hat{b}_k + B_k^* = b_k^* + B_k^*, \quad k < 4 \quad (2.15)$$

Như vậy biểu thức giải tích dạng dao động riêng của dầm có vết nứt được xác định theo biểu thức (2.15). Bốn hệ số C_k với $k < 4$ chứa các

hạng tử b_k^* được xác định từ các điều kiện biên của dầm, các hạng tử B_k^* được xác định qua các điều kiện tương thích tại các vị trí có vết nứt. Các hệ số C_k với $k \geq 4$ được xác định theo công thức truy hồi của dạng riêng của dầm nguyên vẹn.

2.3. Mô phỏng số

2.3.1. Kiểm tra độ tin cậy của lý thuyết

Để kiểm tra độ tin cậy của công thức lý thuyết thu được trong luận án, một mô hình dầm công xôn (C-F) được cấu thành từ hai vật liệu là thép và nhôm theo tài liệu [127] sẽ được áp dụng. Sự thay đổi của tính chất vật liệu và chiều dày của dầm tuân theo quy luật:

$$E(\xi) = E_0(1 - \alpha_1 \xi^{n_1}), h = h_0(1 - \alpha_2 \xi^{n_2}), \rho(\xi) = \rho_0(1 - \alpha_3 \xi^{n_3}) \quad (2.16)$$

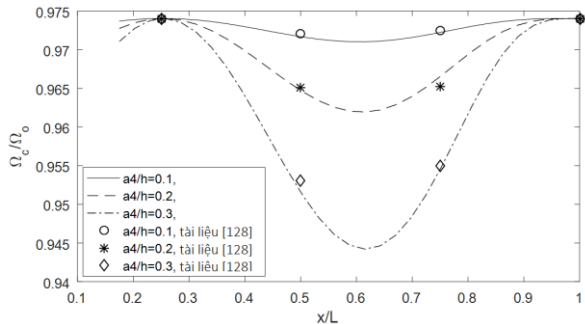
Trong đó, $n_1 = n_3 = 2$, $\alpha_1 = 1 - \frac{E_1}{E_0}$, $\alpha_3 = 1 - \frac{\rho_1}{\rho_0}$, α_2 thay đổi trong khoảng từ 0.2 đến 0.8. Các chỉ số bên dưới “0” và “1” tương ứng kí hiệu cho các tham số của dầm tại đầu bên trái $\xi = 0$ và đầu bên phải $\xi = 1$ của dầm.

Bảng 2. 1. Tần số riêng đã chuẩn hóa của dầm công xôn AFG nguyên vẹn có chiều dày thay đổi.

α_2		Tài liệu so sánh [125]			Kết quả đạt được			Sai số (%)		
		Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_1	Ω_2	Ω_3
0.8	$n_2=1$	-	-	-	6.211	22.835	53.562	-	-	-
	$n_2=2$	7.067	29.091	67.867	7.067	29.091	67.870	0.0	0.0	0.0044

Từ Bảng 2.1 ta thấy, các kết quả tính được có kết quả phù hợp rất tốt với các kết quả đã công bố trong tài liệu [125].

Hình 2.3. Tỷ số tần số riêng thứ 2



Đối với dầm có vết nứt, tính toán tần số cho dầm có bốn vết nứt tại các vị trí $0.05L$, $0.1L$, $0.15L$ và vị trí vết nứt thứ tư thay đổi trong khoảng từ $0.175L$ đến $0.975L$, với độ sâu của các vết nứt khác nhau: $a_1 = 0.3h$, $a_2 = 0.2h$, $a_3 = 0.1h$, a_4 thay đổi từ $0.1h$ đến $0.3h$. Kết quả thu được so sánh với tài liệu [126]. Trong tính toán này, hệ số thay đổi chiều dày của dầm là $\alpha_2 = 0.5$.

Từ Hình 2.3 ta có thể nhận thấy sự phù hợp rất tốt giữa kết quả nghiên cứu của luận án và tài liệu tham khảo [128], qua đó xác nhận độ tin cậy của công thức đề xuất cho mô hình dầm có vết nứt.

2.3.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của vết nứt và sự thay đổi tính chất vật liệu đối với tần số riêng và dạng riêng.

a) Ảnh hưởng của vết nứt và sự thay đổi chiều dày đối với tần số riêng

Xét mô hình dầm C-F AFG có chiều dày thay đổi, có bốn vết nứt ở các vị trí $\xi_{c_1} = 0.34L$, $\xi_{c_2} = 0.5L$, $\xi_{c_3} = 0.7L$ và $\xi_{c_4} = 0.8L$ với độ sâu thay đổi từ $0.0h$ đến $0.4h$ được áp dụng để tính toán tần số riêng của dầm. Các hệ số thay đổi của tính chất vật liệu là: $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.0 \div 0.8$, $\alpha_3 = 0.5$.

Các kết quả thu được chỉ ra rằng ứng với mỗi hệ số thay đổi độ dày, tần số riêng của dầm giảm dần khi độ sâu vết nứt tăng. Khi hệ số thay đổi độ dày của dầm tăng, thì với cùng một độ sâu vết nứt, tần số riêng thứ nhất của dầm tăng trong khi tần số riêng thứ hai và thứ ba của dầm giảm. Tuy nhiên, ảnh hưởng đồng thời của vết nứt và hệ số thay đổi độ dày của dầm lên tần số không phải là tuyến tính.

b) Ảnh hưởng của vết nứt và tính chất vật liệu đối với tần số riêng của dầm

Xét mô hình dầm C-F và dầm gối tựa hai đầu (H-H) AFG có bốn vết nứt. Ba vết nứt đầu tiên ở các vị trí $0.05L$, $0.1L$, $0.15L$ và vị trí vết nứt thứ tư thay đổi trong khoảng từ $0.175L$ đến $0.975L$. Độ sâu của các vết nứt là không thay đổi: $a_1 = 0.3h$, $a_2 = 0.2h$, $a_3 = 0.1h$, $a_4 = 0.3h$. Dầm có chiều dày và chiều rộng giảm dần từ đầu bên trái sang đầu bên phải với hệ số thay đổi chiều dày là $\alpha_2 = 0.5$.

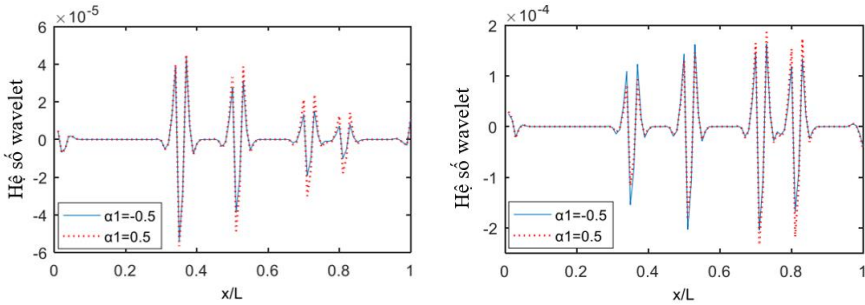
Kết quả tính toán cho thấy rằng đối với cả hai điều kiện biên C-F và H-H, các đồ thị biểu diễn tỷ số tần số riêng có xu hướng dịch chuyển về phía đầu dầm tại đó mô đun đàn hồi nhỏ hơn và khối lượng riêng lớn hơn. Các kết quả này cho thấy tần số riêng trở nên nhạy cảm hơn đối với vết nứt nằm về phía có khối lượng riêng lớn hơn và mô đun đàn hồi nhỏ hơn.

c) Ảnh hưởng của vết nứt và hệ số thay đổi thiết diện đến dạng riêng

Như đã biết, ảnh hưởng của vết nứt đến dạng riêng của dầm thường rất

nhỏ khi vết nứt nhỏ. Để làm rõ các biến dạng nhỏ ở dạng riêng gây bởi vết nứt, phép biến đổi wavelet được sử dụng.

Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, có các đỉnh rõ rệt xuất hiện tại vị trí các vết nứt trong hình cho thấy ảnh hưởng của vết nứt đến dạng dao động. Khi độ sâu vết nứt tăng, cao độ của các đỉnh này cũng tăng theo. Đối với dầm C-F, dạng riêng trở nên nhạy cảm hơn đối với các vết nứt gần đầu tự do, khi mô đun đàn hồi ở đó nhỏ đi. Đối với điều kiện biên H-H, các vết nứt nằm tại các thiết diện nhỏ hơn có ảnh hưởng lớn hơn đến dạng riêng của dầm.



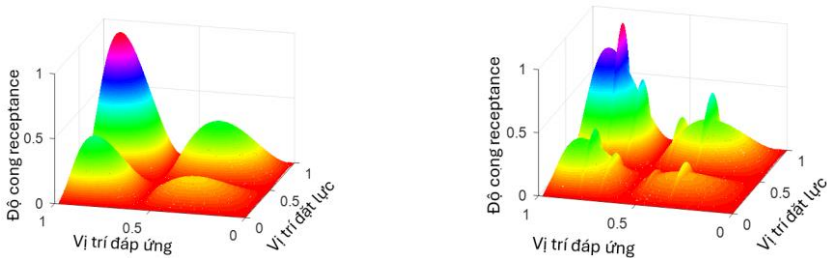
a) Độ sâu vết nứt: $0.3h$, C-F b) Độ sâu vết nứt: $0.3h$, H-H

Hình 2. 4. Biến đổi wavelet của dạng riêng thứ nhất của dầm

2.3.3. Ảnh hưởng của khối lượng tập trung và vết nứt đến hàm receptance của dầm AFG

a) Ảnh hưởng của vết nứt đến độ cong receptance

Trong phần này, luận án sẽ khảo sát ảnh hưởng của vết nứt đến hàm receptance thông qua độ cong của nó, được định nghĩa như đạo hàm bậc hai của hàm receptance.



c) Dầm nguyên vẹn, $\omega=\omega_2$

d) Dầm có vết nứt=30%, $\omega=\omega_2$

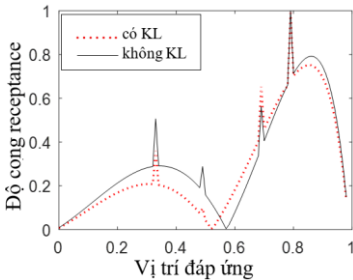
Hình 2. 5. Ma trận độ cong receptance của dầm H-H

Kết quả khảo sát số cho trường hợp dầm H-H, nguyên vẹn và có vết nứt với độ sâu là 30% cho thấy rằng, ma trận độ cong receptance của dầm nguyên vẹn là trơn tru, trong khi đối với dầm có vết nứt thì nó có những đỉnh nhọn tại các vị trí có vết nứt. Điều này chỉ ra rằng vết nứt gây ảnh hưởng cục bộ đến ma trận độ cong receptance của dầm.

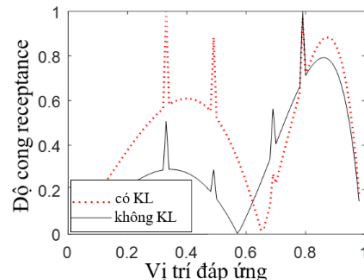
b) Ảnh hưởng đồng thời của khối lượng tập trung và vết nứt đến độ cong receptance của dầm

Trên đồ thị độ cong receptance của dầm xuất hiện các đỉnh nhọn tại vị trí có vết nứt. Tuy nhiên, các đỉnh nhọn gây bởi vết nứt có cùng độ sâu gần điểm cực tiểu của độ cong receptance sẽ nhỏ hơn các đỉnh nhọn gần điểm cực đại. Đỉnh nhọn gây bởi vết nứt nằm ở vị trí trùng với cực tiểu là rất nhỏ, có thể không phát hiện được. Ngoài ra, các đỉnh nhọn nằm ở vùng cực đại có biên độ thấp hơn sẽ nhỏ hơn các đỉnh nhọn nằm ở vùng cực đại có biên độ cao hơn.

Một khối lượng tập trung gắn vào dầm có thể dịch chuyển cực tiểu và cực đại của độ cong receptance, làm thay đổi vị trí tương đối giữa các đỉnh nhọn gây bởi vết nứt và cực tiểu và cực đại. Kết quả là, chiều cao của các đỉnh nhọn do vết nứt gây ra thay đổi và mức độ thay đổi phụ thuộc vào vị trí của khối lượng tập trung. Do đó, để khuếch đại ảnh hưởng của các vết nứt nằm gần hoặc trùng với các điểm cực tiểu, cần gắn khối lượng tập trung vào vị trí thích hợp để dịch chuyển cực tiểu ra xa khỏi vị trí vết nứt, hoặc dịch chuyển cực đại đến gần các vị trí vết nứt hơn, hoặc làm tăng biên độ của các vùng chứa các vết nứt này.



a) Vị trí đặt khối lượng: $0.2L$



b) Vị trí đặt khối lượng: $0.8L$

Hình 2. 6. Độ cong hàm receptance của dầm AFG hai đầu gối tựa có vết nứt và khối lượng tập trung, $\omega = \omega_2$.

2.4. Đề xuất phương pháp phát hiện vết nứt trên dầm H-H AFG

Bước 1: Đo độ cong hàm receptance dọc theo chiều dài của dầm dưới tác động của lực điều hòa tác động tại một điểm trên dầm.

Bước 2: Lựa chọn đặt khối lượng tập trung (vị trí tương ứng với ba tần số lực kích động).

Bước 3: Xác định vị trí các đỉnh nhọn trên các đường độ cong receptance, đây chính là vị trí của vết nứt.

Lưu ý: Việc đặt khối lượng vào vị trí nào để khuếch đại được các đỉnh nhọn nhỏ và đỉnh nhọn bị ẩn ở các điểm nút của độ cong receptance phải tùy thuộc điều kiện biên của dầm.

2.5. Kết luận

Trong chương này, tác giả của luận án đã xây dựng được phương trình động lực học của dầm có thiết diện và tính chất vật liệu thay đổi dọc trục, có vết nứt và có khối lượng tập trung. Hàm dạng riêng chính xác đã tìm được dưới dạng chuỗi lũy thừa dựa trên phương pháp phân rã Adomian.

Kết quả phân tích hàm độ cong receptance cho thấy có đỉnh nhọn tại vị trí vết nứt. Vết nứt có kích thước càng lớn thì đỉnh nhọn càng lớn. Điều này có thể sử dụng làm cơ sở cho phương pháp phát hiện vết nứt trên dầm có thiết diện và tính chất vật liệu thay đổi dọc theo trục của dầm. Ngoài ra việc đặt khối lượng tập trung lên những vị trí phù hợp có thể khuếch đại các đỉnh nhọn gây ra bởi vết nứt nên đây cũng là cơ sở cho phương pháp phát hiện vết nứt sử dụng khối lượng tập trung. Các kết quả của chương này đã được công bố trên các bài báo số 1-3, 5-7, và 11-12 trong “Danh mục công trình liên quan tới Luận án”.

Chương 3. PHÁT HIỆN HƯ HỎNG DẦM CỐ KHỐI LƯỢNG DI ĐỘNG

3.1. Mô hình dầm chịu tác động của rô bốt di động

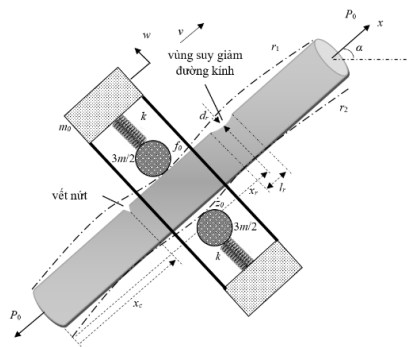
Trong nghiên cứu này, mô hình dầm có thiết diện tròn được coi như là một dầm Euler-Bernulli. Xét mô hình dầm – rô bốt di động như được minh họa trong Hình 3.1.

Hình 3. 1. Mô hình đầm dưới tác động của rô bốt di động.

Trong mô hình này,

z_0 : chuyển vị ngang của dầm tại điểm tiếp xúc.

f_0 là lực tương tác giữa robot và dầm tại điểm tiếp xúc



u_{01} và u_{02} chuyển vị của dầm bên dưới hai bánh xe.

a) *Phương trình chuyển động của dây cáp*

Hệ tương tác dầm và rô bốt di động là một hệ phức tạp nên Luận án sẽ sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để tính phản ứng động lực học của hệ dầm – rô bốt di động. Trong mô hình phần tử hữu hạn, dầm được chia thành các phần tử bằng nhau có chiều dài $2l$. Bỏ qua cả ảnh hưởng của biến dạng cắt và quán tính quay của dầm.

Phương trình chuyển động của hệ thống cáp-rô bốt sẽ là:

$$\mathbf{m}_e \ddot{\mathbf{d}}_e + \mathbf{k}_e \mathbf{d}_e + P_0 \mathbf{k}_{eg} \mathbf{d}_e = \mathbf{f}_e \quad (3.1)$$

b) *Phương trình chuyển động của rô bốt*

Giả thiết rằng bề mặt trên và dưới của dầm không bằng phẳng mà mấp mô.

Sự suy giảm đường kính của dầm có thể biểu thị dưới dạng hàm nửa sóng hình sin như sau:

$$\begin{aligned} r_1(x) &= -d_{r1} \text{rect}(x) \sin \left[\frac{\pi(x - x_{r1})}{l_{r1}} + \frac{\pi}{2} \right] \\ r_2(x) &= -d_{r2} \text{rect}(x) \sin \left[\frac{\pi(x - x_{r2})}{l_{r2}} + \frac{\pi}{2} \right] \end{aligned} \quad (3.1)$$

Dịch chuyển bên dưới mỗi bánh xe:

$$u_{01} = z_0 + r_1 + \bar{r}_1; \quad u_{02} = z_0 - r_2 - \bar{r}_2 \quad (3.3)$$

Lập biểu thức động năng, thế năng của rô bốt và sử dụng phương pháp Lagrange ta thu được phương trình chuyển động của rô bốt như sau:

$$m_0 \ddot{w} + k(2w - 2z_0 - r_1 - \bar{r}_1 + r_2 + \bar{r}_2) = 0 \quad (3.4)$$

c) *Phương trình động lực học của hệ dầm – rô bốt di động*

Chuyển vị tại vị trí z_0 tùy ý được nội suy từ hàm dạng như sau:

$$z_0 = \mathbf{N} \mathbf{d}_e \quad (3.5)$$

Phương trình chuyển động của hệ dầm – rô bốt di động:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{D}} + \mathbf{K} \mathbf{D} + \mathbf{K}_{eg} \mathbf{D} = \mathbf{f}_e \quad (3.6)$$

3.2. Mô hình cáp hai chiều có vết nứt

Khi dầm có hư hỏng dạng vết nứt, ma trận độ cứng $\mathbf{K}$ của hệ dầm – rô bốt di động thay đổi. Đối với dầm có thiết diện là hình tròn, ma trận độ cứng phần tử có chứa vết nứt đã được tính theo tác giả D Y. Zheng.

Ma trận độ mềm phần tử của phần tử không có vết nứt và tăng thêm do vết nứt [6]:

$$\mathbf{c}^{(0)} = \begin{bmatrix} \frac{l^3}{3EI} & \frac{l^2}{2EI} \\ \frac{l^2}{2EI} & \frac{l}{EI} \end{bmatrix}; \mathbf{c}^{(1)} = \begin{bmatrix} \frac{F(1,1)}{2E'R} & \frac{F(1,2)L_c}{8E'R^3} \\ \frac{F(1,2)L_c}{8E'R^3} & \frac{F(2,2)}{8E'R^3} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Ma trận độ mềm của phần tử có vết nứt:

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}^{(0)} + \mathbf{c}^{(1)} \quad (3.8)$$

Ma trận độ cứng của phần tử dầm có vết nứt:

$$\mathbf{k}_c = \mathbf{T}^T \mathbf{c}^{-1} \mathbf{T} \quad (3.9)$$

Đối với dầm có chứa vết nứt, trong phương trình chuyển động của hệ dầm – rô bốt di động ma trận $\mathbf{K}$ được ghép từ các ma trận độ cứng phần tử có vết nứt $\mathbf{k}_c$.

3.3. Mô phỏng số

Trong phần này, luận án trình bày kết quả mô phỏng số cho trường hợp dây cáp có hư hỏng dạng vết nứt và suy giảm đường kính chịu tác động của rô bốt di động. Biến đổi wavelet sẽ được áp dụng cho chuyển vị động của hệ cáp-rô bốt để phát hiện hư hỏng nhỏ trên dây cáp.

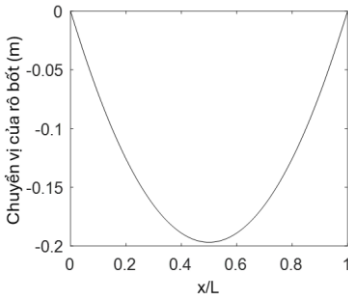
3.3.1. Phát hiện hư hỏng dạng vết nứt

Các tham số của dầm được sử dụng tính toán mô phỏng số như sau: mật độ khối lượng $\rho=7855 \text{ kg/m}^3$; mô đun đàn hồi $E=2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$; đường kính của dầm $d=0.2\text{m}$; chiều dài dầm $L=80\text{m}$. Góc nghiêng của dầm so với phương ngang 30° . Độ sâu và chiều dài của vùng suy giảm được tính theo

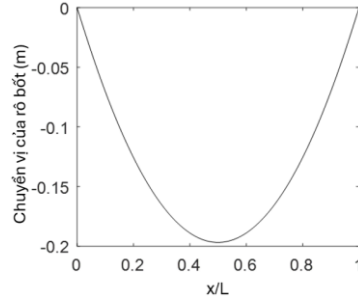
Cheng (1999) như sau: $\bar{d}_{1,2} = -\frac{r_d(m_0 + 3m)gL^3}{48EI}$, $\bar{l}_{1,2} = \frac{L}{r_l}$ trong đó,

$r_d=0.05$ and $r_l=5$. Các tham số của rô bốt: $m_0=15 \text{ kg}$; $m=0.3 \text{ kg}$; $k_1=k_2=k_3=1000 \text{ N/m}$; Độ dịch chuyển của rô bốt di động được thu thập để phân tích vết nứt.

Các hình 3.2-3.3 cho thấy đáp ứng của rô bốt và biến đổi wavelet của các đáp ứng động học tương ứng khi lực căng của dầm $P_0=5 \times 10^6$ N. Các kết quả cho thấy rằng, khi độ sâu của vết nứt tăng từ 0% đến 20% thì di chuyển của rô bốt là trơn chu, không có những biến dạng đột ngột nào trong đồ thị chuyển dịch của rô bốt. Tuy nhiên, khi sử dụng biến đổi wavelet, thì trên đồ thị đáp ứng của rô bốt có các đỉnh rõ rệt xuất hiện tại vị trí vết nứt và độ cao các đỉnh này tăng lên khi độ sâu vết nứt tăng.

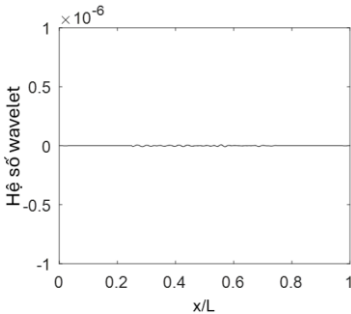


a) Độ sâu vết nứt 0%

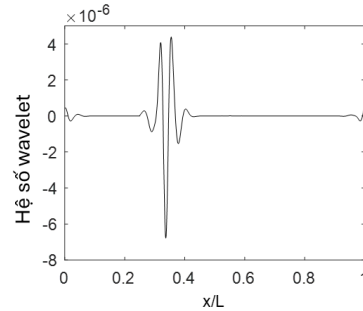


b) Độ sâu vết nứt 20%

Hình 3.2. Chuyển vị của rô bốt với các mức độ độ sâu vết nứt khác nhau



a) Độ sâu vết nứt 0%



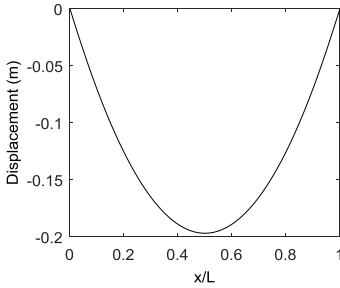
b) Độ sâu vết nứt 20%

Hình 3.3. Biến đổi wavelet chuyển vị của rô bốt với các mức độ độ sâu vết nứt khác nhau

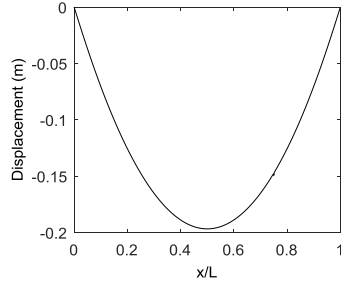
3.3.2. Phát hiện hư hỏng dạng suy giảm đường kính của dây cáp

Trong nội dung này, giả sử rằng có một điểm suy giảm đường kính trên bề mặt dầm với tâm của vùng suy giảm ở vị trí $0.75L$, chiều dài vùng giảm là $0.1m$, biên độ vùng giảm dao động từ 0.1% đến 5% đường kính dây cáp.

Các Hình từ 3.4 và 3.5 thể hiện các dịch chuyển của rô bốt và các phép biến đổi wavelet của chúng. Như có thể thấy từ các hình vẽ, khi biên độ vùng suy giảm nhỏ hơn 0.5% đường kính của dây cáp, ta không thể kiểm tra biến dạng trực quan từ các đồ thị dịch chuyển này. Tuy nhiên, các kết quả từ biến đổi wavelet của các dịch chuyển này cho thấy các đỉnh rõ ràng tại vị trí của vùng giảm.

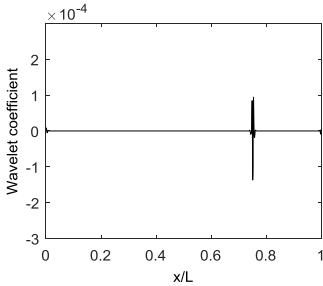


a) Độ sâu vùng suy giảm: 0.1%

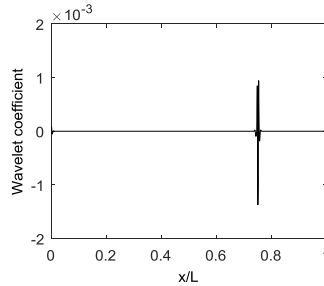


b) Độ sâu vùng suy giảm: 1%

Hình 3.4. Chuyển vị của rô bốt di động đối với các độ sâu của vùng suy giảm khác nhau



a) Độ sâu vùng suy giảm: 0.1%

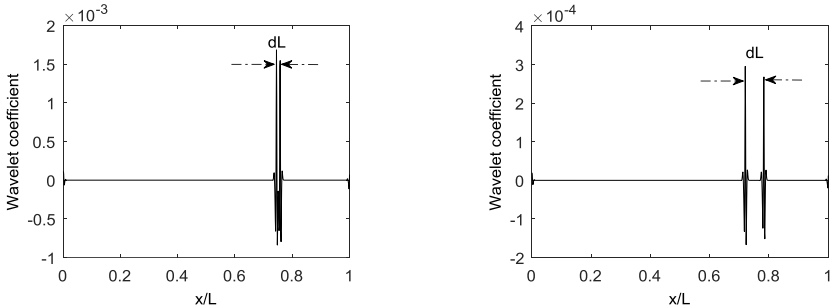


b) Độ sâu vùng suy giảm: 1%

Hình 3.5. Biến đổi wavelet chuyển vị của rô bốt di động đối với các độ sâu của vùng suy giảm khác nhau.

3.3.3. Ảnh hưởng của chiều dài vùng suy giảm đường kính

Hình 3.6 thể hiện chuyển vị của robot và phép biến đổi wavelet của chúng khi biên độ vùng suy giảm bằng 5% đường kính và chiều dài vùng suy giảm dao động từ 1m đến 5m. Kết quả mô phỏng cho thấy sự biến dạng trong chuyển vị robot trở nên trơn hơn khi chiều dài vùng giảm tăng. Tuy nhiên, các biến dạng trong chuyển vị vẫn có thể được phát hiện rõ ràng thông qua các đỉnh rõ ràng trong phép biến đổi wavelet.



a) Độ dài vùng suy giảm: 1m

b) Độ dài vùng suy giảm: 5m

Hình 3.6. Biến đổi wavelet chuyển vị của rô bốt khi độ dài vùng suy giảm khác nhau.

Số lượng đỉnh và độ cao của chúng trong phép biến đổi wavelet phụ thuộc vào chiều dài vùng giảm. Khi chiều dài vùng giảm nhỏ, ví dụ $l_r=0.1\text{m}$, chỉ có một đỉnh trong phép biến đổi wavelet tại vùng giảm. Khi chiều dài vùng giảm tăng, hai sự thay đổi đột ngột này tách rời nhau, dẫn đến xuất hiện hai đỉnh riêng biệt trong phép biến đổi wavelet tại vùng giảm.

3.4. Kết luận

Chương 3 đã thiết lập phương trình chuyển động của hệ dầm – rô bốt di động bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhằm phát hiện hư hỏng trên dầm bằng cách sử dụng tín hiệu dao động thu được từ cảm biến được lắp trên rô bốt di động. Ảnh hưởng của hư hỏng dạng vết nứt và dạng suy giảm đường kính của dầm đến tín hiệu dao động của rô bốt di động đã được phân tích, làm cơ sở cho việc phát triển các phương pháp phát hiện hư hỏng của dầm. Các kết quả của chương này đã được công bố trên các bài báo số 8, 10 trong “Danh mục công trình liên quan tới Luận án”

Chương 4. THỰC NGHIỆM KIỂM CHỨNG

Trong Chương này, Luận án trình bày kết quả thực nghiệm cho 2 trường hợp: dầm có khối lượng tập trung và dây cáp có rô bốt di động

4.1. Dầm có khối lượng tập trung

4.1.1. Đo hàm receptance của dầm thép có chiều rộng thay đổi và có khối lượng tập trung

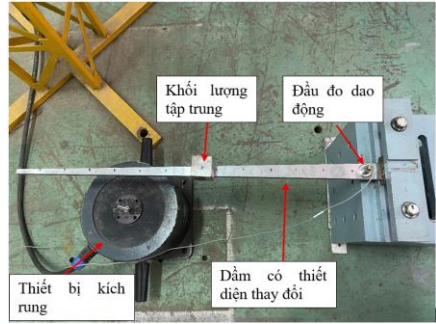
Thông số của dầm: Chiều dài: $L = 0.7\text{ m}$;

Chiều dày không đổi: $h = 0.01\text{ m}$.

Chiều rộng thay đổi: tại đầu ngàm $b_0 = 0.03\text{m}$, tại đầu tự do $b_1 = 0.01\text{m}$;
 Khối lượng tập trung gắn trên dầm: 0.6 kg.

Để đo một đường cong receptance ứng với một tần số của lực kích động, lực kích động được đặt ở một vị trí cố định trên dầm, sau đó di chuyển đầu đo để đo lần lượt dao động tại 14 điểm chia trên dầm. Vẽ đồ thị biên độ receptance - vị trí đo từ các số liệu đo được tại 14 điểm trên dầm ta thu được một đường cong receptance của dầm.

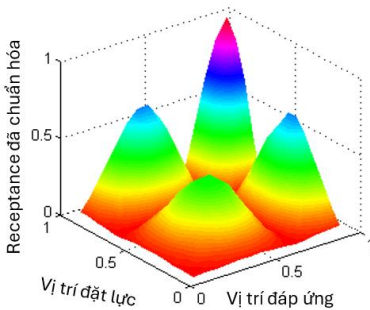
Để đo một ma trận receptance ứng với một tần số của lực kích động ta sẽ đo 14 đường cong receptance tương ứng với 14 vị trí đặt lực kích động trên dầm.



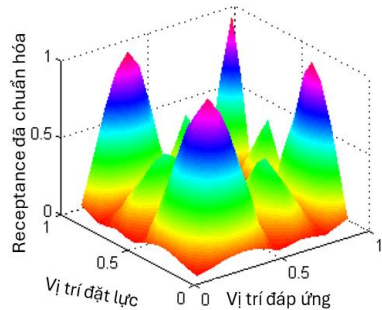
Hình 4. 1. Mô hình thí nghiệm đo ma trận receptance của dầm AFG mang khối lượng tập trung.

4.1.2. Kết quả đo receptance của dầm thép có thiết diện thay đổi, có khối lượng tập trung

Ma trận receptance của dầm có thiết diện thay đổi khi có và không có khối lượng tập trung thu được từ thực nghiệm cho thấy sự phù hợp giữa kết quả của mô phỏng số và thực nghiệm.



a) $\omega = \omega_2$, vị trí khối lượng $L/2$;



b) $\omega = \omega_3$, vị trí khối lượng $2L/3$

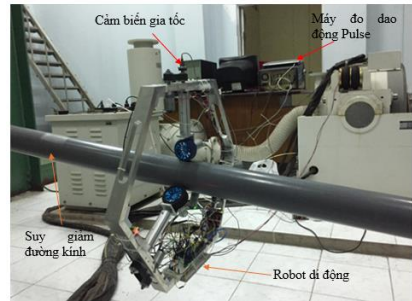
Hình 4. 2. Ma trận receptance của dầm công xôn có chiều rộng thay đổi và có khối lượng đo được từ thực nghiệm.

Kết quả đo được từ thực nghiệm cho thấy rằng giá trị của hàm receptance tại đầu tự do lớn hơn nhiều so với giá trị ở đỉnh của receptance. Khi dầm có khối lượng tập trung, ma trận receptance có sự thay đổi so với khi không có khối lượng tập trung. Nếu khối lượng đặt tại vị trí đỉnh của receptance thì độ lớn của đỉnh của receptance giảm đi đáng kể. Vị trí các nút của receptance “di chuyển” về phía có khối lượng tập trung.

4.2. Dây cáp có hư hỏng dạng suy giảm đường kính chịu tác động của rô bốt di động.

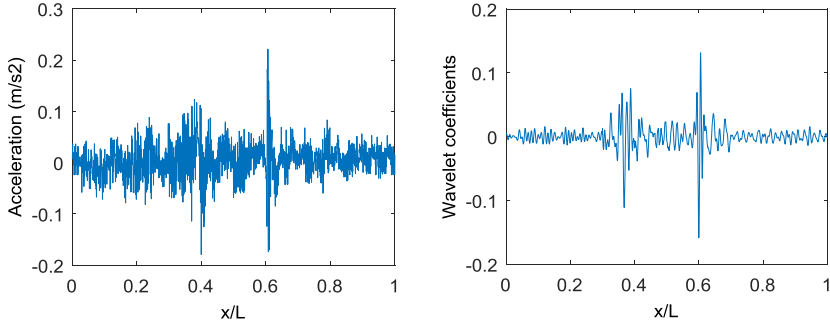
Trong thí nghiệm này, dây cáp có chiều dài là 4 m, đường kính 0.1 m và bề dày 0.004 m. Quỹ đạo robot di chuyển là $L=3\text{m}$. Sơ đồ bố trí thí nghiệm được thể hiện ở Hình 4.3.

Ba vùng giảm đường kính dạng nhám được tạo tại các vị trí $0.37L$, $0.6L$ và $0.8L$ với độ sâu khác nhau từ 1 mm đến 2 mm, tương đương 1% đến 2% đường kính ống. Vùng giảm thứ nhất và thứ hai được tạo ở một phần mặt ống, trong khi vùng giảm thứ ba được tạo bao quanh ống. Rô bốt di chuyển trên dây cáp nặng 7 kg. Vận tốc của robot là 0.38 m/s. Năm kích bản về hư hỏng của dây cáp dạng suy giảm đường kính được tiến hành thử nghiệm kiểm chứng.



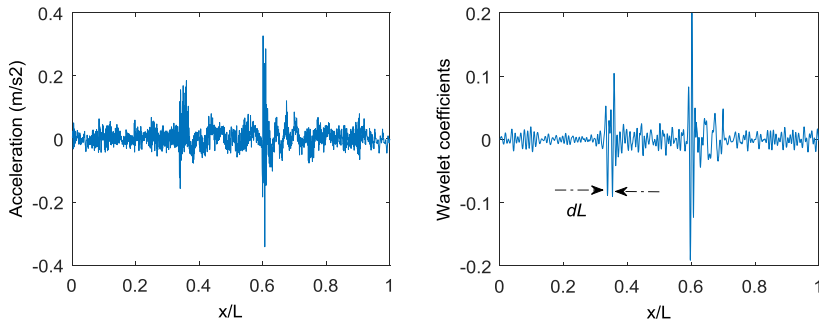
Hình 4.3. Toàn cảnh mô hình thực nghiệm

Các kết quả của thí nghiệm chỉ ra rằng, mặc dù tín hiệu đo được bị nhiễu do quá trình đo nhưng tín hiệu dao động đo từ rô bốt lại rất nhạy với sự suy giảm đường kính dây cáp. Hình 4.4 mô tả tín hiệu dao động đo từ rô bốt và phép biến đổi wavelet của nó trong kịch bản thứ nhất, trong đó độ sâu của vùng giảm thứ nhất và thứ hai lần lượt là 1 mm và 2 mm, chiều dài vùng suy giảm là 20 mm. Như quan sát được từ hình này, tại các vùng suy giảm đường kính, trên hình vẽ tín hiệu dao động của rô bốt xuất hiện hai đỉnh đáng kể, nhưng tín hiệu này trông khá phức tạp. Đỉnh tại vùng giảm thứ nhất không rõ bằng đỉnh tại vùng giảm thứ hai vì độ sâu vùng giảm thứ nhất nhỏ hơn độ sâu vùng giảm thứ hai. Tuy nhiên, phép biến đổi wavelet của tín hiệu dao động này cho thấy hai đỉnh rõ ràng tại các vị trí $0.37L$ và $0.6L$, nơi các vùng giảm được bố trí. Đỉnh trong biến đổi wavelet tại vùng giảm thứ nhất cũng nhỏ hơn đỉnh thứ hai.



Hình 4.4. Tín hiệu dao động của rô bốt và biến đổi wavelet của nó

Như có thể thấy từ Hình 4.5, khi chiều dài của vùng giảm đầu tiên tăng lên 60 mm, có hai đỉnh tách biệt trong phép biến đổi wavelet tại vùng suy giảm đường kính đầu tiên như kỳ vọng. Từ đồ thị của phép biến đổi wavelet, chiều dài khoảng cách giữa hai đỉnh tách biệt này tính được bằng $dL = 50$ mm, tức là nhỏ hơn 10 mm so với vùng giảm thực. Điều này có thể được giải thích bởi thực tế là đường kính của ống giảm trơn tru từ điểm bắt đầu và điểm dừng của vùng giảm đầu tiên và sau đó trở nên sâu nhất tại các vị trí cách điểm bắt đầu và điểm dừng khoảng 5 mm. Tại hai vị trí này có những thay đổi đáng kể về đường kính dẫn đến những ảnh hưởng đáng kể đến tín hiệu rung của robot. Do đó, những thay đổi đáng kể này sẽ được phát hiện và biểu diễn bằng các đỉnh đáng kể trong phép biến đổi wavelet.



Hình 4.5. Tín hiệu dao động của rô bốt và biến đổi wavelet của nó

4.3. Kết luận

Các kết quả thí nghiệm cho thấy kết quả mô phỏng số cho hàm receptance của dầm có thiết diện thay đổi là phù hợp với kết quả thực nghiệm. Điều đó đã xác nhận độ tin cậy của công thức chính xác cho hàm receptance của dầm có thiết diện thay đổi dọc theo trục dầm, có khối lượng tập trung thu được từ luận án.

Sự phù hợp giữa kết quả mô phỏng số và thực nghiệm đối với việc phân tích ảnh hưởng của hư hỏng của dây cáp đến phép biến đổi wavelet cho thấy sự đúng đắn của phương trình động lực học hệ dầm-khối lượng di động được phát triển trong luận án. Đồng thời, kết quả này cũng cho thấy triển vọng trong việc ứng dụng rô bốt leo cáp trong việc phát hiện hư hỏng của dây cáp cầu dây văng bằng phương pháp dao động trong tương lai.

Kết quả của chương này đã được công bố trên các công trình số 4, 8-10 trong “Danh mục công trình liên quan tới Luận án”.

KẾT LUẬN

Luận án đã xây dựng được phương trình động lực học của dầm AFG có thiết diện thay đổi dọc theo trục của dầm, có vết nứt, và có khối lượng tập trung. Từ việc giải phương trình này, dạng riêng của dầm và công thức chính xác cho hàm receptance đã được xác định. Dựa trên hàm receptance này luận án đã tiến hành tính toán mô phỏng số nhằm phân tích ảnh hưởng của vết nứt và khối lượng tập trung lên hàm receptance.

Luận án đã xây dựng được phương trình động lực học của dầm có hư hỏng chịu tác động của khối lượng di động bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Sau đó giải phương trình này để tìm phản ứng động lực học của hệ. Dựa trên nghiệm của phương trình động lực học này luận án đã mô phỏng và phân tích sự ảnh hưởng của hư hỏng dạng vết nứt và dạng suy giảm thiết diện dầm đến ứng xử động lực học của hệ.

Từ các phân tích kết quả mô phỏng số cho hai trường hợp trên, luận án đã đề xuất hai phương pháp phát hiện hư hỏng dầm:

(i) Phương pháp dựa trên hàm receptance của dầm có khối lượng tập trung. Các khối lượng tập trung được đặt tại các vị trí phù hợp để làm dịch chuyển các đỉnh và các điểm nút của hàm độ cong receptance. Khi đó, các đỉnh nhọn nhỏ gây bởi các vết nứt ở gần vị trí điểm nút của độ cong receptance sẽ được khuếch đại để dễ dàng phát hiện. Đồng thời, các đỉnh bị ẩn khi vị trí vết nứt trùng với điểm nút sẽ bị lộ diện và được khuếch đại;

(ii) Phương pháp dựa trên biến đổi wavelet nhằm phát hiện hư hỏng

trên cáp dạng vết nứt và dạng suy giảm đường kính cáp khi chịu kích động của rô bốt di động. Khi rô bốt đi qua khu vực có hư hỏng dạng vết nứt hoặc suy giảm đường kính, biến đổi wavelet tín hiệu dao động của rô bốt sẽ xuất hiện các đỉnh nhọn rõ rệt ở các khu vực có hư hỏng. Dựa vào vận tốc của rô bốt, vị trí của hư hỏng sẽ được xác định. Đối với hư hỏng dạng suy giảm đường kính, khoảng cách giữa các đỉnh xuất hiện ở điểm đầu và điểm cuối vùng suy giảm sẽ được sử dụng để xác định độ rộng của vùng suy giảm đường kính.

Thực nghiệm đã được tiến hành cho 2 trường hợp là dầm có thiết diện thay đổi, có khối lượng tập trung và dây cáp hư hỏng dạng suy giảm đường kính có khối lượng di động. Kết quả cho thấy sự phù hợp tốt giữa kết quả mô phỏng số và kết quả thực nghiệm. Điều này khẳng định sự đúng đắn của công thức lý thuyết cho hàm dạng riêng và hàm receptance của dầm AFG. Đồng thời, kết quả thí nghiệm cũng cho thấy triển vọng của việc ứng dụng rô bốt leo cáp trong việc phát hiện hư hỏng của dây cáp cầu dây văng bằng phương pháp dao động.

Luận án đã có những đóng góp mới như sau:

1. Đã xây dựng phương trình động lực học và tìm được công thức chính xác cho hàm receptance của dầm có thiết diện và tính chất vật liệu thay đổi dọc trục, có vết nứt và có khối lượng tập trung.
2. Đã xây dựng phương trình động lực học của hệ dầm – khối lượng di động với dầm có hư hỏng dạng vết nứt và dạng suy giảm đường kính. Giải phương trình động lực học này để thu được ứng xử động lực học của hệ.
3. Từ các công thức đã phát triển, luận án đã tính toán, mô phỏng số và phân tích ảnh hưởng đồng thời của khối lượng tập trung hoặc khối lượng di động đến các tính chất động lực học của dầm. Từ các kết quả đó, đề xuất các phương pháp phát hiện vết nứt của dầm dựa trên hàm receptance sử dụng khối lượng tập trung và phương pháp phát hiện hư hỏng của dầm có rô bốt di động dựa trên biến đổi wavelet.

Các hướng nghiên cứu trong tương lai.

Mặc dù luận án đã tìm được công thức chính xác cho hàm receptance đối với dầm AFG có vết nứt và có khối lượng tập trung, nhưng mới chỉ tìm được cho các dầm AFG có các quy luật thay đổi theo hàm đa thức, trong khi các dầm AFG có cấu trúc khác như dầm AFG có lớp áp điện bên ngoài hoặc có các tính chất thay đổi dọc trục khác như dạng sin, dạng hàm mũ v.v cần tiếp tục nghiên cứu trong tương lai.

Trong luận án này dầm AFG mới chỉ được nghiên cứu khi có khối

lượng tập trung cố định, còn trường hợp dầm có nhiều khối lượng tập trung di động chưa được giải quyết nên cần được nghiên cứu trong tương lai. Đồng thời, việc thực nghiệm đối với dầm AFG cũng là một vấn đề cần được thực hiện khi khả năng chế tạo dầm AFG là khả thi trong thời gian tiếp theo.

Ngoài ra, việc ứng dụng robot leo cáp để phát hiện hư hỏng của cáp bằng phương pháp dao động mới chỉ bắt đầu. Việc phát hiện hư hỏng mới chỉ dựa trên các phân tích đơn lẻ của dạng hư hỏng như vết nứt, hoặc dạng suy giảm đường kính. Việc kết hợp ảnh hưởng của các dạng hư hỏng này cần được làm rõ trong các nghiên cứu trong tương lai. Hơn nữa, việc kết hợp phân tích wavelet với các công cụ hiện đại như AI cũng là vấn đề cần tiếp tục thực hiện theo hướng nghiên cứu của luận án.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

Kết quả của Luận án đã được công bố trên các Tạp chí Quốc tế, Tạp chí Quốc gia và Tuyển tập hội nghị khoa học chuyên ngành trong nước và quốc tế, cụ thể như sau:

1. Khoa Viet Nguyen, Thao Thi Bich Dao, 2026, Modified method for deriving the receptance function of a cracked nonuniform AFG beam carrying concentrated masses and its application for crack detection, *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 116, 105947. (SCIE, Q1)
2. Khoa Viet Nguyen, Thao Thi Bich Dao, Quang Van Nguyen, 2024, Exact solution for mode shapes of cracked nonuniform axially functionally graded beams, *Mechanics Research Communications*, 139, 104306. (SCIE, Q2)
3. Nguyễn Việt Khoa, Đào Thị Bích Thảo, Nguyễn Văn Quang, Vũ Đỗ Long, 2024, Công thức dạng riêng chính xác cho dầm AFG bị nứt có thiết diện thay đổi, *Hội nghị Khoa học kỷ niệm 50 năm thành lập Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam, Tiểu ban Công nghệ thông tin, Điện tử, Tự động hóa, Khoa học và Công nghệ vũ trụ*, Hà Nội, 14/3/2025.
4. Đào Thị Bích Thảo, Nguyễn Việt Khoa, Nguyễn Văn Quang, Vũ Đỗ Long, 2024, Nghiên cứu bằng thực nghiệm hàm phổ phản ứng của dầm có chiều cao thay đổi. *Hội nghị Cơ học Toàn quốc Kỷ niệm 45 năm thành lập Viện Cơ học*, Hà Nội, 09/4/2024, pp. 513- 523.
5. Nguyễn Việt Khoa, Đào Thị Bích Thảo, Nguyễn Văn Quang, 2024, Nghiên cứu, so sánh đặc trưng động lực học của dầm AFG có chiều cao với dầm có chiều rộng thay đổi. *Hội nghị Cơ học Toàn quốc Kỷ niệm 45 năm thành lập Viện Cơ học*, Hà Nội, 09/4/2024, pp. 407- 416.
6. Thao Thi Bich Dao, Khoa Viet Nguyen, Quang Van Nguyen, 2023, Exact receptance function of tapered AFG beam with nonlinearly varying ratio of beam properties carrying concentrated masses, *Vietnam Journal of Mechanics*, Vol.45, No.4, pp. 296-317.
7. Khoa Viet Nguyen and Thao Thi Bich Dao, 2023, Exact receptance function of a cracked axially functionally graded beam, *The 7th International Conference on Engineering Mechanics and Automation 2023*.
8. Thao Thi Bich Dao, Khoa Viet Nguyen, Quang Van Nguyen and Long Do Vu, 2023, Theoretical and experimental studies on the receptance function of a nonuniform AFG beam, *The 7th International Conference on Engineering Mechanics and Automation 2023*.

9. Khoa Viet Nguyen, Ngoc Van Bach Pham and Thao Thi Bich Dao, 2022, Damage detection of cables in cable-stayed bridge using vibration data measured from climbing robot, *Advances in Structural Engineering*, 2022, Vol 25(13), pp. 2705-2721. (SCIE, Q1)
10. Khoa Viet Nguyen, Thao Thi Bich Dao and Quang Nguyen Van, 2022, Influence of the varying axial force on the detection of diameter reduction of bridge cables using climbing robot, *Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI*, Hà Nội, 02-03/12/2022.
11. Thao Thi Bich Dao, Khoa Viet Nguyen and Long Do Vu, 2022, Receptance function of an axially functional graded beam with varying width using Adomian method, *Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI*, Hà Nội, 02-03/12/2022.
12. Khoa Viet Nguyen, Thao Thi Bich Dao, Long Do Vu and Quang Van Nguyen, 2021, Exact receptance and receptance curvature functions of the axially load cracked beam carrying concentrated mass, *The 6th International Conference on Engineering Mechanics and Automation (ICEMA6)*, 2021.