

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA**

PHẠM BẢO TOÀN

ĐẶC ĐIỂM PHỔ DAO ĐỘNG CỦA DÀM CẦU BỞI TẢI LƯU THÔNG

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật
Mã số chuyên ngành: 62520101

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

TP. HỒ CHÍ MINH NĂM 2018

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: GS.TS Ngô Kiều Nhi

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS.TS Lê Song Giang

Phản biện độc lập 1:

Phản biện độc lập 2:

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án họp tại
Trường Đại học Bách Khoa Tp. Hồ Chí Minh 268 Lý Thường Kiệt, Tp. Hồ Chí
Minh

vào lúc giờ ngày tháng năm 2019

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Khoa học Tổng hợp Tp. HCM
- Thư viện Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

1.1. Giám sát tình trạng cầu

Nhiệm vụ giám sát cầu bao gồm theo dõi lượng lưu thông, kiểm tra các hư hỏng và đo đạc khả năng chịu tải của cầu. Giải pháp hiện tại là kiểm định. Các biện pháp kiểm định bao gồm kỹ thuật kiểm tra không phá hủy NDT hay kiểm tra tải tĩnh và kiểm tra tải động bằng nguồn kích thích tiền định theo quy trình có sẵn. Các biện pháp này có chung hạn chế là khi tiến hành sẽ cản trở lưu thông. Một hướng gần đây đang được rất nhiều nhà khoa học quan tâm là kiểm tra tải động bằng chính nguồn kích thích tự nhiên của kết cấu. Diễn hình của hướng nghiên cứu này là sự xuất hiện của các hệ thống theo dõi tình trạng cầu (SHM) trong quá trình khai thác. Khoa học khai thác dữ liệu dao động thành các dấu hiệu để chuẩn đoán sự suy yếu của kết cấu (chuẩn đoán suy yếu bằng dao động VBDI) trở nên cấp thiết và phát triển rầm rộ. VBDI về cơ bản là một quá trình nhận dạng mẫu và bước quan trọng nhất là tìm những đặc trưng nhạy với suy yếu của kết cấu.

1.2. Một số đặc trưng giám sát tình trạng kết cấu

Cách tìm các đặc trưng suy yếu thường được chọn theo 2 hướng là có cấu trúc và phi cấu trúc. Hướng cấu trúc sử dụng toán học để mô hình các suy yếu thông qua các thuộc tính riêng của cơ hệ như tần số riêng, giảm chấn hay hàm dạng. Hạn chế của hướng cấu trúc là không mang tính khái quát, chỉ giải quyết những mô hình cụ thể nên khó xây dựng các phương pháp chuẩn đoán tổng quát. Hướng phi cấu trúc dựa vào chính số liệu đo được để xác định các đặc trưng nhờ vào phân tích tín hiệu miền thời gian, miền tần số và miền thời gian - tần số. Ưu điểm của hướng phi cấu trúc là tính khả thi khi áp dụng vào thực tiễn bằng cách xây dựng các thuật toán tổng quát cho nhiều mô hình thực tế.

- Tần số riêng có quan hệ với độ cứng của kết cấu, tuy nhiên sự thay đổi của tần số riêng kém nhạy (thay đổi nhỏ) với suy yếu.
- Giảm chấn nhạy hơn tần số riêng, tuy nhiên không ổn định và rất khó xác định chính xác từ số liệu đo.

- Hàm dạng thể hiện vị trí tương đối của các điểm trên kết cấu trong từng dạng dao động riêng, tuy nhiên nhạy với sự thay đổi của môi trường và tải.

- Đặc trưng miền thời gian: Trích xuất các đặc trưng thống kê từ tín hiệu ngẫu nhiên của kết cấu. Kỹ thuật xác định được sử dụng để xác định sự khác biệt giữa tình trạng kết cấu khảo sát với mô hình chuẩn. Sự sai biệt xuất hiện đại diện cho dấu hiệu suy yếu.

- Đặc trưng miền tần số: Sử dụng phân tích phổ chuyển tín hiệu miền thời gian sang miền tần số để khảo sát giá trị của từng hài tần số. Suy yếu xuất hiện sẽ ảnh hưởng đến giá trị tại các hài. Các đặc trưng thể hiện sự khác biệt của hài trước và sau suy yếu.

1.3. Giới thiệu luận án.

1.3.1. Lý do chọn đề tài

Với công trình cầu có nhiều kết cấu khác nhau thì phương pháp dao động hướng phi cầu trúc tổng quát hơn. Phân tích tín hiệu trong miền thời gian sẽ gặp khó khăn bởi nhiều. Để hạn chế nhiều, một số nghiên cứu chuyển tín hiệu sang miền tần số. Tuy nhiên những nghiên cứu này chỉ mới thử nghiệm trong phòng thí nghiệm hay kết cấu thực bởi nguồn tải tại vị trí cố định, rất ít nghiên cứu sử dụng nguồn tải di động. Vì vậy luận án tập trung nghiên cứu tín hiệu dao động của cầu từ tải lưu thông thực tế được xử lý sang miền tần số thông qua phân tích phổ.

1.3.2. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu

- Ý tưởng của luận án là tìm ra một đặc trưng tổng quát được giá trị của các thông số cơ bản của cơ hệ để đánh giá tình trạng kết cấu. Do đó khảo sát hình dạng của phổ để tìm ra các đặc trưng phù hợp.

- Với mục tiêu đánh giá tổng quát theo hướng phi cầu trúc, hư hỏng được hiểu tổng quát là những thay đổi làm suy giảm khả năng chịu tải của dầm cầu. Luận án sẽ sử dụng mô hình suy giảm độ cứng chống biến dạng EJ để mô hình hóa sự suy yếu của kết cấu. Từ đó khảo sát độ nhạy của các đặc trưng đề xuất.

- Đối với cầu giao thông, nhịp hay dầm cầu là một trong bộ phận chịu lực chủ yếu. Để áp dụng trên diện rộng, nhiều loại kết cấu nhịp sẽ được khảo sát. Ngoài ra để tiết kiệm chi phí, sử dụng tải lưu thông là hợp lý nhất. Do đó cần nghiên

cứu phổ dao động của dầm bởi tải di động không những bằng lý thuyết mà còn bằng số liệu thực tế. Từ đó tìm ra đặc điểm chung về sự thay đổi hình dạng phổ của tín hiệu dao động để xác định các đặc trưng thể hiện tình trạng cầu.

- Để khảo sát tính hiệu quả của các đặc trưng phổ từ tín hiệu dao động thực, luận án tiến hành xây dựng mô hình thí nghiệm nhằm kiểm tra mối quan hệ giữa các đặc trưng và tình trạng suy yếu của kết cấu.

1.3.3. Ý nghĩa thực tiễn của đề tài

Nghiên cứu của luận án có 2 ưu điểm: một là đặc trưng theo hướng phi cấu trúc nên có thể áp dụng rộng rãi cho các kết cấu cầu khác nhau, hai là sử dụng nguồn kích thích tự nhiên nên không làm ảnh hưởng đến hoạt động lưu thông. Chính nhờ 2 ưu điểm này mà phương pháp đề xuất có thể áp dụng trên diện rộng cho hệ thống cầu, góp phần hỗ trợ cho công tác quản trị cầu.

1.3.4. Tóm tắt luận án

Chương 1: Trình bày sơ lược vấn đề chuẩn đoán sự suy yếu và giám sát tình trạng cầu hiện nay. Từ cơ sở đó đề ra mục tiêu, nhiệm vụ và phương pháp nghiên cứu.

Chương 2: Trình bày tóm tắt lý thuyết phân tích phổ dao động của cơ hệ và áp dụng lên cầu. Đề xuất mô hình suy giảm độ cứng, từ đó giới thiệu các đặc trưng mô men phổ khảo sát sự thay đổi hình dạng phổ bởi tải ngẫu nhiên. Cuối cùng trình bày lý thuyết dao động của dầm với tải trọng di chuyển.

Chương 3: Khảo sát phổ dao động của một số nhịp cầu theo thời gian và rút ra những đặc trưng nhằm kiểm chứng tính khả thi của phương pháp.

Chương 4: Trình bày mô hình thí nghiệm kiểm chứng. Đề xuất xây dựng phổ dao động ngẫu nhiên trong thí nghiệm, đề xuất phương pháp sử dụng mô men phổ phát hiện, định vị và đánh giá mức độ suy yếu.

Chương 5: Tổng kết những nội dung chính, đóng góp khoa học và hướng phát triển của luận án.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Lý thuyết phân tích dao động

Phần này trình bày các khái niệm cơ bản của phân tích tín hiệu miền tần số
Biến đổi Fourier $W(f)$: chuyển tín hiệu miền thời gian $w(t)$ thành miền tần số.

$$W(\omega) = \int_0^T w(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.1)$$

Mật độ phổ công suất $S(\omega)$: thể hiện sự phân bố năng lượng tại các hài tần số.

$$S_w(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_w(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \Leftrightarrow R_w(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_w(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2.2)$$

Phân tích phổ của tín hiệu dao động sẽ được hàm mật độ công suất dao động (gọi tắt là phổ dao động).

Đáp ứng tần số $H(f)$: thể hiện mối quan hệ giữa hàm lực và đáp ứng của cơ hệ.

$$W(\omega) = H(\omega)F(\omega) \Rightarrow S_w(\omega) = |H(\omega)|^2 S_f(\omega) \quad (2.3)$$

Mô men phổ $SM_{(n)}$: khảo sát các đặc tính phân bố năng lượng từng miền tần số.

$$SM_{(n)} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} |\omega|^n S_w(\omega) d\omega \quad (2.4)$$

Diện tích phổ SA:

$$SA = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_w(\omega) d\omega \quad (2.5)$$

Tần số trung tâm ϖ :

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} S_w d\omega = \frac{1}{2} \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_w d\omega \quad (2.6)$$

2.2. Dao động của cơ hệ

2.2.1. Phổ dao động tổng thể

Phương trình vi phân chuyển động của cơ hệ có khối lượng riêng m và giảm chấn c chịu tác động bởi hàm lực $f(t)$ tại vị trí s bất kỳ với L là lực hồi phục của cơ hệ:

$$m\ddot{w}_r + c\dot{w}_r + L(w_r) = f(s,t) \quad (2.7)$$

Bất kỳ dạng chuyển động phức tạp đều có thể quy về tổ hợp các dạng chuyển động cơ bản. Với μ_j , $\phi_j(r)$, ξ_j , ω_j lần lượt là khối lượng suy rộng, hàm dạng riêng, hệ số giảm chấn và tần số riêng thứ j thì phương trình chuyển động tại từng dạng dao động riêng:

$$\ddot{w}_j + 2\omega_j \xi_j \dot{w}_j + \omega_j^2 w_j = \frac{1}{\mu_j} \int_R \phi_j(r) f(r, t) dr \quad (2.8)$$

Khi đó giá trị mô men phổ của cơ hệ được xác định bởi:

$$SM_{(n)} = \int_{-\infty}^{\infty} |\omega|^n S_f(s, \omega) \left| \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\phi_j(r) \phi_j(s)}{(\omega_j^2 - \omega^2) + 2i\xi_j \omega_j \omega} \right|^2 d\omega \quad (2.9)$$

Mô men phổ của tín hiệu là một hệ số phi trạng thái dùng để đánh giá sự thay đổi hình dạng của phổ công suất. Vì vậy quy luật biến thiên của mô men phổ về cơ bản cũng phụ thuộc vào thông số cơ bản của cơ hệ. Khảo sát giá trị mô men phổ sẽ góp phần chuẩn đoán tình trạng cơ hệ.

2.2.2. Phổ dao động từng dạng riêng

Phổ dao động của từng dạng riêng:

$$S_{w_j}(\omega) = |H_j(\omega)|^2 S_{f_j}(\omega) = \frac{S_{f_j} \phi_j^2(s)}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_j^2 \omega_j^2 \omega^2} \quad (2.10)$$

Diện tích phổ của đáp ứng chuyển vị (SA^d), vận tốc (SA^v) và gia tốc (SA^a):

$$SA_j^d = \frac{\pi S_{f_j} \phi_j^2(s)}{2\xi_j \omega_j^3} \quad (2.11)$$

$$SA_j^v = \frac{\pi S_{f_j} \phi_j^2(s)}{2\xi_j \omega_j} \quad (2.12)$$

$$SA_j^a = \frac{\pi S_{f_j} (1 - 4\xi_j^2) \omega_j \phi_j^2(s)}{2\xi_j} \quad (2.13)$$

- Ảnh hưởng của nhiễu

Cường độ nhiễu α được định nghĩa là tỉ số giữa giá trị hiệu dụng (ε_{ms}) của tín hiệu nhiễu ε với giá trị hiệu dụng x_{ms} tín hiệu đáp ứng x của kết cấu:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{ms}}{x_{ms}} \times 100\% \quad (2.14)$$

Tín hiệu thu nhận $z(t)$ cuối cùng là tổng hợp đáp ứng thực của của kết cấu bởi tải và nhiễu. Áp dụng các đặc trưng của tổng các quá trình ngẫu nhiên ta có:

$$SA^z = SA^x + SA^\varepsilon = (1 + \alpha^2) SA^x \quad (2.15)$$

Cường độ nhiễu lớn tới 20% chỉ làm ảnh hưởng tới diện tích phổ có 4%. Đặc trưng phổ ít nhạy với nhiễu tín hiệu.

2.3. Mô hình suy yếu của dầm

2.3.1. Ảnh hưởng lên tần số riêng

2.3.1.1. Dầm có hình dạng mặt cắt ngang thay đổi

Xét dầm mặt cắt ngang hình chữ nhật có chiều cao thay đổi theo vị trí trên dầm:

$$h(x) = h_0(1 - e \sin(\pi x / l)) \quad (2.16)$$

Với e là mức độ suy giảm và J_0, ρ_0 lần lượt là mô men quán tính và khối lượng riêng của dầm có tiết diện không đổi. Khi đó tần số riêng của dầm có tiết diện thay đổi:

$$\omega_J^2 = \frac{(-128e^3 + 135e^2 - 148e + 60\pi) \pi^4 EJ_0}{20(3\pi - 8e) l^4 \rho_0} \quad (2.17)$$

2.3.1.2. Dầm có tính chất vật liệu biến thiên

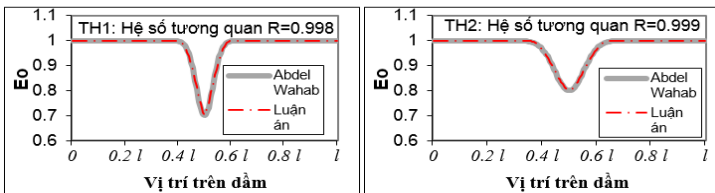
Abdel Wahab và các cộng sự của mình đã mô hình hư hỏng của dầm bê tông như một sự suy giảm modun đàn hồi E theo phương trình sau:

$$E = \begin{cases} E_0 & \text{nếu } x < l_d - bl/2; x > l_d + bl/2 \\ E_0 \left(1 - a \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{|x - l_d|}{bl/2} \right)^m \right) \right) & \text{nếu } l_d - bl/2 < x < l_d + bl/2 \end{cases} \quad (2.18)$$

Với a là mức độ suy giảm. Công thức (2.18) được luận án đơn giản hóa:

$$E(x) = E_0 \left[1 - a (\sin(\pi x / l))^n \right] \quad (2.19)$$

Hàm suy giảm $E(x)$ của luận án hoàn toàn phù hợp với hàm suy giảm của nhóm tác giả Abdel Wahab với hệ số tương quan giữa 2 hàm luôn lớn hơn 0,99 (Hình 2.1) với số mũ n thể hiện bề rộng vùng bị suy giảm (n càng nhỏ thì vùng suy giảm càng lớn).



Hình 2.1: Hàm suy giảm mô đun đàn hồi $E(x)$

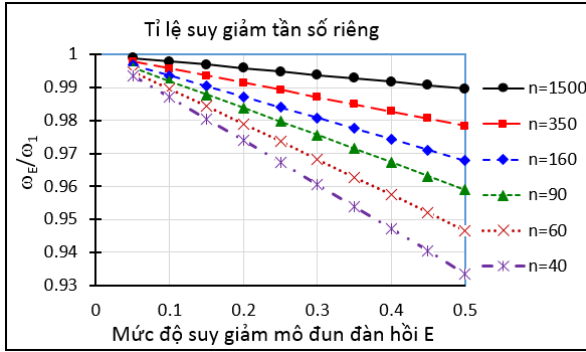
TH 1: Luận án ($a=0,3; n=100$) và Abdel Wahab ($a=0,3; l_d=0,5; b=0,2; m=0,7$)

TH 2: Luận án ($a=0,2; n=36$) và Abdel Wahab ($a=0,2; l_d=0,5; b=0,3; m=0,8$)

Khi đó tần số riêng của dầm có thể xấp xỉ:

$$\omega_E^2 = \frac{2\pi^3 E_0 J}{l^4 \mu} \left(\frac{\pi}{2} - a \frac{n+1}{n} \prod_{k=0}^{n/2-1} \frac{n-2k-1}{n-2k} A \right) \text{ với } \begin{cases} A = \pi & \text{khi } n \text{ chẵn} \\ A = 2 & \text{khi } n \text{ lẻ} \end{cases} \quad (2.20)$$

Tần số riêng thay đổi rất chậm so với sự suy yếu của kết cấu (Hình 2.2). Sự thay đổi này rất khó phát hiện bởi tồn tại sai số của phương pháp đo. Do vậy tần số riêng bậc thấp ít được đánh giá cao khi áp dụng vào thực tiễn.



Hình 2.2: Tỷ lệ suy giảm tần số bởi sự suy yếu của dầm

2.3.2. Ảnh hưởng lên phổ dao động

Theo thuyết dầm Euler Bernouli, độ cứng tương đương của dầm được cho bởi

$$k_j = \int_0^l EI(x) \left[\frac{d^2 \phi_j(x)}{dx^2} \right]^2 dx \quad (2.21)$$

Hệ số giảm chấn có mối quan hệ với độ cứng tương đương k của cơ hệ thì diện tích phổ của các đáp ứng (2.11), (2.12), (2.13) lần lượt trở thành:

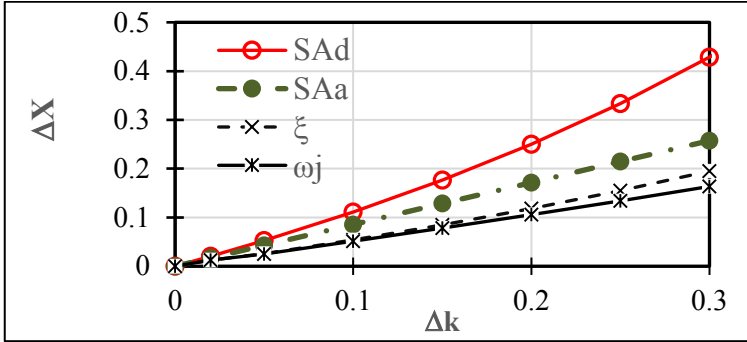
$$SA_j^d = \frac{\pi S_0 m_j^2 \phi_j^2(s)}{c k_i} \quad (2.22)$$

$$SA_j^v = \frac{\pi S_0 m_j \phi_j^2(s)}{c} \quad (2.23)$$

$$SA_j^a = \pi S_0 \left(\frac{k_j}{c} - \frac{c}{m_j} \right) \phi_j^2(s) \quad (2.24)$$

Dựa vào hình 2.3, nhận thấy mặc dù diện tích phổ của đáp ứng chuyển vị (SA^d) rất nhạy với độ cứng của cơ hệ nên dấu hiệu này có thể sử dụng để phát

hiện sự suy yếu dễ dàng tuy nhiên sử dụng để đánh giá tình trạng thì sẽ khó khăn vì tính phi tuyến. Bên cạnh đó diện tích phổ gia tốc (SA^a) có mối quan hệ tuyến tính với độ cứng của cơ hệ và cũng nhạy hơn các đặc trưng truyền thống như tần số riêng và giảm chấn. Do vậy sử dụng đặc trưng phổ của tín hiệu gia tốc giúp ta giám sát được một cách tường minh tình trạng hiện tại của kết cấu.



Hình 2.3: Mối quan hệ giữa sự thay đổi độ cứng k và một số đặc trưng

2.4. Mô hình dầm với tải trọng di chuyển

Phương trình dao động của dầm chịu uốn chịu tải $f(t)$ di chuyển với vận tốc v được diễn tả như sau:

$$EJ \frac{\partial w^4(x,t)}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial w^2(x,t)}{\partial t^2} + 2\rho\omega_b \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} = \delta(x-vt)f(t) \quad (2.25)$$

Trong đó $w(x,t)$ là chuyển vị đứng của dầm tại vị trí x . E, J, ρ, ω_b lần lượt là mô đun đàn hồi, mô men quán tính mặt cắt ngang, khối lượng riêng và tần số giảm chấn của dầm. Khi đó đáp ứng của dầm với một số tải trọng được tính toán.

2.4.1. Tải ngẫu nhiên

$$w(x,t) = \frac{2}{\rho l} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_{dj}} \sin \frac{j\pi x}{l} \int_0^t e^{-\omega_b(t-\tau)} \sin \omega_{dj}(t-\tau) \tilde{f}(\tau) \sin j\omega_v t d\tau \quad (2.26)$$

với $\tilde{f}(t)$ biểu diễn thành phần biến thiên của tải theo thời gian và $\omega_v = \pi v / l$. Nếu tải có dạng nhiễu trắng thì hàm tự tương quan của độ võng được tính:

$$R_w(x,t) = \frac{8\pi S_f}{\rho^2 l^2} \sum_{j=1}^{\infty} \sin^2 \left(\frac{j\omega x}{l} \right) \int_0^t h_j^2(t-\tau) \sin^2(j\omega_v \tau) d\tau \quad (2.27)$$

với S_f là mật độ phổ công suất của lực thì phổ dao động của đáp ứng được tính:

$$S_w(x, \omega) = \frac{4\pi S_f}{\pi\rho^2 l^2} \sum_{j=1}^{\infty} \sin^2\left(\frac{j\omega x}{l}\right) \left| \frac{1}{\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\omega_b\omega} \right|^2 \int_{-\infty}^{\infty} \sin^2(j\omega_v t) e^{-i\omega\tau} dt \quad (2.28)$$

Phổ dao động của kết cấu chịu tải di động ngoài phụ thuộc vào giá trị tải và tính chất cơ học của kết cấu còn phụ thuộc vào vận tốc của tải.

2.4.2. Tải không đổi $f(t)=P$

$$w(x, t) = \frac{2P\omega}{l\rho} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{j}{(\omega_j^2 - j^2\omega_v^2)^2 + 4\omega_b^2 j^2 \omega_v^2} \left[\frac{\omega_j^2 - j^2\omega_v^2}{j\omega_b} \sin j\omega_v t - \frac{\omega_{dj}^2 - \omega_b^2 - j^2\omega_v^2}{\omega_{dj}} e^{-\omega_b t} \sin \omega_{dj} t - 2\omega_b (\cos j\omega_v t - e^{-\omega_b t} \cos \omega_{dj} t) \right] \sin \frac{j\pi x}{l} \quad (2.29)$$

Trong đó: $\omega_{dj}^2 = \omega_j^2 - \omega_b^2$

2.4.3. Tải điều hòa

Trong phần này luận án đã cải tiến kết quả của tác giả Fryba bằng cách khảo sát thêm ảnh hưởng của pha dao động θ của tải $f(t)=Q\sin(\Omega t+\theta)$.

$$w(x, t) = \frac{Q}{l\rho} \sum_{j=1}^{\infty} \left[\cos\theta (A(r_2) - A(r_1)) - \sin\theta (r_2 B(r_2) - r_1 B(r_1)) \right] \sin \frac{j\pi x}{l} \quad (2.30)$$

Trong đó: $r_1 = \Omega + j\omega_v$; $r_2 = \Omega - j\omega_v$

$$A(r) = \frac{1}{(\omega_j^2 - r^2)^2 + 4\omega_b^2 r^2} \left[(\omega_j^2 - r^2) (\cos r_2 t - e^{-\omega_b t} \cos \omega_j t) + 2\omega_b r \sin r t - \frac{\omega_b}{\omega_{dj}} (\omega_j^2 + r^2) e^{-\omega_b t} \sin \omega_{dj} t \right]$$

$$B(r) = \frac{1}{(\omega_j^2 - r^2)^2 + 4\omega_b^2 r^2} \left[\frac{\omega_j^2 - r^2}{r} \sin r t - \frac{\omega_{dj}^2 - \omega_b^2 - r^2}{\omega_{dj}} e^{-\omega_b t} \sin \omega_{dj} t - 2\omega_b (\cos r t - e^{-\omega_b t} \cos \omega_{dj} t) \right]$$

2.5. Kết luận

- Tần số riêng ít nhạy với sự suy yếu của cơ hệ. Và sự thay đổi hình dạng phổ nhạy hơn tần số riêng và hệ số giảm chấn.

- Với thông số θ cũng ảnh hưởng đến đáp ứng của dầm. Tuy nhiên hệ số θ rất khó xác định trong thực nghiệm. Đáp ứng của dầm tại một vị trí cũng là một biến ngẫu nhiên. Tuy nhiên góc θ không ảnh hưởng đến giá trị phổ.

CHƯƠNG 3. ĐẶC ĐIỂM PHỔ DAO ĐỘNG CỦA NHỊP CẦU

3.1. Giới thiệu

Cho rằng theo thời gian, các hư hỏng của cầu được tích lũy ngày càng nhiều hơn dẫn đến sự xuống cấp, nhóm nghiên cứu của phòng thí nghiệm Cơ học ứng dụng (PTN-LAM) tiến hành khảo sát tín hiệu dao động khoảng 200 nhịp, 156 trụ và 76 móng của gần 40 công trình cầu có dạng kết cấu khác nhau như cầu bê tông dự ứng lực, cầu bê tông liên hợp, cầu bê tông cột thép và cầu thép trên địa bàn thành phố Hồ Chí Minh. Cuộc khảo sát này thuộc dự án của PTN-LAM với Sở giao thông vận tải thành phố Hồ Chí Minh về kiểm tra dao động của các công trình cầu. Mục tiêu khảo sát là tìm đặc trưng của tín hiệu dao động có biến đổi theo thời gian xuống cấp của các loại cầu.

Thời gian theo dõi các công trình cầu trong suốt một năm được chia làm 4 đợt khảo sát, mỗi đợt cách nhau 3 tháng. Nhóm nghiên cứu của PTN-LAM cũng đã khảo sát mối quan hệ giữa các thông số động bằng một một số đáp ứng biến dạng, chuyển vị và gia tốc dùng trong kiểm định cầu cho thấy biến dạng và chuyển vị có quan hệ tuyến tính do đó các hình dạng phổ của chuyển vị và biến dạng gần như tương đồng nhau. Còn gia tốc và chuyển vị có quan hệ phi tuyến nên hình dạng phổ của chuyển vị và gia tốc sẽ khác nhau. Nên cần nghiên cứu vấn đề về phổ đáp ứng nào thể hiện tốt sự thay đổi với sự suy yếu.

Trong phần này, tín hiệu dùng để phân tích hàm mật độ phổ công suất là tín hiệu dao động. Để đơn giản, gọi mật độ phổ công suất (PSD) là phổ dao động.

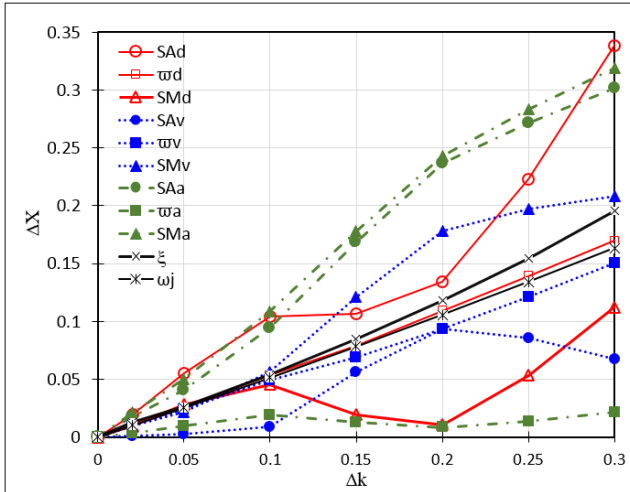
3.2. Đặc trưng khảo sát

Theo mô hình lý thuyết thì nguồn tải ngẫu nhiên thường có dạng biên độ phổ không đổi. Trên thực tế với nguồn tải lưu thông không những khác nhau về tải trọng còn khác nhau về vận tốc nên trong đô thị phổ kích thích sẽ có biên độ của các hài sẽ có giá trị ngẫu nhiên. Ứng với mỗi nguồn kích thích khác nhau thì sẽ xác định PSD của các đáp ứng khác nhau như chuyển vị, vận tốc và gia tốc. Vậy với 1 nguồn kích thích, 9 giá trị đặc trưng phổ ứng với các đáp ứng khác nhau được xác định:

- Chuyển vị: diện tích phổ SA^d , tần số trung tâm ω^d và mô men phổ SM^d .

- Vận tốc: diện diện tích phổ SA^v , tần số trung tâm ϖ^v và mô men phổ SM^v .
- Gia tốc: diện diện tích phổ SA^a , tần số trung tâm ϖ^a và mô men phổ SM^a .

Khảo sát các đặc trưng phổ của các đáp ứng chuyển vị, vận tốc và gia tốc cùng với tần số riêng và hệ số giảm chấn theo mức độ suy yếu thì đặc trưng phổ đều nhạy hơn đáp ứng gia tốc vẫn nhạy với sự suy yếu và ổn định hơn chuyển vị (Hình 3.1). Do đó luận án sẽ thu nhận tín hiệu dao động bằng gia tốc kế và khảo sát các đặc trưng của phổ gia tốc.



Hình 3.1: Mối quan hệ giữa sự thay đổi độ cứng k và một số đặc trưng phổ của kết cấu bởi nguồn kích thích ngẫu nhiên bất kỳ.

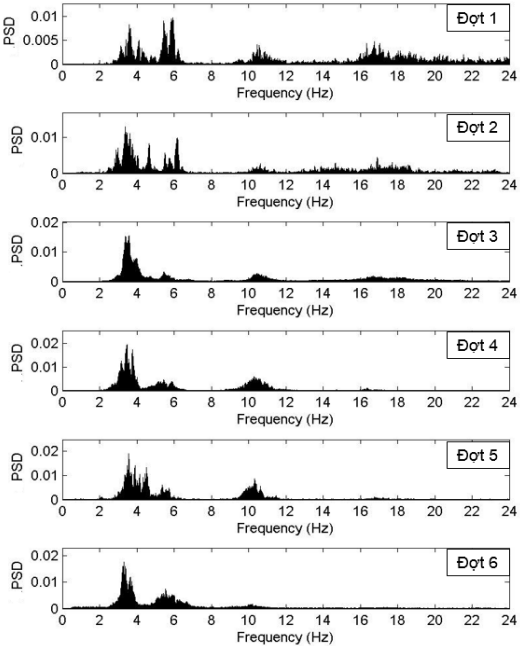
3.3. Đặc điểm phổ dao động thực tế

Khi kết cấu dao động ngẫu nhiên chịu tải có mật độ thay đổi liên tục như các công trình xây dựng, tín hiệu thường được xử lý sơ bộ trước khi tiến hành phân tích. Một phương pháp xử lý thường được sử dụng chính là trực chuẩn để chuyển các tín hiệu vật lý thu nhận thành các đại lượng vô thứ nguyên nhằm giảm bớt ảnh hưởng của tải trọng. Sau đó mới thực hiện các bước xử lý số liệu. Với tải đi động ngẫu nhiên có biên độ bất kỳ, luận án đề xuất cách trực chuẩn giá trị tín hiệu w thành \hat{w} bằng cách chia w cho giá trị hiệu dụng tín hiệu w_{ms} . Tương ứng với tín hiệu \hat{w} thì có PSD trực chuẩn (\hat{S}_w). Để thuận tiện cho việc trình bày, từ đây giá trị PSD được sử dụng chính là PSD đã được trực chuẩn.

Kết quả khảo sát cầu Sài Gòn 1 được sử dụng làm minh chứng. Cầu Sài Gòn 1 là được sửa chữa và nâng cấp từ cầu cũ vào năm 2000. Cầu dài 986,12 m rộng 24m, gồm 32 nhịp (29 nhịp dầm bê tông và 3 nhịp dầm thép). Nhịp bê tông có kết cấu dầm tựa giản đơn (dài 24,47m) và một bản mặt cầu bê tông, và 3 nhịp thép (nhịp 16, 17,18) có kết cấu dầm liên tục dài 267,45 m (nhịp giữa được mắc đeo vào 2 nhịp còn lại). Với sự cho phép của Sở Giao thông Vận tải Tp Hồ Chí Minh, PTN-LAM đã tiến hành theo dõi cầu Sài Gòn trong 4 năm từ cuối năm 2011 đến năm 2015 (Bảng 3.1). Các nhịp cầu Sài Gòn sẽ được ký hiệu như sau, 4 nhịp bê tông A,B,C,D và 1 nhịp thép E.

Bảng 3.1: Thời gian khảo sát cầu Sài Gòn

Đợt đo	1	2	3	4	5	6
Thời điểm	12/2011	2/2012	5/2012	8/2012	7/2013	10/2015



Hình 3.2: Phổ dao động của nhịp bê tông D cầu Sài Gòn

Khảo sát hình dạng của phổ dao động tín hiệu thời gian dài của nhịp cầu Sài Gòn (Hình 3.2), trên phổ có 3 vùng tập trung tần số: vùng I (0 Hz ÷ 8 Hz), vùng II (8Hz ÷14 Hz) và vùng III (14Hz ÷ 24 Hz). Biên độ vùng I lớn nhất, vùng III nhỏ nhất. So sánh giữa các đợt đo, thấy rằng đợt 1 chứa biên độ đáng kể cả 3

vùng, đợt 2, 3 và 4 thì vùng III giảm dần, đợt 5 và 6 gần như chỉ còn lại vùng I và II (vùng có giá trị tần số thấp). Do vậy hình dạng đồ thị PSD của các nhịp thay đổi theo thời gian khai thác (mức độ xuống cấp). Để định lượng sự thay đổi hình dạng của PSD, luận án tiến hành khảo sát sự xuất hiện của các vùng tần số hay tần số trội và một số đặc trưng như diện tích, tần số trung tâm, mô men phổ.

3.3.1. Sự suy giảm các hài tần số

3.3.1.1. Đặc điểm tần số của các hài trội trong phổ dao động

Trên các đồ thị PSD, tồn tại nhiều hài tần số. Khảo sát sự xuất hiện của các hài tần số này trong tập tín hiệu PSD ứng với các nhịp của cầu Sài Gòn, luận án thấy rằng trong từng vùng tần số đều tồn tại hài có biên độ lớn hơn hẳn các hài còn lại. Theo lý thuyết phổ, thì những hài có biên độ lớn (hài trội) trong mỗi dạng dao động (Bảng 3.2) sẽ có giá trị tần số (tần số trội) lân cận tần số riêng của cơ hệ. Ký hiệu || nghĩa là không xuất hiện trên vùng cộng hưởng.

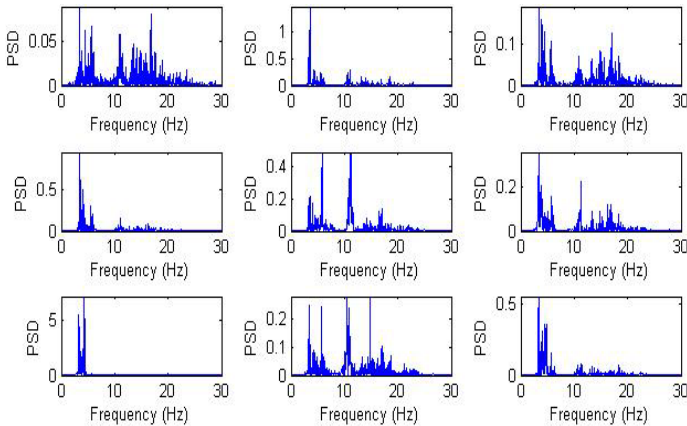
Bảng 3.2: Tần số trội của một số nhịp cầu Sài Gòn qua các đợt đo

Tần số trội	Đợt 1	Đợt 2	Đợt 3	Đợt 4	Đợt 5	Đợt 6
Nhịp A						
1	3,475	3,45	3,37	3,33	3,37	3,27
2			4,35	4,37	4,35	4,2
3	5,475	5,625	5,65			5,6
4	10,57	10,78	10,86	10,75		
Nhịp B						
1	3,45	3,45	3,35	3,6	3,375	3,275
2	5,525	5,5	5,83		5,6	5,675
3	10,65	10,425	11,125	11,05	10,525	
4	15,875	15,95				
Nhịp C						
1	3,5	3,475	3,5	3,525	3,55	3,4
2	5,525	5,45	5,3	5,45		5,4
3	11,075	10,925	11,25	10,85		
4	15,8	15,3				
Nhịp D						
1	3,5	3,45	3,375	3,525	3,5	3,225
2	5,6	5,5	5,55	5,57		5,55
3			10,45	10,4	10,325	
4	16,75	16,575	16,5			
Nhịp E						
1	1,675	1,675	1,675	1,65	1,675	1,675
2	9,975		10,225	9,575	10,075	9,5
3	13,625	13,575	13,65	13,7	11,65	10,575
4	15,55	14,425	15,525	15,475		

Nhận thấy rằng các tần số trội thay đổi không có quy luật trong 4 đợt đo đầu cách nhau thời gian ngắn khoảng 3 tháng. Điều này là do ảnh hưởng ngẫu nhiên của nguồn kích thích xung quanh chẳng hạn như tải trọng, vận tốc của dòng phương tiện lưu thông... Hài có tần số càng cao thì càng bất ổn định (không xuất hiện trên phổ). Qua thời gian dài hơn 2 năm thì giá trị tần số trội của nhịp bê tông suy giảm rõ rệt hơn so với nhịp thép.

3.3.1.2. Đặc điểm số vùng trội của phổ dao động

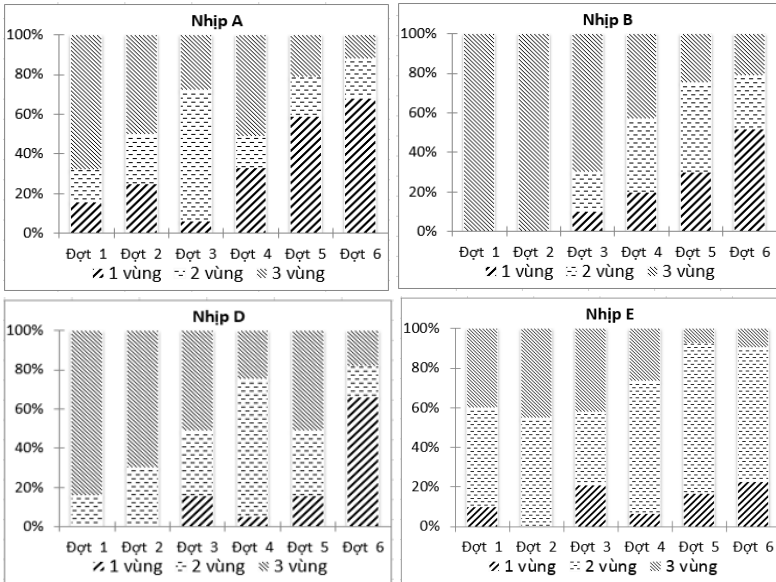
Kiểm chứng với tập tín hiệu phổ dao động thời gian ngắn (Hình 3.3) của các nhịp cầu cho thấy xuất hiện nhiều hài tần số nhưng đều có dạng tập trung tại các vùng tần số nhất định. Các vùng tần số này gọi là vùng trội. Sau đây luận án sẽ gọi các vùng tần số mà biên độ nổi trội hơn 5% biên độ vùng kế cận là vùng trội. Số vùng trội trong mỗi tín hiệu phổ sẽ khác nhau do lưu lượng giao thông thay đổi liên tục. Trong tập phổ dao động thu nhận tại mỗi đợt đo có phổ chỉ có 1 vùng trội, có phổ chỉ có 2 vùng trội và có phổ xuất hiện đồng thời cả 3 vùng trội. Tuy nhiên nhận thấy rằng vùng tần số thấp nhất luôn xuất hiện dù giá trị biên độ của vùng tần số này có lúc còn nhỏ hơn giá trị các vùng khác.



Hình 3.3: Giá trị phổ công suất của tín hiệu dao động của nhịp cầu Sài Gòn

Mỗi đợt đo có 3 dạng phổ: phổ có 1 vùng, phổ có 2 vùng và phổ có cả 3 vùng. Ứng với 6 đợt đo ta sẽ xác định được 6×3 giá trị phần trăm của từng loại

phổ có cùng số vùng. Từ đó xây dựng được đồ thị thể hiện diễn biến sự xuất hiện của số vùng tần số theo các đợt đo hay thời gian khai thác (Hình 3.4).



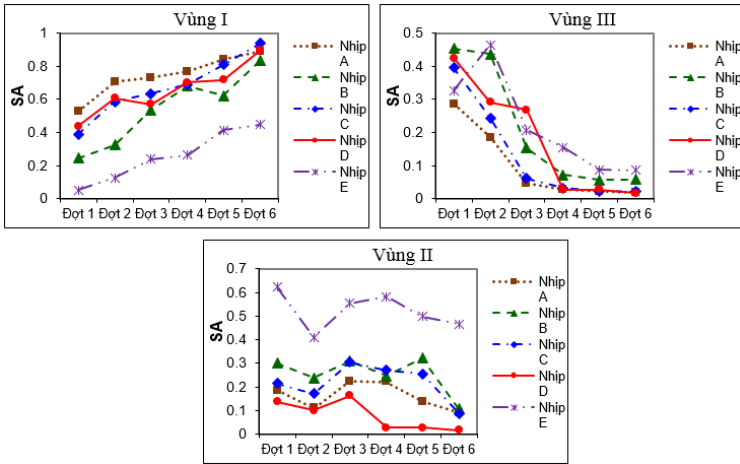
Hình 3.4: Phần trăm phổ có số vùng trội bằng nhau trong tập phổ dao động của nhịp cầu Sài Gòn

Dựa vào đồ thị trên hình 3.4, sự xuất hiện của các vùng tần số thay đổi không rõ ràng trong thời gian ngắn khoảng 3 tháng. Tuy nhiên với các đợt đo cách nhau tương đối dài khoảng 1 năm thì số phổ xuất hiện nhiều vùng suy giảm đáng kể và xuất hiện nhiều phổ chỉ có một vùng duy nhất. Xác suất xuất hiện của phổ có số vùng trội nhiều nhất có xu hướng suy giảm theo thời gian. Về mặt cơ học thì với cùng nguồn tải lưu thông, theo thời gian khai thác nhịp cầu sẽ suy yếu nên khả năng thực hiện các dao động bậc cao sẽ giảm hay nói cách khác là biên độ của hài bậc cao sẽ suy giảm. Tuy nhiên số phổ có xuất hiện vùng trội trung gian lúc tăng lúc giảm và phổ có số vùng trội ít nhất xuất hiện nhiều lên. So sánh giữa kết cấu nhịp bê tông và nhịp thép, vùng tần số cao nhất của nhịp bê tông có phần trăm xuất hiện thay đổi nhanh chóng hơn nhịp thép trong cùng một khoảng

thời gian như nhau. Điều này hoàn toàn phù hợp với tính chất vật liệu của kết cấu vì thời gian dẫn tới phá hủy của vật liệu thép lớn hơn hẳn vật liệu bê tông.

3.3.2. Đặc trưng phổ

3.3.2.1. Đặc điểm thay đổi diện tích phổ

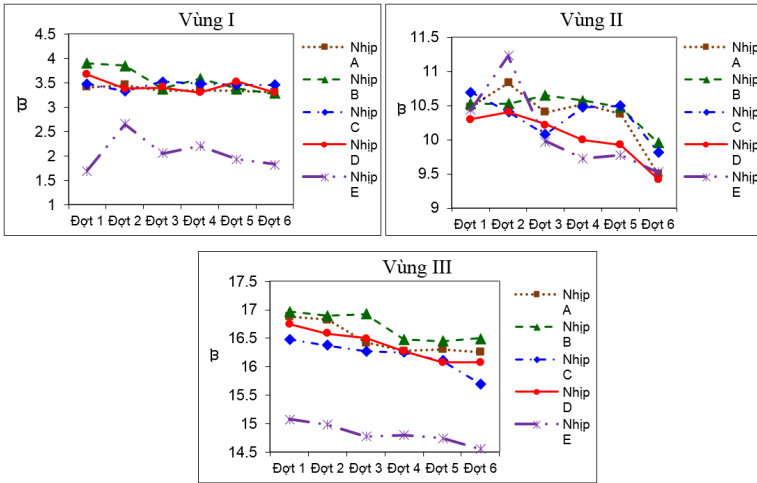


Hình 3.5: Diện tích phổ ứng với các vùng trội của một số nhịp cầu Sài Gòn

Hình 3.5 thể hiện sự thay đổi diện tích phổ (SA) tại 3 vùng tần số riêng biệt. Tại các vùng tần số cao (vùng III), SA có xu hướng giảm theo thời gian. Ở 2 đợt đo đầu tiên (12/2011 và 2/2012) với tất cả nhịp bê tông, vùng III chiếm tỷ lệ năng lượng tương đối đáng kể (30% đến 40 %) và đạt giá trị lớn nhất xung quanh 17Hz. Ở 2 đợt đo giữa (5/2012 và 8/2012), SA của vùng III giảm mạnh xuống trung bình dưới 5%. Điều này chứng tỏ có sự chuyển năng lượng từ vùng III sang vùng II hay vùng I. Tuy nhiên SA tại vùng II không có dấu hiệu tăng lên đồng biến theo trong khoảng thời gian ngắn. Ở đợt đo thứ 5 (7/2013) và thứ 6 (10/2015) cách đợt đo 4 lần lượt 1 năm và 2 năm, SA của vùng II bắt đầu có dấu hiệu suy giảm rõ rệt và SA của vùng I lại có xu hướng tăng lên. Lưu ý tại thời điểm đợt đo thứ 6, vùng III trên PSD của các nhịp biên độ rất nhỏ (không đáng kể). Hầu hết toàn bộ năng lượng đều tập trung ở vùng I. Hiện tượng trên chứng tỏ năng lượng sẽ có xu hướng chuyển dời từ tần số cao về tần số thấp khi khả

năng chịu tải của cầu bị suy giảm. Giá trị SA nhạy với tình trạng hoạt động của cầu ở vùng tần số cao nhất và thấp nhất tồn tại trên đồ thị PSD.

3.3.2.2. Đặc điểm thay đổi tần số trung tâm



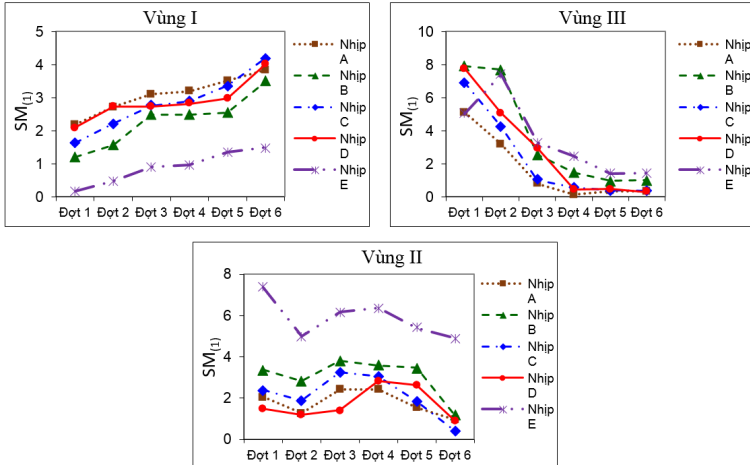
Hình 3.6: Tần số trung tâm ứng với các vùng trội của một số nhịp cầu Sài Gòn

Từ đồ thị trên hình 3.6 thì tại 3 vùng trội đều cho thấy giá trị tần số trung tâm giảm dần theo thời gian khảo sát. Quy luật hoàn toàn phù hợp với những nhận định về sự dịch chuyển năng lượng từ tần số cao về tần số thấp. Tuy nhiên nhận thấy tại vùng trội 2, giá trị tần số trung tâm ω thể hiện rõ sự suy giảm hơn giá trị diện tích phổ SA. Ngoài ra ta thấy rằng đối với nhịp thép E thì giá trị ω tại vùng trội III diễn biến theo quy luật rõ ràng hơn SA nhưng dấu hiệu này đối với vùng trội I thì ngược lại. Giá trị ω nhạy với vùng tần số cao và ít nhạy với vùng tần số thấp. Nhưng nhìn chung giá trị ω thay đổi tương đối nhỏ so với giá trị SA. Vì vậy giá trị ω không hiệu quả bằng SA trong việc giám sát tình trạng hoạt động của cầu.

3.3.2.3. Đặc điểm thay đổi mô men phổ

Tổng thể nhận thấy đồ thị $SM_{(1)}$ (Hình 3.7) có dạng tương đồng đồ thị SA ở cả 3 vùng tần số. Tuy nhiên sự biến thiên của $SM_{(1)}$ theo thời gian rõ ràng hơn

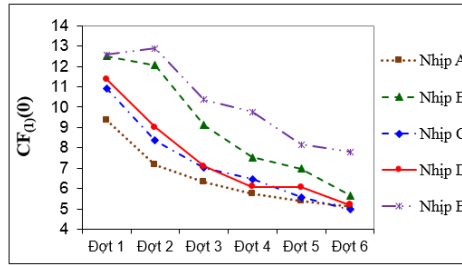
SA. Điều này thể hiện ở sự biến thiên mô men phổ của nhịp D tại vùng I và nhịp B tại vùng II. Giá trị $SM_{(1)}$ ở vùng I và III đồng biến khá lớn theo thời gian nên sử dụng $SM_{(1)}$ để theo dõi sự xuống cấp của nhịp thuận lợi hơn. Bên cạnh đó, sử dụng $SM_{(1)}$ sẽ tổng quát hơn SA vì thể hiện rõ sự xê dịch vùng năng lượng từ vùng tần số cao về vùng tần số thấp về mặt ý nghĩa toán học.



Hình 3.7: Mô men phổ bậc 1 của các vùng tần số của một số nhịp cầu Sài Gòn

Mặc dù giá trị $SM_{(1)}$ của từng vùng trội cho phép theo dõi sự thay đổi hình dạng phổ theo thời gian xuống cấp của cầu nhưng giá trị này chỉ cho phép đánh giá sự suy yếu trong từng dạng dao động (mỗi vùng tương trưng cho các dạng dao động có tần số riêng lân cận nhau) chứ không cho phép đánh giá tổng thể kết cấu. Điển hình là giá trị $SM_{(1)}$ của mỗi nhịp ở vùng III suy giảm một cách khác nhau. Đa đa số các nhịp A, C và D thì $SM_{(1)}$ ở đợt đo cuối hầu như rất nhỏ nhưng nhịp B và E vẫn còn rất lớn. Vì vậy có sự khác biệt về sự suy yếu theo thời gian giữa các nhịp trong mỗi đợt đo. Để đánh giá tổng thể sự xuống cấp giữa các nhịp, giá trị tích lũy mô men phổ ($CF_{(1)}$) được sử dụng:

$$CF_{(1)}(\omega) = \int_{\infty}^{\omega} SM_{(1)}(\omega) d\omega \tag{3.1}$$



Hình 3.8: Mô men phổ tích lũy bậc 1 của một số nhịp cầu Sài Gòn

Trong nghiên cứu này, luận án sử dụng giá trị tích lũy mô men phổ bậc 1 tại tần số gốc $\omega=0$ để khảo sát sự xuống cấp của nhịp cầu. Giá trị $CF_{(1)}(0)$ qua các đợt đo được thể hiện trên hình 3.8. Giá trị $CF_{(1)}(0)$ giảm dần theo thời gian. Vậy có thể sử dụng $CF_{(1)}(0)$ như một đặc trưng để giám sát tình trạng cầu.

3.4. Kết luận

Khảo sát các đặc trưng phổ của đáp ứng gia tốc nhạy hơn nhiều so với đặc trưng truyền thống như tần số riêng. Từ đó đề xuất:

- Sử dụng cảm biến gia tốc để thu nhận tín hiệu dao động của cầu
- Phổ dao động PSD trực chuẩn nhằm hạn chế ảnh hưởng của biên độ tải

Biên độ của các hài tần số càng cao càng ít ổn định và ngày càng suy giảm theo thời gian khai thác của kết cấu. Khảo sát các đặc trưng phổ như diện tích phổ SA, tần số trung tâm ϖ và mô men phổ $SM_{(1)}$ của phổ đại diện, thấy rằng có sự chuyển dời năng lượng từ vùng tần số cao sang vùng tần số thấp khi cầu xuống cấp theo thời gian. Luận án đề xuất giá trị tích lũy mô men phổ $CF_{(1)}$ nhằm đánh giá khách quan sự suy yếu tổng thể của cầu.

Nhận thấy rằng sự thay đổi hình dạng phổ của nhịp bê tông và nhịp thép của cầu Sài Gòn đều có tuân theo một quy luật. Khảo sát tất cả các nhịp với các loại kết cấu khác nhau trong dự án đều có chung đặc điểm này. Nhờ vào đặc điểm này sẽ mở ra một hướng giám sát tình trạng cầu một cách tổng quát và hiệu quả.

CHƯƠNG 4. MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM

4.1. Giới thiệu

Mô hình thí nghiệm gồm 4 bộ phận: mô hình dầm, mô hình tải, hệ thống truyền động (biến tần và động cơ), hệ thống đo:

- Mô hình dầm: dầm thép (92x10x0,5cm) tựa lên 2 gối cố định, hai đầu gắn sát thêm 2 bộ đỡ làm đường dẫn và đường ra của của tải di động.
- Mô hình tải: là một động cơ có lắp khối lệch tâm để gây ra tải đều hòa, động cơ làm vật nặng có lắp các bánh xe và được nối với hệ thống truyền động bằng sợi dây không giãn.
- Hệ thống truyền động: là một trụ tròn đồng trục nối sẵn đầu còn lại của dây không giãn. Trụ tròn nối với động cơ 3 pha qua bộ truyền đai răng, tốc độ quay của trụ được điều khiển bởi 1 biến tần nối với động cơ truyền động.
- Hệ thống đo: gồm 4 cảm biến gia tốc (K1, K2, K3, K4) lắp đặt phân bố đều dọc trên dầm, 1 cảm biến chuyển vị (D5).

Vận tốc của tải V_m (Bảng 4.1) trong mô hình thí nghiệm được tính toán dựa vào mối quan hệ đồng dạng với tỉ lệ tần số góc của phương tiện lưu thông (v_p/l_p) và tần số cơ bản ω_p của cầu theo công thức (4.1). Tương ứng l_m và ω_m lần lượt là chiều dài và tần số cơ bản của dầm thí nghiệm.

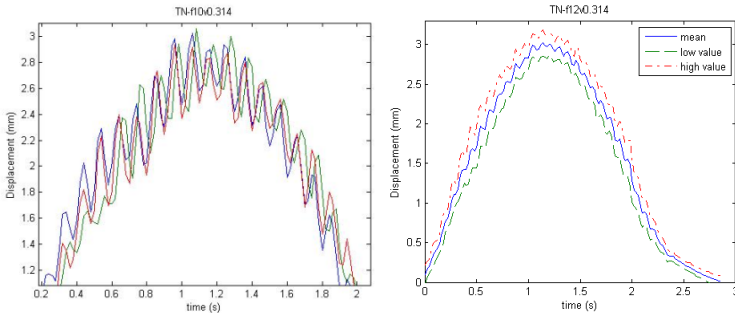
$$\frac{(V_p / l_p)}{\omega_p} = \frac{(V_m / l_m)}{\omega_m} \quad (4.1)$$

Bảng 4.1: Quan hệ giữa vận tốc của tải thực và tải di động trong thí nghiệm

Vận tốc tải	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
Thực tế	25,2 km/h	29,4 km/h	33,6 km/h	37,8 km/h	42 km/h
Thí nghiệm	18,84 cm/s	21,98 cm/s	25,12 cm/s	28,26 cm/s	31,4 cm/s

4.2. Khảo sát pha ban đầu của tải điều hòa lên dao động của dầm

Để khảo sát tính phù hợp của lý thuyết tải điều hòa di chuyển với các pha dao động ngẫu nhiên khác nhau, luận án đã cho động cơ của mô hình tải quay với tốc độ 720 vòng/ phút sẽ sinh ra một lực ly tâm tác dụng lên dầm theo phương thẳng đứng một lực biến thiên điều hòa với tần số 12 Hz. Và cho tải di chuyển qua dầm với vận tốc $V_5=31,4$ cm/s liên tục 40 lần. Do vậy khi tải tiếp xúc với dầm, rõ ràng thí nghiệm không biết rõ giá trị biên độ lực hay pha dao động. Qua kết quả phân tích, luận án nhận thấy pha dao động của tải cũng ảnh hưởng đáng kể đến biên độ của đáp ứng (Hình 4.1). Tuy nhiên khi tính giá trị trung bình của đáp ứng qua 40 lần tải di chuyển liên tục thì hoàn toàn phù hợp với tải không đổi. Điều này chứng tỏ dầm thí nghiệm là một cơ hệ liên tục tuyến tính.



Hình 4.1: Chuyển vị của dầm với tác dụng của tải trọng biến thiên điều hòa với pha dao động khác nhau: giá trị (trái) và thống kê (phải)

4.3. Khảo sát hình dạng phổ dao động của dầm bị suy yếu

Mục tiêu chính của thí nghiệm là xác định ảnh hưởng của độ cứng tương đương của dầm đối với các đặc trưng của phổ công suất tín hiệu dao động (gia tốc) của dầm nhằm kiểm chứng các đặc trưng phổ ở Chương 3 phù hợp trong việc đánh giá tình trạng cầu. Luận án chọn mô hình suy yếu của dầm được tạo bằng vết cắt nhìn thấy được bên hông dầm. Vết cắt A nằm giữa kênh K2 và K3, còn vết cắt B nằm giữa kênh K1 và K2 (Hình 4.2).



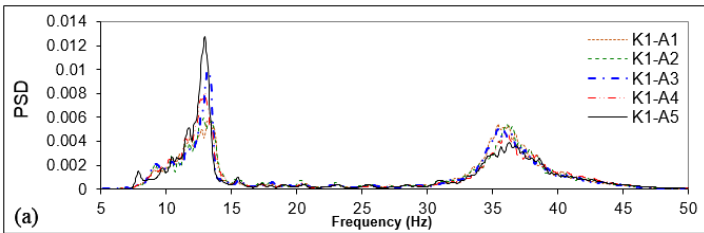
Hình 4.2: Mặt dưới của dầm với vết cắt bên hông

Bảng 4.2: Mức độ suy yếu của dầm

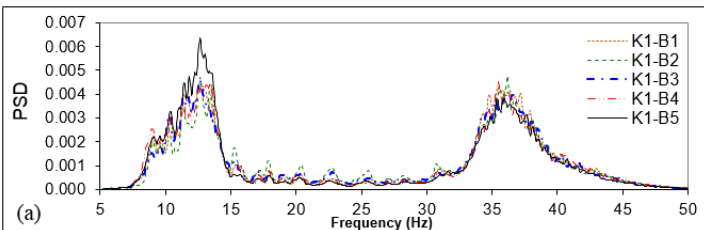
Tình trạng	A _i (chiều dài vết cắt a)	B _i (chiều dài vết cắt b)
Mức độ	A1 (4 mm)	B1 (4 mm)
	A2 (8 mm)	B2 (8 mm)
	A3 (12 mm)	B3 (12 mm)
	A4 (16 mm)	B4 (16 mm)
	A5 (20 mm)	B5 (20 mm)

Với mô hình tải lưu thông ngẫu nhiên trên cầu với những vận tốc khác nhau, thí nghiệm đã tiến hành cho tải không đổi di động liên tục với vận tốc khác nhau từ chậm đến nhanh (thấp nhất là 18,84 cm/s và cao nhất là 33,34 cm/s). Theo mô hình tuyến tính, phổ dao động ngẫu nhiên có thể được tạo bằng cách tổng hợp các phổ ứng với từng vận tốc khác nhau. Do đó luận án vẫn sử dụng PSD đặc trưng của tập phổ dao động. Mỗi mức độ suy yếu của dầm, tiến hành với cùng các vận tốc giống nhau. Khi tải di chuyển với vận tốc v_j thì sẽ thu được một phổ S_j . Như vậy với nhiều lần cho tải di chuyển, luận án sẽ thu được PSD đặc trưng ứng với tình trạng suy yếu.

$$\bar{S}(\omega) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j \tag{4.2}$$



Hình 4.3: Phổ dao động đặc trưng tại vị trí K1 của dầm có vết cắt A



Hình 4.4: Phổ dao động đặc trưng tại vị trí K1 của dầm có vết cắt B

PSD cho từng mức độ suy yếu của dầm thu được tương ứng được thể hiện trên hình 4.3 đối với vết cắt A và hình 4.4 đối với vết cắt B. Ta thấy rằng trên hình ảnh phổ công suất của đáp ứng có 2 vùng tần số. Vùng I trải dài từ 0 đến 25 Hz và tập trung quanh 13 Hz, vùng II trải dài từ 25 Hz đến 50 Hz và tập trung quanh 36 Hz.

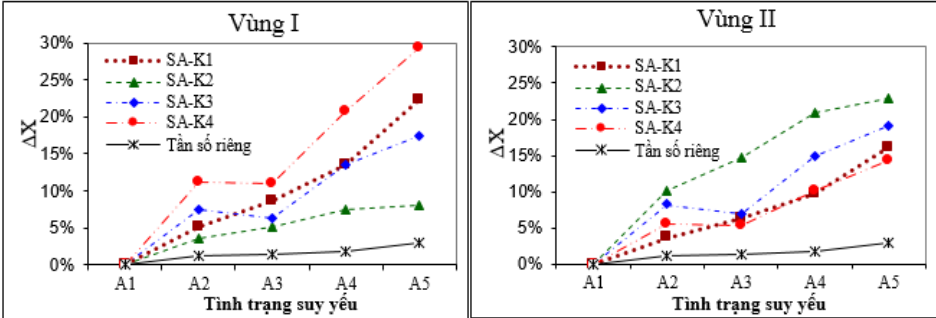
Ngoài ra đối với cơ hệ liên tục, phổ công suất tại từng vị trí còn phụ thuộc vào hàm dạng của từng dạng dao động tại vị trí đó. Để đánh giá khách quan sự thay đổi của mô men phổ tại các vị trí khác nhau. Với X là một đặc trưng phổ, xét chỉ số đặc trưng phổ thể hiện sự thay đổi tương đối của đặc trưng đó như sau:

$$\Delta X_i = \left| \frac{X_i - X_1}{X_1} \right| \tag{4.3}$$

4.3.1. Ảnh hưởng của mức độ suy yếu lên diện tích phổ

Dựa vào hình 4.3 và 4.4, nhận thấy giá trị diện tích phổ SA tại vùng tần số cao (quanh 36 Hz) giảm dần và tại vùng tần số thấp (quanh 13 Hz) tăng dần.

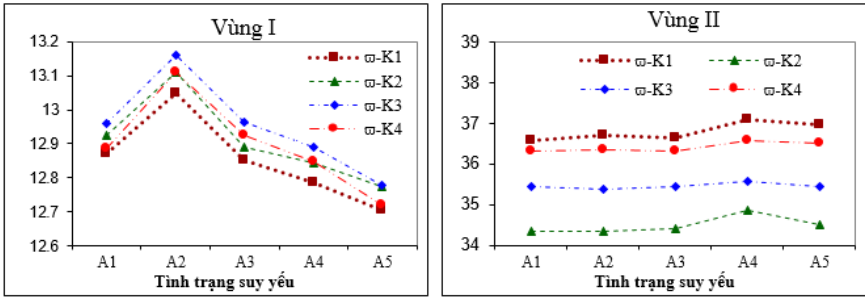
Tiếp tục khảo sát sự thay đổi chỉ số diện tích phổ và tần số riêng với các mức độ suy yếu (Hình 4.5). Luận án nhận thấy chỉ số mô men phổ thay đổi rất nhiều so với tần số riêng. Ngoài ra sự thay đổi rõ ràng nhất là tại các vị trí càng gần khu vực suy yếu. Điều này thấy rõ ràng là tại vùng tần số cao, chỉ số ΔSA tại vị trí K2 và K3 hoàn toàn lớn hơn hẳn K1 và K4. Trong khi đó với vết cắt B, ΔSA của K1 và K2 biến thiên ổn định hơn K3 và K4.



Hình 4.5: Sự biến thiên ΔSA của các vùng tần số theo tình trạng suy yếu A

4.3.2. Ảnh hưởng của mức độ suy yếu lên tần số trung tâm

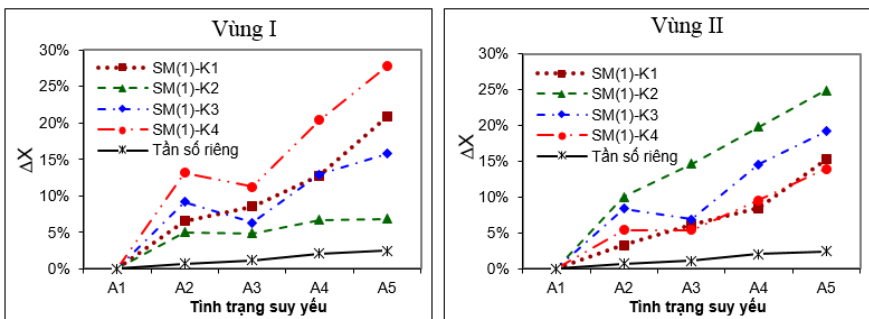
Để biểu thị sự thay đổi hình dạng về mặt dịch chuyển của phổ dao động thực, luận án tiếp tục sử dụng giá trị tần số trung tâm.



Hình 4.6: Sự thay đổi tần số trung tâm của các vùng trội theo tình trạng A

Từ đồ thị trên hình 4.6, tại vùng trội tần số cao, thì giá trị tần số trung tâm ω hầu như không thay đổi. Tuy nhiên tại vùng tần số thấp, giá trị ω có dấu hiệu suy giảm rõ rệt hơn tần số riêng mặc dù mức độ suy yếu nhỏ (trạng thái vết cắt B). Chúng tỏ khi kết cấu mới bị suy yếu thì năng lượng của vùng tần số cao sẽ suy giảm nhưng không có sự di chuyển của vùng tần số. Do vậy lúc này giá trị ω nhạy với vùng tần số thấp và ít nhạy với vùng tần số cao. Nhưng nhìn chung giá trị ω thay đổi tương đối nhỏ so với giá trị SA. Vì vậy giá trị ω không nhạy bằng SA trong việc đánh giá tình trạng của dầm.

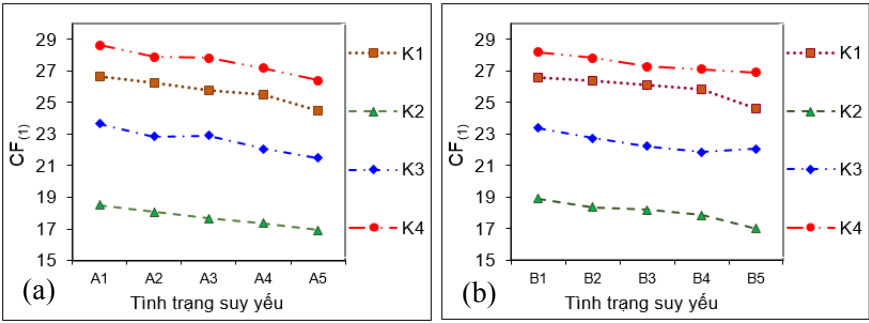
4.3.3. Ảnh hưởng của mức độ suy yếu lên mô men phổ



Hình 4.7: Sự biến thiên $\Delta SM_{(1)}$ của các vùng trội theo tình trạng A

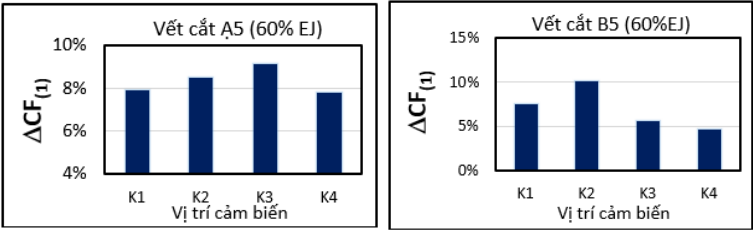
Dựa vào hình 4.7, giá trị $SM_{(1)}$ cũng có dấu hiệu giảm dần ở vùng tần số cao và tăng dần ở vùng tần số thấp tại cả 4 vị trí. Tính chất này tương tự như SA nhưng sự thay đổi của $SM_{(1)}$ ở vùng tần số cao lớn hơn nhiều so với SA. Điều này hoàn toàn phù hợp với đặc điểm diện tích phổ và mô men phổ của nhịp cầu.

Tương tự như cầu, giá trị tích lũy mô men phổ CF của dầm được khảo sát nhằm kiểm chứng khả năng ứng dụng vào bài toán đánh giá tình trạng kết cấu. Kết quả CF thể hiện trên hình 4.8a đối với vết cắt A và 4.8b đối với vết cắt B.



Hình 4.8: Tích lũy mô men phổ theo tình trạng suy yếu tại các vị trí trên dầm

Kết quả chỉ số tích lũy mô men phổ của thí nghiệm tại tình trạng A5 và B5 được tính toán. Cho thấy vị trí khảo sát càng gần vị trí suy yếu thì chỉ số tích lũy mô men phổ tại các vị trí đó sẽ lớn hơn hẳn các vị trí còn lại. Đây là dấu hiệu để phát hiện sơ bộ vị trí suy yếu trên kết cấu.



Hình 4.9: Kết quả chỉ số tích lũy mô men phổ dầm

4.4. Kết luận

Mô hình thí nghiệm đã được xây dựng nhằm kiểm chứng lý thuyết và kết quả khảo sát công trình cầu. Kết quả thí nghiệm cho thấy mô hình lý thuyết rất phù hợp và những nhận định về đặc trưng phổ dao động của cầu hoàn toàn hợp lý.

-Khảo sát ảnh hưởng do tính chất ngẫu nhiên của pha ban đầu trên mô hình tải điều hòa lên chuyển vị của dầm. Kết quả từ thí nghiệm hoàn toàn phù hợp với lý thuyết. Giá trị pha của tải điều hòa cũng ảnh hưởng một phần đến đáp ứng tổng thể của kết cấu dầm.

-Tiến hành thí nghiệm với mô hình dầm có vết cắt tại 2 vị trí khác nhau. Kết quả rất phù hợp với kết quả khảo sát kết cấu cầu thực. Sự biến thiên của các đặc trưng phổ đề xuất nhạy hơn nhiều lần so với tần số riêng. Trong các trường hợp suy yếu, khi mức độ vết cắt càng tăng thì các giá trị diện tích phổ và mô men phổ sẽ giảm ở vùng tần số cao và tăng ở vùng tần số thấp. Ngoài ra, ta còn nhận thấy rằng tại các vị trí càng gần vết cắt thì các đặc trưng trên thay đổi nhiều hơn các vị trí khác. Đây là dấu hiệu để nhận biết vị trí bị suy yếu trên kết cấu. Việc sử dụng các đặc trưng phổ rất hiệu quả trong việc đánh giá tình trạng suy yếu của kết cấu.

CHƯƠNG 5. KẾT LUẬN

5.1. Những nội dung chính của luận án

- Nghiên cứu lý thuyết dao động, xây dựng mô hình suy yếu của kết cấu nhằm khảo sát ảnh hưởng của sự suy yếu lên các đáp ứng dao động của kết cấu chịu tải ngẫu nhiên
- Đề xuất một số đặc trưng hình dạng để khảo sát sự thay đổi phổ dao động của cơ hệ bởi tải ngẫu nhiên, và kiểm tra ảnh hưởng của nhiễu lên các đặc trưng này làm công cụ cho bài toán đánh giá tình trạng kết cấu tổng quát.
- Nghiên cứu lý thuyết dao động dầm bởi tải di động như tải không đổi, tải điều hòa và khái quát là tải ngẫu nhiên. Tìm hiểu ảnh hưởng của yếu tố pha dao động của tải điều hòa lên đáp ứng dao động của kết cấu dầm.
- Tổ chức thu nhận tín hiệu dao động của nhiều loại dạng công trình cầu (gần 40 cầu) với số lượng lớn các kết cấu khác nhau theo thời gian khai thác nhằm tìm quy luật ứng xử chung của các cầu thông qua đáp ứng dao động thực tế.

- Khảo sát sự thay đổi hình dạng phổ dao động của cầu bởi tải lưu thông thực và đề xuất những đặc trưng nào phù hợp với mô hình tải lưu thông ngẫu nhiên trên cầu.
- Tiến hành mô hình thí nghiệm về sự suy yếu của kết cấu và kiểm tra khả năng ứng dụng của các đặc trưng đề xuất trong việc giám sát tình trạng cầu.

5.2. Những đóng góp khoa học của Luận án

Luận án trình bày một phương án hỗ trợ và cung cấp thông tin cho cơ quan quản lý có thể giám sát tình trạng cầu một cách khả thi trong điều kiện Việt Nam. Đó là đánh giá sự thay đổi của phổ dao động của kết cấu bằng cách khảo sát hình dạng của phổ dao động của nhiều công trình cầu (kết cấu và tuổi thọ khác nhau). Kết quả cho thấy tất cả phổ dao động của các cầu đều có chung đặc điểm là các hài tần số cao sẽ ngày càng nhỏ dần khi kết cấu suy yếu theo thời gian khai thác. Vùng tần số cộng hưởng cao nhất sẽ biến mất trước, sau đó đến vùng cộng hưởng tiếp theo, cuối cùng chỉ còn một vùng tần số thấp nhất. Xét về mặt động lực học là có sự chuyển dời năng lượng từ vùng tần số cao sang vùng tần số thấp. Đây là dấu hiệu phù hợp cho bài toán giám sát tình trạng cầu một cách tổng quát. Phương án khảo sát được thực hiện bằng cách:

5.2.1. Lý thuyết

- Thiết lập công thức tính tần số riêng cho trường hợp dầm không đồng nhất bằng cách tổng quát hóa tiết diện hình chữ nhật thay đổi của tác giả Fryba [147] và đơn giản hóa mô hình suy giảm mô đun đàn hồi của tác giả Abdel [148] tại vị trí nguy hiểm nhất của dầm. Cho thấy tần số riêng không thay đổi lớn khi cơ hệ suy yếu.
- Tổng quát hóa tải điều hòa của tác giả Fryba bằng cách xét thêm ảnh hưởng của pha dao động của tải. Nhận thấy pha dao động cũng ảnh hưởng đáng kể đến đáp ứng của kết cấu. Để hạn chế ảnh hưởng của pha nên chuyển tín hiệu sang miền tần số.

- Mở rộng khảo sát phổ dao động tổng quát có xét đến ảnh hưởng của giảm chấn thông qua các giá trị đặc trưng hình dạng phổ. Hình dạng phổ dao động rất nhạy với suy yếu của cơ hệ và ít nhạy với nhiễu.
- Đề xuất sử dụng phổ kích thích với các hài có biên độ ngẫu nhiên để mô hình tải lưu thông với các vận tốc khác nhau trên cầu. Các đặc trưng phổ của đáp ứng gia tốc ít phụ thuộc vào tải và nhạy với tình trạng cơ hệ hơn tần số riêng. Mô men phổ ổn định hơn diện tích phổ nên áp dụng khả thi vào thực tế

5.2.2. *Thực nghiệm*

- Thu nhận một số lượng lớn tín hiệu dao động của nhiều công trình cầu để thiết lập một cơ sở dữ liệu lớn phục vụ cho những nghiên cứu về giám sát cầu trong tương lai.
- Theo thời gian khảo sát thì sự xuất hiện phổ có số vùng trội nhiều nhất sẽ suy giảm và nhiều phổ có số vùng trội ít hơn sẽ xuất hiện trong tập phổ tín hiệu thu nhận được. Về mặt cơ học, khả năng thực hiện các dao động bậc cao sẽ giảm khi nhịp cầu sẽ suy yếu. Khảo sát vùng tần số cao phù hợp hơn vùng tần số thấp khi giám sát tình trạng kết cấu.
- Tiến hành thí nghiệm khảo sát các quy luật thay đổi hình dạng phổ của một kết cấu dầm chịu tải di chuyển với các vận tốc khác nhau. Thấy rằng khi dầm bị suy yếu thì quy luật thay đổi hình dạng của dầm hoàn toàn tương đồng với công trình cầu. Điều này chứng tỏ những đặc trưng phổ dao động của công trình cầu thể hiện được bản chất suy yếu. Sự thay đổi chỉ số đặc trưng phổ ngoài cho ta theo dõi mức độ suy yếu của kết cấu còn có khả năng phát hiện sơ bộ vị trí suy yếu. Vị trí khảo sát càng gần vị trí suy yếu thì sự thay đổi chỉ số đặc trưng phổ càng lớn so với các vị trí khác.

5.2.3. *Ứng dụng*

- Đề xuất giá trị tích lũy mô men phổ nhằm giám sát tình trạng kết cấu một cách tổng thể. Theo thời gian thì giá trị tích lũy mô men phổ ngày càng giảm. Đối

với những nhịp có cùng kết cấu thì giá trị này cho phép so sánh tình trạng suy yếu của các nhịp với nhau.

- Sử dụng tín hiệu dao động trong quá trình khai thác chỉ mới ứng dụng cho cầu lớn có lắp đặt hệ thống SHM. Phương pháp của luận án sử dụng đáp ứng của cầu trong quá trình lưu thông thực sẽ mở ra một triển vọng xây dựng hệ thống giám sát thường xuyên cho công trình cầu vừa và nhỏ nói chung kể cả cầu lớn đã lắp đặt hệ thống SHM nói riêng.

5.3. Hướng phát triển của Luận án

- Một điểm quan trọng của luận án là đánh giá tình trạng cơ hệ theo hướng phi kết cấu để áp dụng cho nhiều kết cấu khác nhau. Nên trong các nghiên cứu tiếp theo, luận án sẽ hoàn thiện phương pháp đánh giá tình trạng cầu thông qua phương pháp hồi quy để tìm mối quan hệ giữa sự xuống cấp của công trình với sự biến thiên của các giá trị đặc trưng phổ. Từ đó dự báo quá trình suy yếu của cầu một cách hợp lý.
- Trong trường hợp tổng quát, tập số liệu dao động thu nhận từ nguồn dao động tự nhiên sẽ chứa đựng nhiều yếu tố ảnh hưởng đến kết quả đánh giá của giải pháp. Vì vậy bước tiếp theo của luận án là hoàn thiện phương pháp lấy mẫu nhằm xây dựng các tập dữ liệu tối ưu phản ánh tốt mối quan hệ giữa sự suy yếu và phổ dao động tương ứng của cơ hệ.
- Nếu biết được vị trí suy yếu thì sẽ có khả năng sửa chữa đối với một số hư hỏng. Do vậy dựa trên đặc điểm phổ với vị trí suy yếu, luận án sẽ phát triển phương pháp xác định vị trí suy yếu trên một số kết cấu thông dụng.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. B.T. Pham, Q.T. Nguyen, D.T. Nguyen and K.N. Ngo, "Vibration Amplitude Changes With Bridge Span Deterioration," *International Journal of emerging Technology and Advanced engineering*, vol. 7 (7), pp. 55-70, 2017.
2. Phạm Bảo Toàn và Ngô Kiều Nhi, "Khảo sát hình dạng phổ công suất của dầm có khuyết tật dưới tải trọng di chuyển," tuyển tập *Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X*, Hà Nội, 8-9/12/2017, tập 3, quyển 2, trang 1271-1278.
3. Phạm Bảo Toàn và Ngô Kiều Nhi, "Một số đặc trưng của phổ đáp ứng dùng để phát hiện khuyết tật," tuyển tập *Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X*, Hà Nội, 8-9/12/2017, tập 3, quyển 2, trang 1279-1286.
4. N. K. Nhi, P. B. Toan, N. Q. Thanh and L. B. Quynh, "Suver characteristics of power spectrum generated by random vibration of the bridge," *Journal of Science and Technology*, vol. 52 (2c), pp. 114-124, 2014.
5. P. B. Toan, N. Q. Thanh and N. K. Nhi, "The influence of damage on the vibration spectrum of a beam subject to random moving load," *Science & Technology Development Journal*, vol. 18 (K8), pp. 87-95, 2015.
6. K.N. Ngo, B. T. Pham and Q. T. Nguyen, "Proposing a New Feature of Short –Span Bridges under Real Traffic for Damage Dectection," in *Proceeding 16th Asia Pacific Vibration Conference*, Ha Noi, Viet Nam, pp. 21-27, 2015.
7. P.B. Toan, N. K. Nhi, V.C. Luan and N. Q. Loi "A Study on Bridge Assessment Using Changes in Power Spectral Density," in *Proceedings of the eighth Viet Nam Conference on Mechatronics, Can Tho, Viet Nam*, 2016, pp. 860-867.
8. Ngô Kiều Nhi, Phạm Bảo Toàn, Nguyễn Quang Thành và Trịnh Ngọc Lâm, "Phân tích ứng xử của dầm cầu bị suy yếu dưới tác dụng của tải lưu thông," tuyển tập *Hội nghị Khoa học toàn quốc Cơ học Vật rắn biến dạng lần thứ 12*, Đà Nẵng - Việt Nam, 2015, tập 2, trang 176-183.
9. Ngô Kiều Nhi, Phạm Bảo Toàn, Nguyễn Quang Thành và Vương Công Luận, "Đặc trưng dao động riêng của kết cấu dầm không đồng nhất," tuyển tập *Hội nghị Khoa học toàn quốc Cơ học Vật rắn biến dạng lần thứ 12*, Đà Nẵng, Việt Nam, 2015, tập 2, trang 168-175.
10. Ngô Kiều Nhi, Phạm Bảo Toàn và Nguyễn Quang Thành, "Các đặc trưng dao động ngẫu nhiên của dầm dưới tải trọng di động," tuyển tập *Hội nghị Cơ học Kỹ thuật toàn quốc*, 2015, Đà Nẵng, Việt Nam, tập 1, trang 429-439.

11. Ngô Kiều Nhi, Phạm Bảo Toàn, Nguyễn Quang Thành và Bùi Thống Lĩnh, “Phân tích mối quan hệ giữa lý thuyết và thực nghiệm đối với độ võng của mô hình tại di động trên dầm,” tuyển tập *Hội Nghị Khoa Học Kỹ Thuật Đo Lường Toàn Quốc lần VI*, 2015, Hà Nội, Việt Nam, trang 198-205.