

Thực nghiệm nhận dạng tỉ số cản của kết cấu dầm thép bằng phương pháp phân tích miền tần số (FDD)

Experimental identification damping ratios of steel beam structures by Frequency Domain Decomposition (FDD) method

> **TRẦN TRUNG ĐỨC**

Học viện Kỹ thuật quân sự; Email: trungductran@lqdtu.edu.vn

TÓM TẮT

Tần số dao động riêng, dạng dao động riêng và tỉ số cản là các đặc trưng động lực học quan trọng của kết cấu công trình và có thể xác định bằng phương pháp giải tích hoặc thực nghiệm. Tần số dao động riêng và dạng dao động riêng có thể được xác định chính xác bằng các thử nghiệm động học trên các kết cấu, trong khi xác định tỉ số cản thường phức tạp hơn và sai số khó kiểm soát. Việc tính toán tỉ số cản trở nên cực kỳ quan trọng trong động lực học kết cấu vì tỉ số cản là một trong những thông số quan trọng của cộng hưởng. Nhận dạng chính xác về tỉ số cản vẫn là một vấn đề mở và được quan tâm trong thời gian gần đây. Bài báo trình bày phương pháp lý thuyết và thử nghiệm nhận dạng tỉ số cản của kết cấu dầm thép bằng phương pháp phân tích miền tần số (FDD). Phương pháp này thuộc nhóm các phương pháp phân tích Model hoạt động, chỉ sử dụng dữ liệu đo phản ứng của kết cấu để xác định các đặc trưng động lực học của kết cấu (Tần số dao động riêng, dạng dao động riêng, tỉ số cản).

Từ khóa: Tần số dao động riêng; dạng dao động riêng; tỉ số cản; nhận dạng, FDD.

ABSTRACT

Natural frequency, mode shape and damping ratio are important dynamic characteristics of building structures and can be determined by analytical or experimental methods. The natural frequency and mode shape can be accurately determined by dynamic tests on structures, while determining the damping ratio is often more complicated and the error is difficult to control. Calculating the damping ratio becomes extremely important in structural dynamics because the damping ratio is one of the important parameters of resonance. This article presents a theoretical and experimental method to identify the damping ratios of steel beam structures using the frequency domain decomposition (FDD) method. This method belongs to the group of Operational Model Analysis method, which only uses response measurement data to determine the dynamic characteristics of the structure (natural frequency, mode shape, damping ratio).

Keywords: Natural frequency; mode shape; damping ratio; FDD.

1. MỞ ĐẦU

Khi thiết kế hoặc kiểm định bất kỳ kết cấu nào, việc xác định các tham số động lực học (tần số dao động riêng, dạng dao động riêng, tỉ số cản) là việc rất quan trọng và phải thực hiện đầu tiên. Trong đó, tỉ số cản của kết cấu là tham số quan trọng trong cả phân tích, thiết kế và kiểm định công trình. Mô hình cản phổ biến nhất trong phân tích động lực học công trình là mô hình cản nhớt. Mô hình cản nhớt giả thiết lực cản tỷ lệ với vận tốc chuyển động [1] và phương trình vi phân dao động của hệ hữu hạn bậc tự do (BTD) với cản nhớt có dạng tổng quát như sau:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

Trong đó, $[M]$, $[K]$, $[C]$ lần lượt là các ma trận khối lượng, ma trận độ cứng và ma trận cản nhớt của hệ, $\{x(t)\}$ là véc tơ chuyển vị, $\{f(t)\}$ là véc tơ tải trọng tác dụng.

Ma trận khối lượng, ma trận độ cứng có thể xác định theo các công thức của phương pháp phần tử hữu hạn, ma trận cản nhớt $[C]$ của kết cấu thực rất phức tạp, khó xác định trước và thường được xác định bằng phương pháp thực nghiệm. Trong tính toán phân tích thường giả thiết cản nhớt Rayleigh, là tổ hợp tuyến tính của ma trận khối lượng và ma trận độ cứng của hệ [2]:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

Trong đó α, β là các hệ số cản Rayleigh được xác định từ 2 tần số dao động riêng và 2 tỉ số cản tương ứng.

Mặc dù được sử dụng khá phổ biến nhưng mô hình cản Rayleigh cũng tồn tại hạn chế là tỉ số cản chỉ phụ thuộc vào 2 tần số dao động riêng nên khi nhận dạng được nhiều mode (tần số-tỉ số cản) thì ma trận cản Rayleigh xấp xỉ không tốt sự phụ thuộc của cản vào các tần số dao động riêng bậc cao. Trong trường hợp này, ma trận cản

Caughey [3], [4] được đề xuất thay thế và là sự phát triển của mô hình cản Rayleigh. Caughey cũng sử dụng phương pháp gián tiếp xác định ma trận cản nhất theo ma trận độ cứng và khối lượng nhưng với giả thiết tổng quát hơn, ma trận $([M]^{-1}[C])$ là một hàm đa thức bậc p của ma trận $([M]^{-1}[K])$ như sau:

$$[M]^{-1}[C] = \sum_{k=0}^{p-1} a_k ([M]^{-1}[K])^k \quad (3)$$

Trong đó, các hệ số của đa thức a_k ($k=0, 1, \dots, p-1$) được xác định từ p cặp tần số dao động riêng và tỷ số cản tương ứng ω_i, ξ_i

Có nhiều phương pháp nhận dạng các tỉ số cản. Theo đặc điểm số liệu đo, có phương pháp miền thời gian [5] và phương pháp miền tần số [6]. Các phương pháp miền thời gian thường đòi hỏi thời gian đo kéo dài và nhạy cảm với nhiễu nên các phương pháp miền tần số được sử dụng phổ biến hơn. Theo nguồn số liệu đo có nhóm các phương pháp nhận dạng trên cơ sở kích thích đầu vào và số liệu đo phản ứng động của kết cấu (Input-Output) hay còn gọi là phương pháp phân tích Model thực nghiệm (EMA) và nhóm các phương pháp chỉ sử dụng phản ứng đầu ra của kết cấu (Output-Only), hạn chế của phương pháp EMA là cần phải xác định được đầu vào tác động lên kết cấu, điều này khó thực hiện đối với kết cấu thực và tốn kém. Trong khi đó phương pháp OMA khắc phục được hạn chế này vì chỉ cần sử dụng số liệu đầu ra để nhận dạng. Phân tích trong miền tần số (FDD) là một trong những kỹ thuật của phương pháp nhận dạng OMA.

Nhận dạng các đặc trưng dao động của kết cấu như tần số dao động riêng, dạng dao động riêng, tỉ số cản bằng thực nghiệm đã được nghiên cứu khá nhiều trên thế giới bằng nhiều phương pháp khác nhau. Tần số dao động riêng và dạng dao động riêng có thể được xác định chính xác, trong khi xác định tỷ số cản thường phức tạp hơn, sai số khó kiểm soát và chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như tín hiệu đo, quá trình phân tích xử lý tín hiệu, đặc điểm của các loại kết cấu. Ở Việt Nam, nhận dạng các đặc trưng động lực học của kết cấu bằng thực nghiệm ngày càng được quan tâm nghiên cứu. Trong đó nhận dạng tần số dao động riêng, dạng dao động riêng của kết cấu dầm thép bằng các phương pháp khác nhau như phương pháp kích động cưỡng bức [7], phương pháp chỉ sử dụng đầu ra [8]. Nhận dạng tỉ số cản sử dụng phương pháp đầu vào và đầu ra [9] [10]. Tuy nhiên, thí nghiệm nhận dạng tỷ số cản bằng phương pháp chỉ sử dụng đầu ra là phản ứng của kết cấu vẫn còn khá hạn chế và ít được nghiên cứu.

Trong bài báo này, tác giả tiến hành thí nghiệm đo dao động của kết cấu dầm thép và chỉ sử dụng phản ứng của kết cấu (gia tốc) để nhận dạng các tần số dao động riêng và các tỷ số cản tương ứng bằng phương pháp phân tích miền tần số FDD. Các giá trị tần số dao động riêng và tỉ số cản nhận dạng của dầm thép được so sánh với phương pháp lý thuyết và các phương pháp nhận dạng khác.

2. PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÁCH MIỀN TẦN SỐ (FDD)

Phân tích trong miền tần số được đề xuất bởi Brincker [6]. Phương pháp này phân tách ma trận các hàm mật độ phổ công suất tại mỗi tần số thành các giá trị kỳ dị và các vectơ kỳ dị bằng giải thuật phân giải giá trị kỳ dị (SVD). Phân tích trong miền tần số (FDD) là một mở rộng của kỹ thuật miền tần số cơ bản (Basic Frequency Domain) hay thường được gọi là kỹ thuật trích lấy đỉnh (Pick Peaking), trong kỹ thuật này các tần số dao động riêng được nhận dạng bởi việc tìm các đỉnh trong phổ công suất, dạng dao động riêng được phân tích từ các giá trị của vectơ riêng sau khi phân tích miền tần số, tỉ số cản được xác định bằng độ suy giảm logarit của tín hiệu trong miền thời gian nhận được sau khi biên đổi từ miền tần số sang miền thời gian.

Mối quan hệ giữa đầu vào chưa biết $x(t)$ và phản ứng đo được đầu ra $y(t)$ có thể được thể hiện như sau:

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (4)$$

Trong đó: $[G_{xx}(\omega)]$ là ma trận mật độ phổ năng lượng đầu vào; $[G_{yy}(\omega)]$ là ma trận mật độ phổ năng lượng đầu ra; $[H(\omega)]^*$ là ma trận liên hợp phức của hàm phản ứng tần số; $[H(\omega)]^T$ là ma trận chuyển vị của hàm phản ứng tần số. Ma trận hàm phản ứng tần số có thể được viết dưới dạng một phân số từng phần, với tập hợp các giá trị riêng λ và các phần dư R.

$$[H(\omega)] = \sum_1^N \frac{[R_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[R_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (5)$$

$$\lambda_k = -\sigma_k + j\omega_{dk} \quad (6)$$

Trong đó: n là số dạng dao động, λ_k là giá trị riêng của dạng dao động thứ k, σ_k là các hệ số suy giảm và ω_{dk} là tần số riêng suy giảm (có giảm chấn) của dạng dao động thứ k. $[R_k]$ là ma trận phần dư được biểu diễn như sau:

$$[R_k] = \phi_k \gamma_k^T \quad (7)$$

Trong đó: ϕ_k là vectơ dạng dao động, γ_k là vectơ tham gia model. Giả sử rằng các kích thích dao động là nhiễu trắng nên mật độ phổ công suất của nó là hằng số hay $[G_{xx}(\omega)] = C$, (C là hằng số). Công thức (4) được viết lại như sau:

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_1^N \sum_1^N \left[\frac{[R_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[R_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] \cdot C \cdot \left[\frac{[R_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[R_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right]^T \quad (8)$$

Nhân hai thừa số riêng của phân số và sử dụng định lý phân số riêng phần Heaviside, rồi thực hiện biến đổi toán học ta có thể viết lại mật độ phổ công suất dưới dạng sau:

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_1^N \frac{[A_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[A_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{[B_k]}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{[B_k]^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (9)$$

Trong đó: $[A_k]$ là ma trận phần dư thứ k của mật độ phổ công suất đầu ra. Tại một tần số cụ thể chỉ tác động lên một số hữu hạn các dạng dao động, thông thường là 1 hoặc 2 dạng dao động. Do vậy, trong mô hình cần nhỏ thì các ma trận mật độ phổ năng lượng có thể được viết như sau:

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k \in \text{Sub}(\omega)} \frac{d_k \phi_k \phi_k^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{d_k^* \phi_k^* \phi_k^{*T}}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (10)$$

Trong đó $k \in \text{Sub}(\omega)$ là tập hợp các dạng dao động ở tần số cụ thể và ϕ_k là dạng dao động và λ_k là giá trị riêng của dạng dao động thứ k.

Tương ứng với mỗi giá trị tần số dao động của công trình thì hàm Gyy đạt cực đại, chúng chứa các thông tin về tần số và cản tại mode dao động tương ứng nên giá trị của lần cận tại mỗi peak được sử dụng để nhận dạng tần số dao động, dạng dao động và cản.

Một hệ đa bậc tự do, giảm chấn tỉ lệ, đàn hồi tuyến tính có thể được thể hiện như một kết hợp tuyến tính của các dạng dao động như sau:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i q_i(t) = [\Phi] \{q(t)\} \quad (11)$$

Trong đó, $y(t)$ là vectơ đáp ứng của kết cấu, ϕ_i là vectơ dạng dao động riêng thứ i, $q_i(t)$ là dịch chuyển của mode thứ i (tọa độ mode). Ma trận hàm tương quan có dạng:

$$R_y(\tau) = E[y(t)y^T(t+\tau)] = [\Phi] E[q(t)q^T(t+\tau)] [\Phi]^T = [\Phi] R_q(\tau) [\Phi]^T \quad (12)$$

Lấy biến đổi Fourier của 2 vế công thức (12) ta được:

$$[G_{yy}(\omega)] = [\Phi] [G_{qq}(\omega)] [\Phi]^T \quad (13)$$

Trong đó $[G_{yy}(\omega)]$ là ma trận phổ của các tọa độ model.

Phương trình (13) có thể xác định bởi giải thuật phân giải giá trị kỳ dị SVD của ma trận mật độ phổ công suất đáp ứng.

Kỹ thuật phân tích miền tần số dựa trên phân tích giá trị kỳ dị của ma trận phổ phản ứng Hermitian như sau:

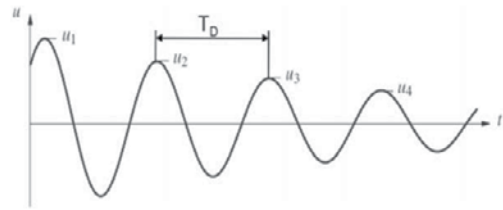
$$[G_{yy}(\omega)] = [U][S][U]^H \quad (14)$$

Trong đó $[S]$ là ma trận đường chéo chứa giá trị kỳ dị, $[U]$ là ma trận chứa vector kỳ dị và $[U]^H$ là ma trận Hermitian.

Tương ứng với véc tơ kỳ dị đầu tiên là một ước lượng của dạng dao động. Từ số liệu đo rung động của kết cấu (gia tốc) tiến hành tính toán ma trận mật độ phổ $[G_{yy}(\omega)]$ và tiến hành phân tích giá trị kỳ dị theo công thức (14) để xác định tần số dao động riêng của kết cấu.

Dữ liệu giá trị mật độ phổ phản ứng được xác định xung quanh đỉnh cộng hưởng được chuyển trở lại miền thời gian (Time Domain) bằng cách sử dụng FFT nghịch đảo để thực hiện [8, 9]. Ước tính tỉ số cản bằng cách dựa vào độ suy giảm Logarit của biên độ dao động ứng với các mode tương ứng khi biến đổi tín hiệu từ miền tần số sang miền thời gian.

Độ suy giảm biên độ dao động được thể hiện như sau:



Hình 1. Độ suy giảm biên độ dao động

Trong dao động tự do có cản, độ suy giảm loga của biên độ dao động được xác định bằng công thức sau:

$$\delta = \ln \frac{u_i}{u_{i+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (15)$$

Trong đó: δ là độ suy giảm loga; u_i là biên độ dao động; ζ là tỉ số cản.

3. THÍ NGHIỆM ĐO DAO ĐỘNG VÀ NHẬN DẠNG

3.1. Thí nghiệm đo dao động kết cấu dầm thép

Thí nghiệm nhằm thu được các phản ứng động (gia tốc) của kết cấu dầm thép theo thời gian. Sử dụng kết quả đo dao động thu được để nhận dạng tần số dao động riêng và tỉ số cản của kết cấu.

Kết cấu thí nghiệm để nhận dạng tần số dao động riêng là dầm thép một đầu ngàm. Thông số vật lý của kết cấu được thể hiện trong bảng 1. Các thiết bị dùng trong thí nghiệm được liệt kê trong bảng 2.

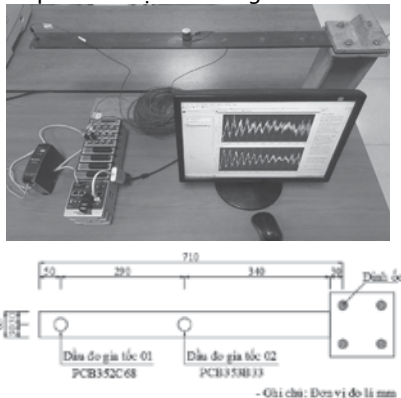
Bảng 1. Thông số kết cấu thí nghiệm

STT	Thông số	Giá trị	Đơn vị
1	Chiều dài	710	mm
2	Khối lượng riêng	7850	Kg/m ³
3	Mô đun đàn hồi	2,03x10 ⁵	Mpa
4	Chiều rộng	60	mm
5	Chiều cao	8	mm

Bảng 2. Thông số kết cấu thí nghiệm

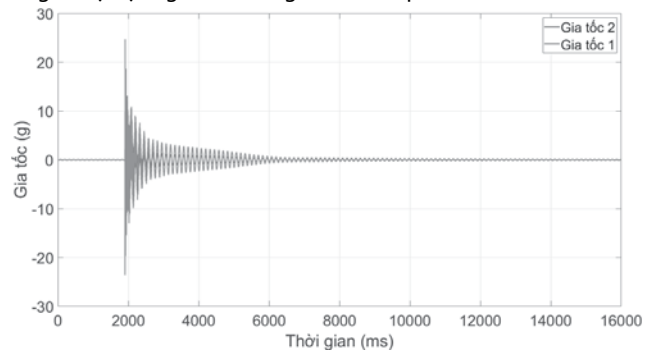
STT	Tên thiết bị	Mã hiệu	Hãng sản xuất	Dải đo	Số lượng
1	Thiết bị đo dao động	NI cDAQ-9137	National Instrument	Đa kênh	01
2	Đầu đo gia tốc	PCB 352C68	PCB Group	±50g (100mV/g)	01
3	Đầu đo gia tốc	PCB 353B33	PCB Group	±50g (100mV/g)	01

Sơ đồ thí nghiệm xác định tần số dao động riêng của dầm thép được bố trí như hình 1. Trong đó, sử dụng hai cảm biến gia tốc đo rung động của dầm, vị trí đặt các đầu đo được thể hiện như hình 2, bộ thiết bị đo NI được kết nối với các cảm biến gia tốc và màn hình hiển thị. Số liệu đo gia tốc được thu thập và hiển thị thông qua phần mềm NI Signal Express cài đặt sẵn trong thiết bị đo NI.



Hình 2. Sơ đồ thí nghiệm trên kết cấu dầm thép

Tiến hành lắp đặt và cài đặt các thông số cho thiết bị đo, tạo dao động cho kết cấu bằng kích thích bất kỳ đủ lớn để kết cấu làm việc trong giai đoạn đàn hồi. Số liệu đo được ghi lại là giá trị gia tốc theo thời gian tại vị trí gắn đầu đo gia tốc, kết quả như hình 3.

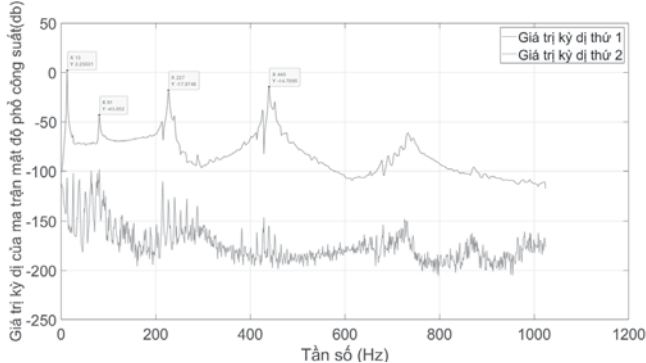


Hình 3. Kết quả đo gia tốc của dầm thép

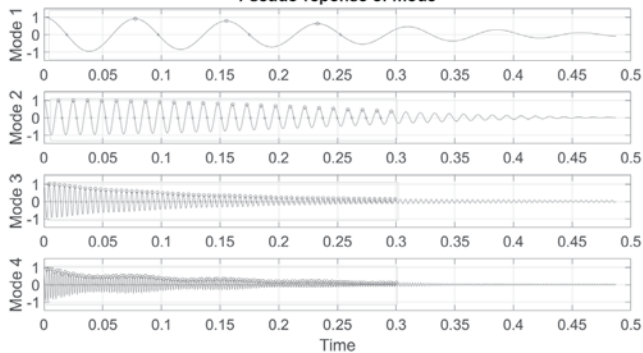
3.2. Kết quả ước lượng tần số dao động riêng và tỉ số cản

Với số liệu đo gia tốc thu được từ thí nghiệm, thực hiện tính toán ước lượng mật độ phổ công suất theo phương pháp ước lượng của Welch và tiến hành phân giải các giá trị kỳ dị bằng giải thuật SVD ta

xác định được các tần số dao động riêng của kết cấu ứng với các vị trí peak cộng hưởng. Kết quả nhận dạng bốn tần số dao động riêng đầu tiên được thể hiện như hình 4. Từ các peak cộng hưởng nhận dạng tần số dao động riêng, tiến hành biến đổi Fourier ngược từ miền tần số sang miền thời gian để tiến hành nhận dạng tỉ số cản, kết quả biến đổi sang miền thời gian như hình 5. Dựa vào độ suy giảm loga của dao động để xác định tỉ số cản theo công thức (15). Kết quả nhận dạng tần số dao động riêng và tỉ số cản tương ứng của dầm thép được tổng hợp tại bảng 3.



Hình 4. Giá trị kỳ dị của ma trận hàm mật độ phổ công suất
Pseudo-reponse of mode



Hình 5. Suy giảm dao động của mode

Bảng 3. Kết quả nhận dạng tần số dao động riêng và tỉ số cản của dầm thép

Mode	Tần số dao động riêng (Hz)			Tỉ số cản (%)	
	Mô hình PTHH	Thực nghiệm	Sai số (%)	Phương pháp EMA [10]	Phương pháp FDD
1	12,9	12,8	0,8	0,779	0,731
2	80,9	81,0	0,1	0,523	0,486
3	226,5	227,3	0,4	0,603	0,561
4	443,8	439,3	1,0	0,283	0,258

Qua kết quả nhận dạng tần số dao động riêng và tỉ số cản bằng phương pháp FDD và tiến hành so sánh tần số dao động riêng nhận dạng với mô hình phần tử hữu hạn (PTHH), so sánh kết quả nhận dạng tỉ số cản so với phương pháp EMA [10]. Kết quả sai số nhận dạng tần số dao động riêng là rất nhỏ điều đó cho thấy số liệu và phương pháp thực nghiệm, nhận dạng có độ tin cậy cao. Kết quả nhận dạng được các tỉ số cản tương ứng với tần số dao động riêng mà chỉ cần sử dụng số liệu đầu ra là phản ứng của kết cấu, sai số của kết quả nhận dạng tỉ số cản là không đáng kể so với phương pháp sử dụng cả đầu vào và đầu ra.

4. KẾT LUẬN

Bài báo tập trung nghiên cứu về phương pháp nhận dạng các đặc trưng dao động của kết cấu dầm thép (tần số dao động riêng, tỉ số cản) bằng phương pháp phân tích miền tần số (FDD), phương

pháp này chỉ cần sử dụng dữ liệu đầu ra là phản ứng của kết cấu (gia tốc) mà không cần dữ liệu đầu vào. Kết quả nhận dạng tần số dao động riêng có sai số rất nhỏ so với mô hình phần tử hữu hạn của kết cấu. Kết quả nhận dạng tỉ số cản bằng phương pháp này chênh lệch không đáng kể so với phương pháp sử dụng cả đầu vào và đầu ra để nhận dạng.

Tỉ số cản là tham số có độ nhạy cao khi nhận dạng và kết quả nhận dạng bằng thực nghiệm phụ thuộc nhiều vào tín hiệu đo và quá trình xử lý tín hiệu. Cần nghiên cứu, phân tích cụ thể các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình nhận dạng để nâng cao độ chính xác và tính ổn định khi nhận dạng tỉ số cản của kết cấu khi chỉ sử dụng số liệu đầu ra là phản ứng của kết cấu.

Việc nhận dạng chính xác các tham số động lực học của kết cấu chỉ sử dụng dữ liệu đầu ra có ý nghĩa quan trọng trong việc phân tích động lực học kết cấu và theo dõi sức khỏe kết cấu công trình và khả thi khi áp dụng đối với công trình thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Phạm Đình Ba, Nguyễn Tài Trung (2010), Động lực học công trình, NXB Xây dựng, Hà Nội.
- [2]. Rayleigh L. (1945), "The Theory of Sound", Vol.1, reprinted by Dover, New York, Originally published in 1877.
- [3]. Caughey TK (1960). "Classical normal modes in damped linear dynamic systems", Journal of Applied Mechanics, 27 (2), 269-271.
- [4]. Caughey TK, O'Kelly MEJ (1965), "Classical normal modes in damped linear dynamic systems", Journal of Applied Mechanics, 32 (3), 583-588. <https://doi.org/10.1115/1.3627262>.
- [5]. C. Rainieri, G. Fabbrocino: Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures, Springer, New York, (2014).
- [6]. Brincker R., Zhang L., Andersen P. (2001), Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition, Smart Mater. Struct.10, 441-445.
- [7]. Tạ Đức Tuấn, Lê Anh Tuấn, Vũ Đình Hương (2017), "Nhận dạng tần số dao động riêng của kết cấu bằng phương pháp kích động cưỡng bức", Tạp chí khoa học công nghệ Xây dựng, (số 1/2017).
- [8]. Trần Trung Đức, Lê Anh Tuấn, Vũ Đình Hương, Nguyễn Công Nghị (2020). "Identify the natural frequencies of structures by frequency domain decomposition method" - Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật - Chuyên san Kỹ thuật Công trình đặc biệt-Số 05 tháng 12/2020.
- [9]. Vũ Đình Hương, Lê Anh Tuấn (2014), "Nhận dạng ma trận cản nhớt từ hệ số cản nội ma sát phi đàn hồi của kết cấu", Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc, Kỷ niệm 35 năm thành lập Viện Cơ học, Tập 2, tr. 241-246.
- [10]. Vũ Đình Hương (2022), "Thực nghiệm nhận dạng ma trận cản nhớt Caughey và Rayleigh của kết cấu dầm thép", Tạp chí KHCN Xây dựng - số 2/2022, tr 12-20.