

Khảo sát thông số chuyển vị từ tín hiệu cảm biến đo gia tốc kết cấu dầm nhịp giản đơn

- Nguyễn Công Đức
- Trần Văn Một
- Phan Công Bàn
- Dương Lê Trường

Trường Đại học Xây dựng Miền Trung, Thành phố Tuy Hòa, Tỉnh Phú Yên

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày phương pháp phân tích tín hiệu từ cảm biến đo gia tốc dao động kết cấu công trình xây dựng có nhịp giản đơn để thu được thông số chuyển vị phục vụ cho công tác đánh giá khả năng chịu tải trọng của công trình. Phương pháp tích phân số tín hiệu cảm biến đo gia tốc dao động kết hợp sử dụng các bộ lọc thông thấp và thông cao, ứng dụng kỹ thuật wavelet trong xử lý nhiễu của tín hiệu và nén dữ liệu

từ các cảm biến đo chuyên dùng. Phương pháp đạo hàm số tín hiệu cảm biến đo chuyển vị loại biến áp vi sai biến đổi tuyến tính (LVDT) để dự đoán đáp ứng dao động kết cấu công trình. Phương pháp thực nghiệm đo thông số dao động và chuyển vị trên dầm liên kết giản đơn, số liệu thực nghiệm đo trên kết cấu công trình xây dựng thực tế chịu tác dụng tải trọng động được dùng để phân tích.

Từ khóa: Đo dao động; Phân tích phổ tần số dao động; Cảm biến đo gia tốc dao động; Cảm biến đo chuyển vị LVDT; tích phân số tín hiệu cảm biến gia tốc, đạo hàm số tín hiệu chuyển vị.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, việc đánh giá kiểm định kết cấu công trình xây dựng mới, chuẩn đoán và giám sát các hư hỏng và vết nứt của những kết cấu công trình xây dựng cũ tương đối phổ biến ở nước ta. Các thông số đo đặc như biến dạng, chuyển vị và dao động tích hợp trong các thiết bị điện tử có kết nối với máy tính thông qua phần mềm xử lý rất linh hoạt. Nguyên lý đo biến dạng bề mặt của kết cấu bê tông cốt thép, kết cấu thép tương đối đơn giản là chỉ việc dán các lá đo điện trở phù hợp lên các bề mặt cần đo hay sử dụng các bộ chuyển đổi đo biến dạng khác. Tương tự đối với thông số dao động ta có thể sử dụng cảm biến đo gia tốc dao động gắn trên bề

mặt kết cấu cần đo bằng cách sử dụng keo dán chuyên dùng.

Tuy nhiên với thông số chuyển vị phức tạp hơn nhiều, để sử dụng loại cảm biến đo chuyển vị loại biến áp vi sai biến đổi tuyến tính (**Linear Variable Displacement Transducer** viết tắt là LVDT) cần phải chuẩn bị một điểm tựa cố định và chắc chắn. Vấn đề này chỉ có thể thực hiện trong một vài trường hợp như: kết cấu nhịp cầu trên bờ (điểm tựa cố định là mặt đất), kết cấu móng cọc công trình (điểm tựa cũng là mặt đất). Khi kết cấu công trình vượt nhịp lớn nằm trên những địa hình mà việc lắp đặt hệ dàn giáo khó khăn để phục vụ công tác kiểm định thử tải. Kết cấu nhịp cầu vượt sông chỉ có thể lắp đặt hệ dàn

giáo treo và hầu như khó có thể tìm được một điểm tựa cố định để khảo sát thông số chuyển vị của kết cấu dưới tác dụng tải trọng tĩnh và động.



(a)



(b)

Hình 1. Các cảm biến đo dao động và chuyển vị gắn trên kết cấu công trình cầu nhịp gần bờ và nhịp giữa sông (a) Cầu Hùng Vương, Phú Yên; (b) Cầu Ông Cộ, Bình Dương

Công tác lắp dựng hệ dàn giáo cho toàn bộ không gian bên dưới nhịp cầu trên bờ để gắn các cảm biến đo biến dạng, chuyển vị và dao động một nhịp gần bờ (Cầu Hùng Vương, Phú Yên) trên hình 1.a, tùy theo số điểm đo (biến dạng, chuyển vị và dao động) và số lượng dầm trên một nhịp có thể bố trí số lượng dàn giáo cho phù hợp. Công việc này tương đối phức tạp và gây tốn kém không cần thiết khi thực hiện công tác kiểm định. Số lượng điểm đo càng nhiều mức độ đánh giá càng chính xác và mức độ tin cậy càng cao.

Tuy nhiên, công tác thử tải đối với nhịp nằm ở giữa sông đôi khi nằm trên cao việc tìm điểm cố định lắp hệ dàn giáo tương đối khó khăn và ảnh hưởng đến tiến độ thử tải. Phương án thay thế là lắp hệ dàn giáo treo để gắn cảm biến đo biến dạng và đo dao động một nhịp giữa sông (Cầu Ông Cộ, Bình Dương) trên hình 1.b. Điểm cố định trong trường hợp này chỉ có thể là 2 trụ của nhịp thử tải, nếu đặt vấn đề là sử dụng 2 điểm tựa cố định này để gắn cảm biến LVDT đo chuyển vị thì mức độ chính xác của số liệu đo, có thể nói rằng không đáng tin cậy vì mô và trục cũng có chuyển vị đứng, ngang và dọc. Công tác đánh giá thử tải, kiểm định công trình cầu gần như cũng phải khảo sát các thông số biến dạng, chuyển vị và dao động mô trụ cầu.

Một số giải pháp thay thế để khắc phục vấn đề khó khăn này, tùy thuộc vào phương án thử tải, hình dạng kết cấu cũng như vị trí của kết cấu công trình có thể sử dụng các loại thiết bị khác như: sử dụng cảm biến lazer, máy kinh vĩ, máy toàn đạc. Các loại thiết bị này cũng có một hạn chế nhất định đó là mức độ chính xác, sai số, tính linh động chưa cao nên việc sử dụng cho công tác kiểm định thử tải chưa nhiều.

Nghiên cứu này đề xuất phương pháp sử dụng dữ liệu cảm biến đo gia tốc dao động để vừa có thể phân tích thông số chuyển vị và vừa phân tích tần số dao động riêng và cường độ của kết cấu công trình.

Một số công trình nghiên cứu trên thế giới hiện nay cũng đã phân tích được vấn đề này, tuy nhiên đối tượng nghiên cứu, thí nghiệm và thử tải rất giới hạn. Nghiên cứu của nhóm tác giả Ki-Tae Park, Sang-Hyo Kim, Heung-Suk Park, Kyu-Wan Lee [1], đã trình bày cách thức đơn giản là tích phân rời rạc hóa dữ liệu cảm biến đo gia tốc dao động biến đổi thành thông số chuyển vị và vận tốc; xem chuyển vị ban đầu và vận tốc ban đầu bằng không. Nghiên cứu của nhóm tác giả X. Meng, A.H. Dodson, G.W. Roberts [2], đưa ra cách xác định độ võng bằng thiết bị GPS và kết

hợp với việc gắn thiết bị đo dao động làm cơ sở phân tích vấn đề. Các nghiên cứu khác liên quan đến việc tích phân số tín hiệu đo gia tốc dao động thành tín hiệu chuyển vị như: nghiên cứu của nhóm tác giả M. Gindy, R. Vaccaro, H.A. Nassif [7] và nghiên cứu của nhóm tác giả Junhee Kim, Kiyong Kim, Hoon Sohn [8].

Các công trình nghiên cứu trong nước chủ yếu về vấn đề phân tích phổ tần số của cảm biến đo gia tốc dao động, từ đó tính tần số dao động riêng và cường độ. Thông số chuyển vị thu được từ cảm biến đo chuyển vị LVDT khá phổ biến trong công tác kiểm định kết cấu công trình cầu theo tiêu chuẩn **22TCN 243:1998**. Thí nghiệm thử động biến dạng lớn (Pile Driving Analyzer viết tắt là PDA) cho các loại cọc. Thiết bị PDA này sử dụng cảm biến đo gia tốc dao động để tính toán vận tốc và chuyển vị dựa trên thuật toán wavelet, từ đó đánh giá chất lượng cọc và khả năng chịu tải trọng theo tiêu chuẩn ASTM D4945-08 và TCVN 9395:2012.

2. PHƯƠNG PHÁP TÍCH PHÂN SỐ TÍN HIỆU CẢM BIẾN GIA TỐC

a. Phương pháp tích phân số dữ liệu gia tốc dựa vào thuật toán Trapezoidal

Giả sử hàm tín hiệu gia tốc là một hàm theo thời gian, khi đó chúng ta có mối liên hệ giữa chuyển vị $x(t)$, vận tốc $v(t)$, gia tốc $a(t)$ được biểu diễn dưới dạng mối quan hệ giữa chuyển vị và gia tốc như sau:

$$x(t) = \int_{t=t_1}^{t=t_2} \int_{t=t_1}^{t=t_2} a(t) dt dt \quad (1)$$

Tuy nhiên dữ liệu tín hiệu trong nghiên cứu này là một tập dữ liệu rời rạc với N mẫu dữ liệu đo nên việc tích phân số cần rời rạc hóa như sau, [3]:

$$v_i = v_{i-1} + \frac{a_{i+1} + a_i}{2} \cdot (t_{i+1} - t_i); \quad (2)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Tương tự như vậy khi tích phân rời rạc dữ liệu tín hiệu vận tốc thành đáp ứng chuyển vị, [3]:

$$x_i = x_{i-1} + \frac{v_{i+1} + v_i}{2} (t_{i+1} - t_i); \quad (3)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

b. Phương pháp tích phân số tín hiệu gia tốc dựa vào phép biến đổi FFT

Giả thiết tín hiệu của cảm biến đo gia tốc dao động là một hàm theo thời gian khi đó ta có mối liên hệ giữa gia tốc, vận tốc và chuyển vị theo phân tích tần số (FFT) như sau:

Hàm chuyển vị :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{2\pi i f t} df \quad (4)$$

Hàm vận tốc:

$$v(t) = \dot{x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(f) e^{2\pi i f t} df \quad (5)$$

Hàm gia tốc:

$$a(t) = \ddot{x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{X}(f) e^{2\pi i f t} df \quad (6)$$

Từ (4) và (5), thiết lập mối liên hệ giữa chuyển vị là nguyên hàm bậc hai của gia tốc:

$$\begin{aligned}
x(t) &= \frac{d}{dt} \left[\dot{x}(t) \right] \\
&= \frac{d}{dt} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(f) e^{2\pi i f t} df \right] \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(f) \frac{d}{dt} \left[e^{2\pi i f t} \right] df \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} 2\pi i f \dot{X}(f) \frac{d}{dt} \left[e^{2\pi i f t} \right] df
\end{aligned} \quad (7)$$

Đổi chiều (7) với (6), ta có:

$$\ddot{X}(f) = 2\pi i f \dot{X}(f)$$

$$\text{Hay: } \dot{X}(f) = \frac{\ddot{X}(f)}{2\pi i f} = \frac{\ddot{X}(f)}{i\omega} \quad (8)$$

trong đó: f là dải tần số (Hz) của tín hiệu mở rộng từ $f = 0$ đến $f = \infty$; $\omega = 2\pi f$ - tần số (rad/s); $X(f)$ là biến đổi Fourier của hàm $x(t)$.

c. Phương pháp biến đổi wavelet trong xử lý nhiễu tín hiệu

Biến đổi wavelet thuận hàm liên tục, [9]:

$$\begin{aligned}
C(a, b) &= \int_R s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \\
a &\in R^+ - \{0\}, b \in R
\end{aligned} \quad (9)$$

trong đó: $C(a, b)$ là các hệ số biến đổi wavelet liên tục; $s(t)$ là hàm tín hiệu liên tục theo thời gian t (tín hiệu gia tốc hay tín hiệu chuyển vị); ψ là hàm phân tích wavelet; a là hệ số co giãn; b là hệ số dịch chuyển.

Biến đổi wavelet thuận dữ liệu rời rạc, [9]:

$$\begin{aligned}
C(a, b) &= \int_R s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \\
a &= 2^j, b = k2^j, (j, k) \in Z^2
\end{aligned} \quad (10)$$

trong đó: $C(a, b)$ là các hệ số biến đổi wavelet rời rạc; $s(t)$ là hàm tín hiệu dữ liệu rời rạc theo thời gian t (dữ liệu tín hiệu gia tốc hay tín hiệu chuyển vị); ψ là hàm phân tích wavelet.

Biến đổi wavelet ngược hàm liên tục, [9]:

$$s(t) = \frac{1}{K_\psi} \int_{R^+} \int_R C(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da db}{a^2} \quad (11)$$

với K_ψ là hệ số phụ thuộc vào hàm phân tích wavelet ψ .

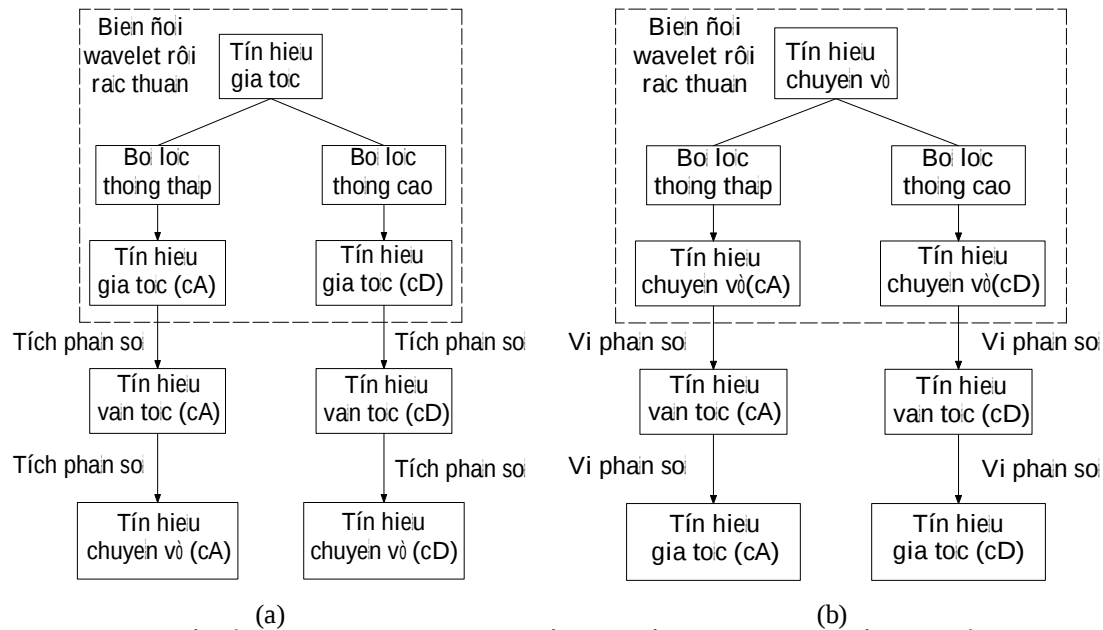
Biến đổi wavelet ngược hàm rời rạc, [9]:

$$s(t) = \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} C(j, k) \psi_{j,k}(t) \quad (12)$$

d. Quy trình tích phân số tín hiệu cảm biến đo gia tốc dao động và vị phân số tín hiệu cảm biến đo chuyển vị

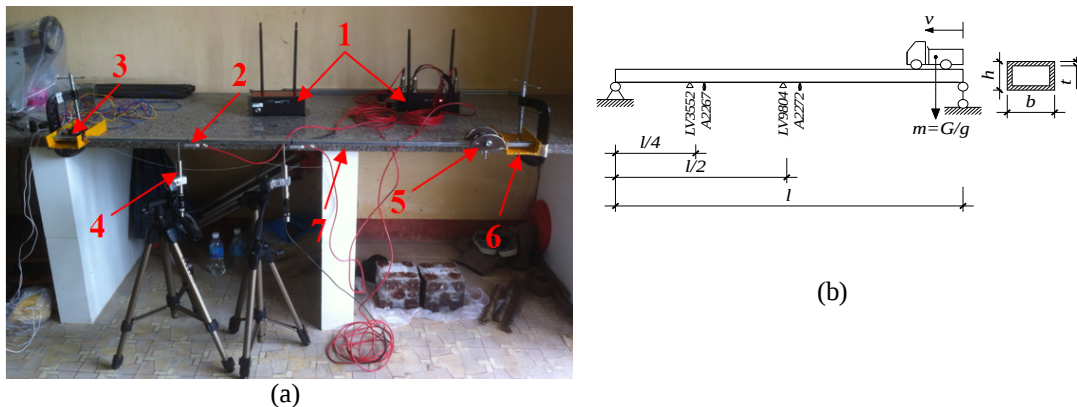
Quy trình sử dụng thuật toán biến đổi wavelet rời rạc thuận cho tín hiệu cảm biến đo gia tốc dao động và tín hiệu cảm biến đo chuyển vị, từ đây tích phân số tín hiệu gia tốc hình 2.a và vị phân số tín hiệu chuyển vị hình 2.b. Tín hiệu cảm biến đo gia tốc dao động và tín hiệu gia tốc từ việc vị phân số tín hiệu đo chuyển vị LVDT sẽ được phân tích phổ tần số để kiểm tra kết quả tần số dao động riêng và dao động cưỡng bức từ đó kiểm tra mức độ hội tụ kết quả, làm cơ sở cho việc đánh giá phép tích phân cũng như vị phân số.

Nghiên cứu này phân tích dữ liệu từ cảm biến đo gia tốc dao động và cảm biến đo chuyển vị LVDT thực nghiệm. Nhóm nghiên cứu sử dụng họ wavelet là Daubechies (db), một số họ wavelet khác cũng cho kết quả tương đối hiệu quả, tuy nhiên họ “db” cho kết quả khả quan hơn khi xét về mặt biên độ chuyển vị, biên độ dao động và ứng xử cơ học khi kết cấu chịu tác dụng của tải trọng di động.



Hình 2. Biến đổi wavelet rời rạc tín hiệu cảm biến đo gia tốc và tín hiệu cảm biến đo chuyển vị.
 (a) Tích phân số tín hiệu gia tốc thành chuyển vị; (b) Vi phân số tín hiệu chuyển vị thành gia tốc;
 cA là viết tắt của từ “approximation coefficients” là thành phần xấp xỉ; cD là viết tắt của từ “details coefficients” là thành phần chi tiết.

3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM



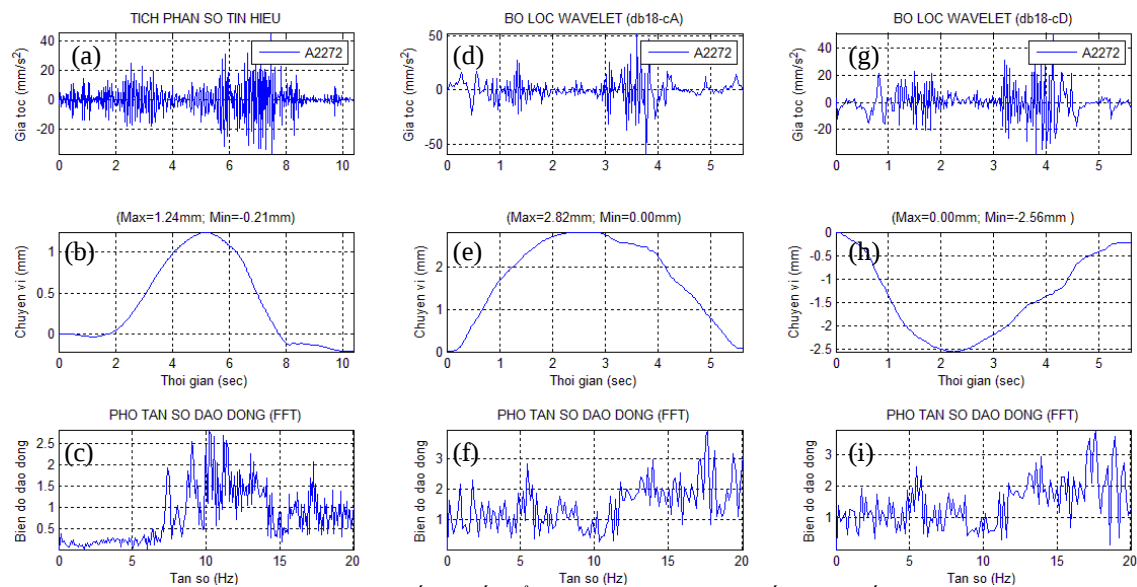
Hình 3. Mô hình thí nghiệm gắn cảm biến đo chuyển vị và đo gia tốc dao động
 (a) Các thiết bị đo sử dụng trong thí nghiệm; (b) Mô hình dầm thép tựa đơn 2 đầu chịu tác dụng tải trọng di chuyển ($l=1320\text{mm}$; $m=2\text{kg}$; $h=13\text{mm}$, $b=27\text{mm}$, $t=2\text{mm}$, $v=100\text{mm/s}$; $g=9.81\text{m/s}^2$). Các thiết bị thí nghiệm gồm: (1) Bộ thiết bị thu và phát tín hiệu đo truyền vào máy tính; (2) Cảm biến đo gia tốc dao động; (3) Động cơ kéo tải trọng di động công suất nhỏ; (4) Cảm biến đo chuyển vị LVDT; (5) Bộ chất tải di động được kéo nhờ động cơ; (6) Hệ gối tựa cố định; (7) Dầm thép trong thí nghiệm.

Thí nghiệm đầm liên kết giản đơn chịu tải trọng di động sử dụng các cảm biến đo chuyển vị (mã số cảm biến: LV9804 và LV3552); cảm biến đo gia tốc dao động (mã số cảm biến A2272 và A2267) gắn ở vị trí giữa nhịp ứng với dao động của dạng dao động riêng thứ 1, và gắn ở vị trí 1/4 nhịp ứng với dao động của dạng dao động riêng thứ 2. Hệ thống thiết bị thu nhận tín hiệu STS-WiFi (của hãng BDI, Mỹ) và phần mềm thu nhận tín hiệu đo WinSTS3 (Phòng Thí nghiệm chuyên ngành xây dựng, Trường ĐHXD Miền Trung: LAS-XD 162) được sử dụng để tiến hành thí nghiệm đo trên hình 3.a và mô hình đầm gắn các cảm biến đo tại các vị trí trên hình 3.b.

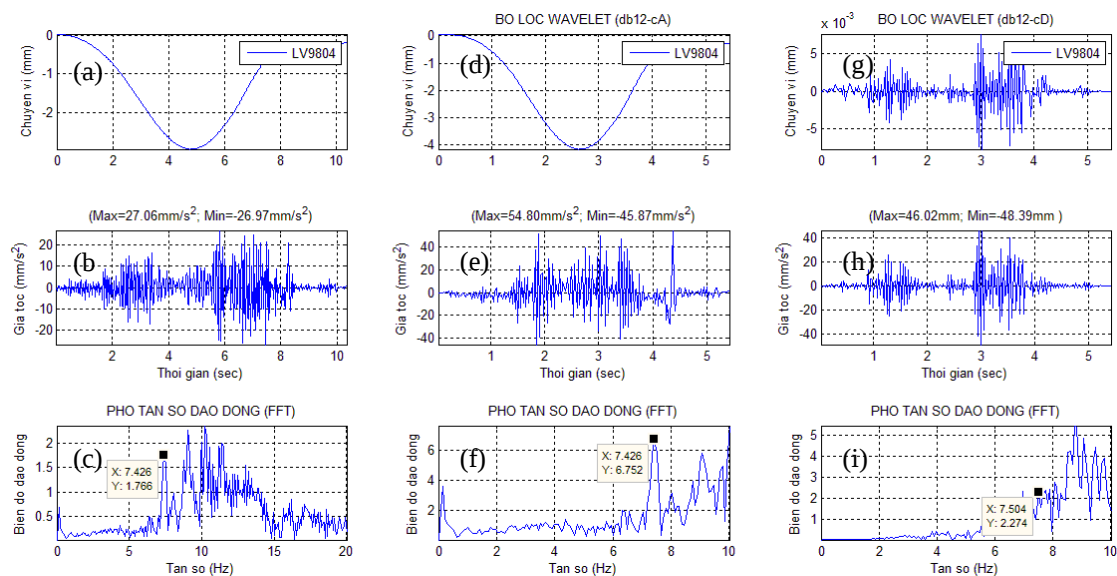
Đồ thị tín hiệu từ cảm biến đo gia tốc dao động A2272 hình 4.a. Phương pháp tích phân số tín hiệu cảm biến đo gia tốc theo quy trình thông thường với chuyển vị và vận tốc ban đầu bằng không trên hình 4.b với giá trị biên độ là 1.24mm. Hình 4.d và 4.e là kết quả từ việc lọc tín hiệu bằng cách sử dụng biến đổi wavelet họ db18 với hệ số cA, biên độ chuyển vị sau khi phân tích là 2.82mm. Phân tích wavelet họ db18 với hệ số cD của tín hiệu cảm biến đo gia tốc này có biên độ chuyển vị là -2.56mm trên hình 4.h, với kết quả này có thể nhận xét về mặt trực quan ứng xử kết cấu dưới tác dụng của tải trọng động và so sánh với kết quả thực nghiệm từ cảm biến đo chuyển vị LV9804 là -2.94mm. Các hình 4.c, 4.f và 4.i là các đồ thị phân tích phổ tần số dao động cưỡng bức và dao động riêng tương ứng với các đồ thị tín hiệu đo gia tốc ở các cột tương ứng.

Kết quả phân tích wavelet đã lọc bỏ những dải tần số nhiễu do nhiều nguyên nhân như: gối tựa, ma sát giữa xe tạo tải trọng động và đầm khi xe chạy. Đồ thị của cảm biến đo chuyển vị thực nghiệm và đồ thị tín hiệu chuyển vị từ việc biến đổi wavelet và tích phân số cho thấy kết quả tương đối tin cậy về mặt ứng xử cơ học khi đầm thép nhịp giản đơn chịu tác dụng tải trọng di động. Nghiên cứu này đã sử dụng nhiều bộ lọc khác nhau như: bộ lọc thông thấp, bộ lọc thông cao, bộ lọc dải tần số, và một số bộ lọc phổ biến khác để loại bỏ nhiễu nhưng không hiệu quả. Biến đổi wavelet thực hiện đối với tín hiệu cảm biến đo gia tốc cho kết quả tương đối khả quan và có nhiều tiềm năng ứng dụng đối với vấn đề nghiên cứu này. Kết quả phân tích wavelet họ db có khả năng ứng dụng cho vấn đề này, chủ yếu với họ từ db10 trở lên, với họ db thấp khả năng phân tích kết quả còn nhiều hạn chế.

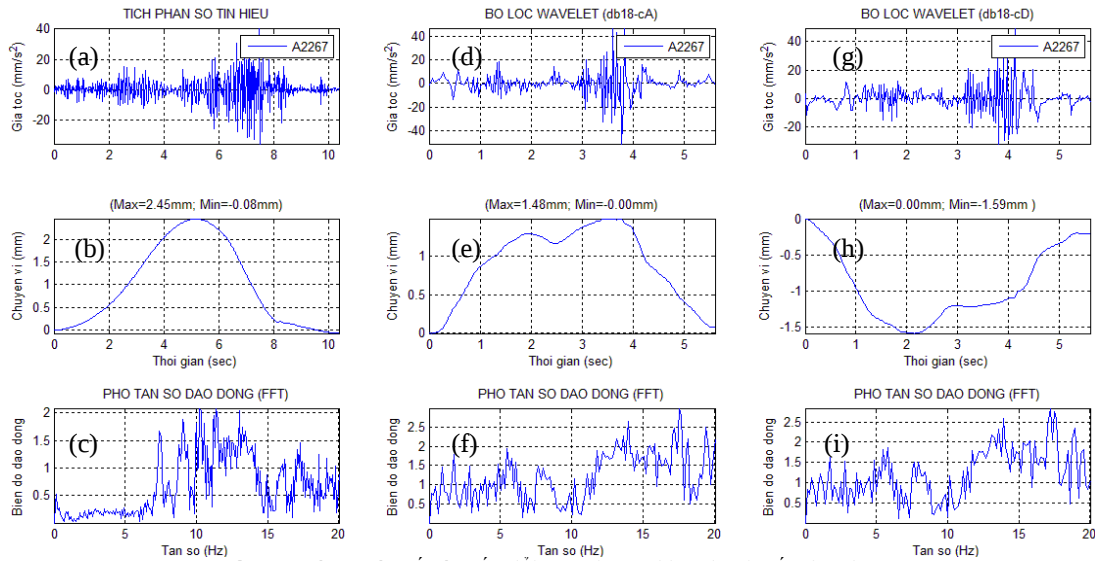
Hình 5.a là đồ thị tín hiệu cảm biến đo chuyển vị LV9804. Biến đổi tín hiệu đo chuyển vị này được kết quả hình 5.d và thực hiện phép vi phân số tín hiệu của cảm biến đo chuyển vị thành thành tín hiệu đo gia tốc dao động. Đồ thị này có biên độ lớn nhất $+54.80\text{mm/s}^2$ và nhỏ nhất là -45.87mm/s^2 , trên hình 5.e và hình 5.f là kết quả phân tích phổ tần số dao động. Đồ thị hình 5.g là phân tích nhiễu tín hiệu của cảm biến đo chuyển vị và đồ thị phân tích phổ tần số tín hiệu này trên hình 5.i. Biến đổi wavelet với họ db12 với các hệ số cA cho kết quả về biên độ dao động so với kết quả thực nghiệm từ cảm biến đo gia tốc A2272 trên hình 4.a.



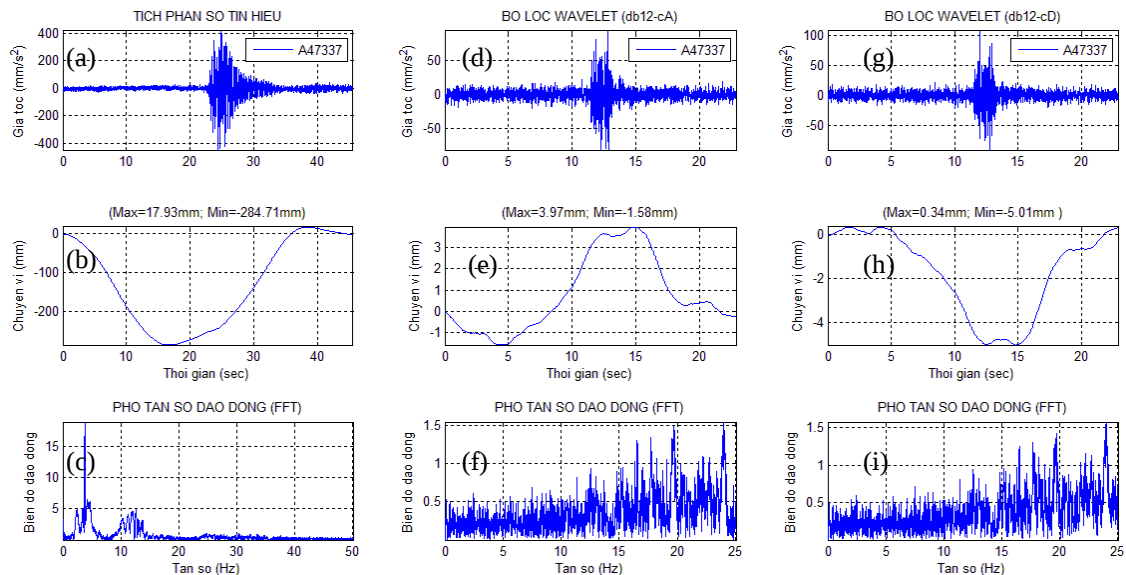
Hình 4. Tích phân số và biến đổi wavelet tín hiệu cảm biến đo gia tốc dao động thành tín hiệu chuyển vị giữa nhịp



Hình 5. Biến đổi vị phân số và biến đổi wavelet tín hiệu cảm biến đo chuyển vị thành tín hiệu đáp ứng gia tốc dao động giữa nhịp



Hình 6. Tích phân số và biến đổi wavelet tín hiệu đo gia tốc dao động thành tín hiệu chuyển vị tại vị trí 1/4 nhịp



Hình 7. Tín hiệu cảm biến đo gia tốc dao động ở giữa nhịp cầu Ông Cộ, Bình Dương, 2009

Đồ thị trên hình 6 cũng thực hiện phân tích qua bộ lọc sử dụng phép biến đổi wavelet cho tín hiệu cảm biến đo gia tốc dao động A2267. Biến đổi wavelet họ db18 với các hệ số cD trên hình 6.g và sau đó tiến hành tích phân số với đồ thị hình 6.h. Đồ thị trong 3 hình 6.c; hình 6.f và

hình 6.i là đồ thị phân tích phổ tần số của tín hiệu đo dao động tương ứng.

Hình 7.a là đồ thị tín hiệu cảm biến đo gia tốc dao động A47337 ở giữa nhịp cầu Ông Cộ, Bình Dương (2009). Hình 7.g là đồ thị tín hiệu sau biến đổi wavelet với họ db12-cD. Đồ thị 7.h

là kết quả sau khi tích phân số tín hiệu cảm biến đo dao động thành tín hiệu chuyển vị, kết quả chuyển vị là -5.01mm.

4. KẾT LUẬN

Phương pháp phân tích wavelet và xử lý tích phân số tín hiệu từ cảm biến đo gia tốc dao động để từ đó phân tích thông số chuyển vị thông qua bộ hiệu chỉnh này. Đây là một thông số quan trọng trong việc đánh giá khả năng chịu tải của kết cấu công trình. Kết quả từ việc đo thông số chuyển vị và dao động sử dụng các loại cảm biến chuyên dùng qua đó làm cơ sở so sánh và phân tích. Phương pháp thực nghiệm của mô hình đã trình bày và từ đồ thị tín hiệu đo theo thời gian cho thấy việc phân tích tín hiệu chuyển

vị từ tín hiệu cảm biến đo gia tốc dao động là hoàn toàn khả thi và có thể thực hiện được. Tuy nhiên không phải loại tải trọng động nào hay bất kỳ phương pháp thử động nào cũng có thể thực hiện công việc này thành công, nghiên cứu chỉ thực hiện trong không gian hẹp đó là các tải trọng động di chuyển trên kết cấu nhịp giản đơn có thể dầm thép hoặc dầm bê tông cốt thép dự ứng lực. Tải trọng tác dụng này có thể kiểm soát chứ không phải là tải trọng ngẫu nhiên, và vận tốc của tải trọng di động là luôn luôn không đổi trong suốt quá trình chạy trên kết cấu dầm mô hình cần thử nghiệm. Nghiên cứu tiếp tục triển khai cho các vấn đề như tải trọng động ngẫu nhiên và các loại kết cấu khác nhau sẽ được thí nghiệm trong những nghiên cứu tiếp theo.

An experimental investigation of the displacement response on acceleration signal of single-span steel beam

- Nguyen Cong Duc
- Tran Van Mot
- Phan Cong Ban
- Duong Le Truong

MienTrung University of Civil Engineering

ABSTRACT

The displacement responses can be obtained by numerical double intergration of accelerometer sensors which are used to measure vibration of the single-span steel beam. Application of wavelet transform to analyze acceleration and displacement

signals, in which the beam is subjected to live-load. In the research, the results from the experimental displacements are presented and compared to the estimated displacements.

Keywords: displacement sensor, accelerometer, vibration analysis, fast fourier transform, wavelet transform, frequency spectrum.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. D.M. Boore, Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America 91 (2001) 1199–1211.
- [2]. Sangbo Han ,Retrieving the time history of displacement from measured acceleration signal, KSME International Journal, Volume 17, Issue 2 , pp 197-206 (2003).
- [3]. Ki-Tae Park, Sang-Hyo Kim, Heung-Suk Park, Kyu-Wan Lee. The Determination of Bridge Displacement Using Measured Acceleration, Engineering Structures 27 (2005) 371-378.
- [4]. X. Meng, A.H. Dodson, G.W. Roberts. Detecting Bridge Dynamics with GPS and Triaxial Accelerometers, Engineering Structures 29 (2007) 3178-3184.
- [5]. Yoshimi OHTA , Omer AYDAN. An Integration Technique for Ground Displacement from Acceleration Records and its Application to Actual Earthquake Records, Journal of The School of Marine Science and Technology, Tokai University, Vol5, No2, pp.1-12, 2007.
- [6]. Jin-Hak Yi, Soojin Cho, Ki-young Koo, Chung-Nang Yun, Jeong-Tae Kim, Chang-Geun Lee, Won-Tae Lee. Bridge using Ambient Acceleration Measurements, Smart Structures and System, Vol.3, No.3 (2007) 281-298.
- [7]. M. Gindy, R. Vaccaro, H.A. Nassif, State-space approach for deriving bridge displacement from acceleration, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 23 (2008) 281–290
- [8]. Junhee Kim , Kiyoun Kim, Hoon Sohn, Autonomous dynamic displacement estimation from data fusion of acceleration and intermittent displacement measurements, Mechanical Systems and Signal Processing 42 (2014) 194–205.
- [9]. Daubechies, I., *Ten lectures on wavelets*, CBMS-NSF conference series in applied mathematics. SIAM Ed (1992).