

Ứng xử động lực học của dầm thép chữ I thẳng có bản bụng lượn sóng hình thang gồ tựa đơn chịu khối lượng di động

Nguyễn Hồng Ân¹, Đào Minh Tiến

¹ Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Quốc gia TP.HCM

TỪ KHOÁ

Khối lượng di động
Warping
Lực Coriolis
Lực hướng tâm
Dầm chữ I có bản bụng lượn sóng hình thang

KEYWORDS

Moving mass
Warping
Coriolis force
Centripetal force
Trapezoidal web corrugations i-girder

TÓM TẮT

Ứng xử động lực học của dầm thép chữ I thẳng có bản bụng lượn sóng hình thang chịu khối lượng di động được phân tích trong bài báo này. Vật mang khối lượng chuyển động trên dầm được mô hình như một phần tử vật chuyển động. Do vật di chuyển dọc theo độ võng của dầm nên ngoài trọng lực còn có các lực thành phần như lực quán tính, lực Coriolis, lực hướng tâm của vật chuyển động ảnh hưởng đến ứng xử động của dầm. Trong nghiên cứu này, phần tử dầm I thẳng bản bụng lượn sóng hình thang mặt cắt ngang một trục đối xứng được thành lập dựa trên lý thuyết dầm cong thành mỏng mặt cắt ngang hai trục đối xứng của Kang and Yoo. Mỗi nút phần tử có bảy bậc tự do bao gồm cả một bậc tự do warping. Sử dụng các công thức phần tử hữu hạn, hàm dạng N , ma trận khối lượng tương thích M_e , ma trận độ cứng đàn hồi phần tử K_e . Từ đó, ngôn ngữ lập trình Matlab được sử dụng để phân tích động lực học cho dầm I bản bụng lượn sóng hình thang gồ tựa đơn chịu khối lượng di động. Nghiên cứu sẽ được kiểm tra trong trường hợp dầm chữ I có bản bụng lượn sóng hình thang suy biến thành dầm I phẳng thông thường. Kết quả sẽ được so sánh với các nghiên cứu trước đó.

ABSTRACT

Dynamic analysis is known as important in performing the behavior analysis of structures. The moving mass that is travelling on the beam was modelled as a moving finite element in order to include inertial effects beside gravitation force of mass. Since the mass moves along the deflected curved of the beam, these effects are, respectively, the centripetal force, the inertia force, and the Coriolis force components of the moving mass. In this study, the straight steel I-girder element with trapezoidal web corrugations and singly symmetric cross-section is formed based on the Kang and Yoo's thin-walled curved beam with doubly symmetric cross-section theory. Each element node has seven degrees of freedom including warping. The shape function N , the elastic element stiffness matrix K_e and mass matrix M_e are also shown by using the Finite Element Method (FEM). Then, a MATLAB code was developed for dynamic analysis of simply supported steel I-girders with trapezoidal web corrugations due to moving mass. The accuracy of proposed equations is also examined in case that steel I-girders with trapezoidal web corrugations degenerate into flat webs I-girders. Its results are then compared with previous studies

1. Giới thiệu

Dầm thép chữ I thông thường được sử dụng trong các công trình xây dựng dân dụng – công nghiệp và giao thông có nhược điểm là độ cứng chống xoắn kém, dễ bị cong vênh, khả năng chịu xoắn ngoài mặt phẳng kém, dẫn tới dễ bị mất ổn định ngoài mặt phẳng. Để khắc phục các nhược điểm đó, từ đầu những năm 1960 tại châu Âu các nhà khoa học đã đề xuất dầm thép chữ I với bản bụng lượn sóng. Có nhiều dạng lượn sóng của bản bụng khác nhau, chẳng hạn có dạng lượn sóng hình sin, nhưng dạng lượn sóng hình thang đang được sử dụng phổ biến (Abbas HH [1]), trong tương lai chắc chắn chúng sẽ được du nhập rộng rãi vào Việt Nam.

Sở dĩ các dầm chữ I có bản bụng lượn sóng hình thang được ưu tiên trong ứng dụng là vì chúng có nhiều ưu điểm như: Việc sử dụng dầm I có bản bụng lượn sóng hình thang là một phương pháp tối ưu để

đạt được độ cứng ngoài mặt phẳng và khả năng chống cắt. nhờ có bản bụng lượn sóng mà các dầm chữ I này cải thiện được đặc tính ổn định cắt (shear stability) và chống lại hiện tượng mỏi khi chịu tải trọng lặp tốt hơn so với dầm chữ I bản bụng phẳng thông thường, Abbas HH [1]. Ngoài ra, nhờ các bản bụng lượn sóng mà tăng thêm tính thẩm mỹ cho kết cấu.

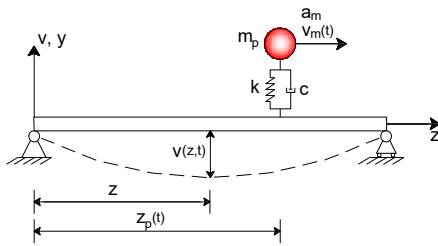
Mặc dù có nhiều ưu điểm và cũng đã được ứng dụng thực tế nhưng hầu hết các tính toán đều dựa vào các công thức của dầm I có bản bụng phẳng do thiếu các thông tin về ứng xử phức tạp của nó. Vì thế các ưu điểm được trình bày ở trên của dầm I có bản bụng lượn sóng hình thang vẫn chưa được tận dụng một cách triệt để. Từ các nhận định như đó, bài toán phân tích ứng xử của dầm thép I có bản bụng lượn sóng hình thang chịu tải trọng động, đặc biệt có xét đến khối lượng vật di động là một bài toán thực tiễn và có ý nghĩa khoa học.

Trong nghiên cứu này, phần tử dầm I có bản bụng lượn sóng hình thang được xây dựng dựa vào lý thuyết dầm cong thành mỏng mặt cắt ngang hai trục đối xứng của Kang và Yoo [2;3]. Hàm dạng N , ma trận khối lượng tương thích M_e , ma trận độ cứng đàn hồi phần tử K_e được thiết lập từ các công thức phần tử hữu hạn. Vật mang khối lượng chuyển động trên dầm được mô hình như một phần tử vật chuyển động có khối lượng và lực quán tính. Ma trận khối lượng, độ cứng, cân tổng thể của hệ tại từng thời điểm có kể đến ma trận khối lượng, độ cứng, cân của vật chuyển động. Tiến hành thực hiện các bài toán phân tích được xây dựng dựa trên ngôn ngữ lập trình Matlab để khảo sát ảnh hưởng của các đại lượng đến phản ứng động của bài toán.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Mô hình dầm chữ I có bản bụng lượn sóng hình thang gối tựa đơn chịu khối lượng di động

Mô hình dầm chữ I có bản bụng lượn sóng hình thang gối tựa đơn chịu khối lượng di động được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm vật tròn có khối lượng m_p , chuyển động từ đầu trái đến cuối đầu phải dầm với vận tốc $v_m(t)$, và gia tốc không đổi a_m .

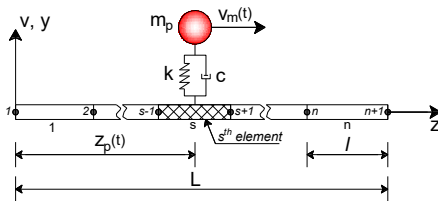


Hình 1. Dầm tựa đơn có vật di động với vận tốc $v_m(t)$.

Phương trình dao động của dầm tựa đơn chịu vật chuyển động được mô tả như sau [4]:

$$EI \frac{\partial^4 v(z,t)}{\partial z^4} + \mu \frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial t^2} + 2\mu\omega_b \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} = P \left[(z - z_p, t) \right] - m_p (z - z_p, t) \left(\frac{d^2 v(z_p, t)}{dt^2} \right) \tag{1}$$

Dầm được rời rạc từng phần tử và phần tử dầm thứ s mang vật chuyển động với vận tốc $v(t)$ tại thời điểm t . Mỗi nút của phần tử s có 4 lực nút và 4 chuyển vị (bao gồm một bậc tự do warping). Vị trí của vật chuyển động trong tọa độ tổng thể $z_p(t)$, vị trí địa phương của vật chuyển động là $z_m(t)$. Dầm có n phần tử và $(n + 1)$ nút.



Hình 2. Rời rạc phần tử dầm mang vật chuyển động.

Giá trị tức thời $z_m(t)$ và s được xác định như sau [4]:

$$z_m(t) = z_p(t) - (s-1)l; \tag{2}$$

$$s \text{ lấy phần nguyên } (z_p(t)/l) + 1, s = (1 \div n) \tag{3}$$

Khi dầm dao động, lực quán tính gây ra bởi vật chuyển động [4]:

$$f_y(z,t) = \left[m_p g - m_p \frac{d^2 v(z_p, t)}{dt^2} \right] \delta(z - z_p) \tag{4}$$

$$\text{Với: } z_p = z_0 + v_0 t + \frac{a_m t^2}{2}; \frac{dz_p}{dt} = v_0 + a_m t; \frac{d^2 z_p}{dt^2} = a_m \tag{5}$$

Trong đó: $f_y(z,t)$ là lực quán tính do vật chuyển động tại z , thời điểm t ; $\delta(z - z_p)$, g là hàm Dirac-delta và gia tốc trọng trường; z_0, v_0 là vị trí ban đầu và vận tốc ban đầu vật chuyển động tại $t=0$; a_m là gia tốc vật chuyển động.

Để xét ảnh hưởng quán tính của vật chuyển động thì gia tốc $d^2 v(z_p, t) / dt^2$ được tính toán từ phương trình vi phân bậc hai tổng thể của hàm $v_y(z,t)$ với biến t và z [4]:

$$\frac{d^2 v_y(z_p, t)}{dt^2} = \frac{\partial^2 v_y(z, t)}{\partial t^2} + 2 \frac{\partial^2 v_y(z, t)}{\partial z \partial t} \frac{dz_p}{dt} + \frac{\partial^2 v_y(z, t)}{\partial z^2} \left(\frac{dz_p}{dt} \right)^2 + \frac{\partial v_y(z, t)}{\partial z} \frac{d^2 z_p}{dt^2} \tag{6}$$

Thay (4) vào (5) và rút gọn ta được:

$$f_y(z,t) = m_p \left[\ddot{v}_y + 2(v_0 + a_m t) \dot{v}'_y + (v_0 + a_m t)^2 v''_y + a_m v'_y + g \right] \delta(z - z_p) \tag{7}$$

Trong đó: $m_p \ddot{v}_y$ là lực quán tính; $m_p [(v_0 + a_m t)^2 v''_y + a_m v'_y]$ là lực hướng tâm; $m_p 2(v_0 + a_m t) \dot{v}'_y$ là lực Coriolis; $m_p g$ là lực trọng trường.

Cân bằng lực nút và chuyển vị nút, ta có các ma trận khối lượng, ma trận độ cứng, ma trận cân của phần tử vật chuyển động:

$$m = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 & m_{15} & m_{16} & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 & m_{25} & m_{26} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{34} & 0 & 0 & m_{37} & m_{38} \\ 0 & 0 & m_{43} & m_{44} & 0 & 0 & m_{47} & m_{48} \\ m_{51} & m_{52} & 0 & 0 & m_{55} & m_{56} & 0 & 0 \\ m_{61} & m_{62} & 0 & 0 & m_{65} & m_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{73} & m_{74} & 0 & 0 & m_{77} & m_{78} \\ 0 & 0 & m_{83} & m_{84} & 0 & 0 & m_{87} & m_{88} \end{bmatrix} \tag{8-a}$$

$$\text{Với: } m = m_p \times N_{out} \times N_{out} \tag{8-b}$$

$$k = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 & 0 & k_{15} & k_{16} & 0 & 0 \\ k_{21} & k_{22} & 0 & 0 & k_{25} & k_{26} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{51} & k_{52} & 0 & 0 & k_{55} & k_{56} & 0 & 0 \\ k_{61} & k_{62} & 0 & 0 & k_{65} & k_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{8-c}$$

$$\text{Với: } k = m_p \times [v(t)^2 \times N_{out} \times N_{out}'' + a_m \times N_{out} \times N_{out}'] \tag{8-d}$$

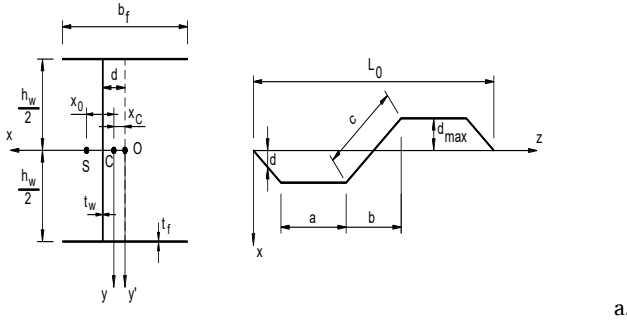
$$c = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & c_{15} & c_{16} & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 & 0 & c_{25} & c_{26} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{51} & c_{52} & 0 & 0 & c_{55} & c_{56} & 0 & 0 \\ c_{61} & c_{62} & 0 & 0 & c_{65} & c_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{8-e}$$

Với: $c = 2m_p \times v(t) \times N_{out} \times N'_{out}$ (8-f)

Với $v(t) = v_0 + a_m t$, m, c, k là các ma trận khối lượng, ma trận cản, ma trận độ cứng của phần tử vật chuyển động. Vị trí $z_p(t)$ của vật chuyển động m_p thay đổi theo thời gian vì thế các ma trận khối lượng, ma trận cản, ma trận độ cứng thay đổi theo thời gian. Bên cạnh đó, ma trận cản và ma trận độ cứng có chứa biến vận tốc $v(t)$.

2.2. Phần tử dầm chữ I bản bụng lượn sóng hình thang

2.2.1. Đặc trưng mặt cắt ngang của dầm chữ I bản bụng lượn sóng hình thang



Mặt cắt ngang b. Mặt cắt dọc bước lượn sóng

Hình 3. Mặt cắt ngang và mặt cắt dọc một bước lượn sóng của dầm chữ I bản bụng lượn sóng hình thang.

Ta thấy, x_0 và $I_{y\omega}$ phụ thuộc vào d , I_y và I_ω phụ thuộc vào d^2 . Giá trị d thay đổi trong khoảng $d=0$ và $d=d_{max}$ nên các đại lượng phụ thuộc vào d ở trên cũng thay đổi. Như vậy, các đại lượng $x_0, I_{y\omega}, I_y$ và I_ω được tính toán gần đúng như sau [5]:

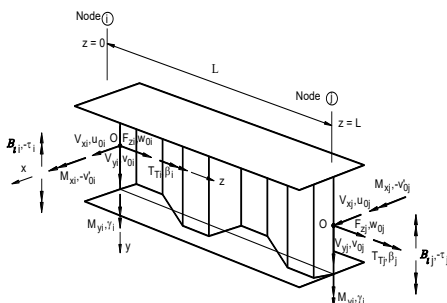
$$x_0 = \frac{4t_f b_f d_{max} (t_w h_w + 3t_f b_f)}{(t_w h_w + 2t_f b_f)(t_w h_w + 6t_f b_f)} \quad (9)$$

$$I_{y\omega} = \frac{h_w^2 t_f b_f d_{max} (t_w h_w + 3t_f b_f)}{3(t_w h_w + 2t_f b_f)} \quad (10)$$

$$I_y = \frac{t_f b_f (2t_f b_f^3 + t_w h_w b_f^2 + 4d_{max}^2 t_w h_w)}{6(t_w h_w + 2t_f b_f)} \quad (11)$$

$$I_\omega = \frac{t_f b_f h_w^2}{6} \left[\frac{d_{max}^2 (8t_f b_f + 3t_w h_w)(t_w h_w + 6t_f b_f)}{3(t_w h_w + 2t_f b_f)^2} + \frac{b_f^2}{4} \right] \quad (12)$$

2.2.2. Lực nút và chuyển vị nút của dầm chữ I bản bụng lượn sóng hình thang



Hình 4. Lực nút và chuyển vị nút tương ứng.

Các thành phần chuyển vị $u, v,$ và w tương ứng trục x, y và z . Các thành phần nội lực: $F_z, M_y, M_x, B_i, T_T, V_x, V_y$, tương ứng lực dọc, moment uốn theo phương x , moment uốn theo phương y , bimoment, moment xoắn, lực cắt theo phương x , lực cắt theo phương y (Hình 4). Hai thành phần lực cắt V_x, V_y có mối quan hệ với moment uốn M_y, M_x theo công thức:

$$V_x = -M_y'; V_y = -M_x' \quad (13)$$

Một nút có 7 nội lực $F_z, M_y, M_x, B_i, T_T, V_x, V_y$ tương ứng với 7 chuyển vị $w_0, \gamma, -v_0', -\tau, \beta, u_0, v_0$. Trong đó, w_0, γ, u_0 là chuyển vị trong mặt phẳng; trong khi đó $-v_0', -\tau, \beta, v_0$ là chuyển vị ngoài mặt phẳng. Mỗi nút của phần tử có bảy bậc tự do bao gồm bậc tự do warping.

2.2.3. Công thức phần tử hữu hạn của dầm chữ I bản bụng lượn sóng hình thang

Công thức phần tử hữu hạn của dầm chữ I có bản bụng lượn sóng hình thang được trình bày dựa trên Kang và Yo (1994) [2;3]. Trong đó: N, K_e, M_e, C tương ứng là hàm hình dạng, ma trận độ cứng đàn hồi, ma trận khối lượng tương thích và ma trận cản phần tử.

2.2.3.1. Hàm dạng

$$N = \begin{bmatrix} N_{(1 \times 4)}^{uu} & 0 \\ 0 & N_{(1 \times 2)}^{ww} \\ 0 & N_{(2 \times 8)}^{out} \end{bmatrix} \quad (14-a)$$

$$N^{uu} = \begin{bmatrix} 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 & L(\xi - 2\xi^2 + \xi^3) \\ 3\xi^2 - 2\xi^3 & L(-\xi^2 + \xi^3) \end{bmatrix} \quad (14-b)$$

$$N^{ww} = \begin{bmatrix} 1 - \xi & \xi \end{bmatrix} \quad (14-c)$$

$$N^{out} = \begin{bmatrix} H_3 & H_1 & 0 & 0 & H_4 & H_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_3 & H_1 & 0 & 0 & H_4 & H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{out1} \\ N_{out2} \end{bmatrix} \quad (14-d)$$

Với:

$$H_1 = \frac{\alpha_1 L - e^{2\alpha_1 L} + \alpha_1 L e^{2\alpha_1 L} + 1}{H_5} - \frac{e^{\alpha_1 z} (\alpha_1 L - e^{\alpha_1 L} + 1)}{H_5} + \frac{z(e^{\alpha_1 L} - 1) - e^{\alpha_1 L} e^{(-\alpha_1 z)} (\alpha_1 L e^{\alpha_1 L} - e^{\alpha_1 L} + 1)}{H_6} \quad (14-d1)$$

$$H_2 = -\frac{2\alpha_1 L e^{\alpha_1 L} - e^{2\alpha_1 L} + 1}{H_5} + \frac{e^{\alpha_1 z} (\alpha_1 L e^{\alpha_1 L} - e^{\alpha_1 L} + 1)}{H_5} + \frac{z(e^{\alpha_1 L} - 1) - e^{\alpha_1 L} e^{(-\alpha_1 z)} (\alpha_1 L - e^{\alpha_1 L} + 1)}{H_6} \quad (14-d2)$$

$$H_3 = \frac{\alpha_1 L - e^{\alpha_1 L} + \alpha_1 L e^{\alpha_1 L} + 1}{H_6} + \frac{e^{\alpha_1 z}}{H_6} - \frac{e^{\alpha_1 L} e^{(-\alpha_1 z)}}{H_6} - \frac{z(\alpha_1 + \alpha_1 e^{\alpha_1 L})}{H_6} \quad (14-d3)$$

$$H_4 = -H_3 + \frac{\alpha_1 L - 2e^{\alpha_1 L} + \alpha_1 L e^{\alpha_1 L} + 2}{H_6} \quad (14-d4)$$

$$H_5 = 2\alpha_1 - 4\alpha_1 e^{\alpha_1 L} + 2\alpha_1 e^{2\alpha_1 L} + \alpha_1^2 L - \alpha_1^2 L e^{2\alpha_1 L} \quad (14-d5)$$

$$H_6 = \alpha_1 L - 2e^{\alpha_1 L} + \alpha_1 L e^{\alpha_1 L} + 2 \quad (14-d6)$$

$$\xi = z / L \tag{14-d7}$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{EI_x GK_T}{EI_x EI_\omega - (EI_{y\omega})^2}} \tag{14-d8}$$

2.2.3.2. Ma trận độ cứng đàn hồi phần tử dầm chữ I bản bụng lượn sóng hình thang

$$K_e = \begin{bmatrix} K_{e(4 \times 4)}^u & & 0 \\ & K_{e(2 \times 2)}^w & \\ 0 & & K_{e(8 \times 8)}^{out} \end{bmatrix} \tag{15-a}$$

$$K_{ej}^u = EI_y \int_L N_{ui}'' N_{uj}'' dz \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \tag{15-b}$$

$$K_{ej}^w = EA \int_L N_{wi}' N_{wj}' dz \quad i, j = 5, 6 \tag{15-c}$$

$$K_{ej}^{out} = EI_x \int_L N_{out1i}'' N_{out1j}'' dz + EI_{y\omega} \int_L (N_{out1i}'' N_{out2j}'' + N_{out1j}'' N_{out2i}'') dz + EI_\omega \int_L N_{out2i}'' N_{out2j}'' dz + GK_T \int_L N_{out2i}' N_{out2j}' dz; \quad i, j = 7, \dots, 14 \tag{15-d}$$

2.2.3.3. Ma trận khối lượng tương thích phần tử dầm chữ I bản bụng lượn sóng hình thang

$$M_e = \begin{bmatrix} M_{e(4 \times 4)}^u & & 0 \\ & M_{e(2 \times 2)}^w & \\ 0 & & M_{e(8 \times 8)}^{out} \end{bmatrix} \tag{16-a}$$

$$M_{ej}^u = \rho A \int_L N_{ui} N_{uj} dz + \rho I_y \int_L N_{ui}' N_{uj}' dz \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \tag{16-b}$$

$$M_{ej}^w = \rho A \int_L N_{wi} N_{wj} dz \quad i, j = 5, 6 \tag{16-c}$$

$$M_{ej}^{out} = \rho A \int_L \left[N_{out1i} N_{out1j} - x_0 (N_{out1i} N_{out2j} + N_{out1j} N_{out2i}) \right] dz + \rho I_y \int_L N_{out2i} N_{out2j} dz + \rho I_x \int_L (N_{out2i} N_{out2j} + N_{out1i}' N_{out1j}') dz + \rho I_\omega \int_L (N_{out1i}' N_{out2j}' + N_{out1j}' N_{out2i}') dz + \rho I_\omega \int_L N_{out2i}' N_{out2j}' dz \quad i, j = 7, 8, \dots, 14 \tag{16-d}$$

2.2.4. Ma trận cản tổng thể

Ma trận cản tổng thể của dầm được tính toán từ lý thuyết Rayleigh [4]:

$$C = a \times M(t) + b \times K(t) \tag{17}$$

$$\text{Với: } a = \frac{2\omega_1\omega_2(\psi_1\omega_2 - \psi_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}; \tag{18}$$

$$b = \frac{2(\psi_2\omega_2 - \psi_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \tag{19}$$

Hệ số a, b thay đổi theo thời gian và phụ thuộc vào sự thay đổi của tần số tự nhiên ω_1, ω_2 của dầm tại mỗi bước thời gian.

2.3. Phương trình chuyển động cân bằng của toàn hệ

Theo phương pháp phần tử hữu hạn, phương trình cân bằng chuyển động của dầm nhiều bậc tự do, có cản được viết dưới dạng ma trận sau:

$$M(t)\ddot{z}(t) + C(t)\dot{z}(t) + K(t)z(t) = F(t) \tag{20}$$

$M(t), C(t), K(t)$ tương ứng với ma trận khối lượng, cản, độ cứng tổng thể tức thời của hệ;

$\ddot{z}(t), \dot{z}(t), z(t)$ tương ứng với vectơ gia tốc, vectơ vận tốc, vectơ chuyển vị;

$F(t)$ tương ứng vectơ ngoại lực tổng thể tức thời của hệ tại thời điểm t.

Vectơ lực tổng thể tức thời của kết cấu cũng phụ thuộc vào thời gian, các phần tử của vectơ lực tổng thể bằng 0 ngoại trừ lực nút của phần tử dầm thứ s đang mang vật chuyển động.

$$F(t) = [0 \dots f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4 \quad f_5 \quad f_6 \quad f_7 \quad f_8 \dots 0]^T \tag{21}$$

$$f_{si} = m \times g \times N_i; (i = 1 \div 8) \tag{22}$$

Trong đó: $N_i (i = 1 \div 8)$ là hàm hình dạng tương tự như các công thức (14-d).

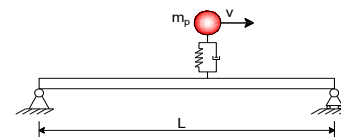
Phương trình vi phân chuyển động được giải bằng phương pháp Newmark được thiết lập bằng phương pháp phần tử hữu hạn được xây dựng trên chương trình Matlab.

3. Ví dụ khảo sát

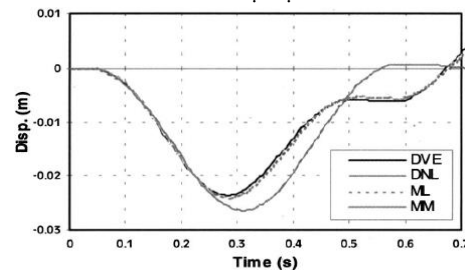
3.1. Kiểm chứng chương trình tính

Trước khi phân tích ứng xử động của dầm chữ I có bản bụng lượn sóng hình thang chịu khối lượng di động, bài báo tiến hành khảo sát một ví dụ số nhằm kiểm chứng độ tin cậy của chương trình được viết bằng ngôn ngữ lập trình Matlab, kết quả sẽ được so sánh với kết quả của tác giả khác đã được công bố.

Bài toán kiểm chứng được thực hiện với dầm thẳng tựa đơn với các thông số bài toán theo Tso-Chien Pan et al [6]: Dầm có kích thước hình học và tính chất vật liệu như sau: $L = 11,68 \text{ m}$, $EI = 1,72 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, khối lượng dầm trên một đơn vị chiều dài $\mu = 3105 \text{ kg/m}$, tỷ số cản $c1 = c2 = 0,02$, gia tốc trọng trường $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, vật tròn chuyển động có khối lượng $m_p = 8900 \text{ kg}$, chuyển động với vận tốc $v = 68,4 \text{ km/h}$, dầm được chia làm 30 phần tử và chọn bước thời gian $\Delta t = 0,005 \text{ s}$. Kết quả sẽ được so sánh với kết quả nghiên cứu trước đó khi dầm I có bản bụng lượn sóng hình thang suy biến thành dầm I thẳng thông thường ($D_{max} = 0$).

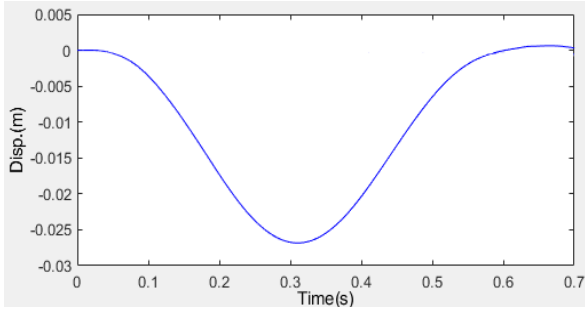


Hình 5. Sơ đồ chịu lực của dầm.



Hình 6. Kết quả chuyển vị tại giữa nhịp của.

Tso-Chien Pan et al [6].



Hình 7. Kết quả chuyển vị tại giữa nhịp của nghiên cứu.

Nhận xét: Kết quả chuyển vị lớn nhất của dầm tại điểm tương tác được thể hiện trong hình 6 và hình 7 của nghiên cứu trong trường hợp vận tốc không đổi thì khá trùng khớp với kết quả của Tso-Chien Pan et al [6]. Sai số giữa hai kết quả là nhỏ, chênh lệch giá trị chuyển vị lớn nhất giữa hai kết quả là $(0,02674 - 0,0260)/0,0260 = 2,8\%$. Do đó, có thể kết luận rằng phương pháp của bài báo và chương trình Matlab có độ tin cậy cao và có thể sử dụng để giải các bài toán của của nghiên cứu này.

3.2. Bài toán khảo sát

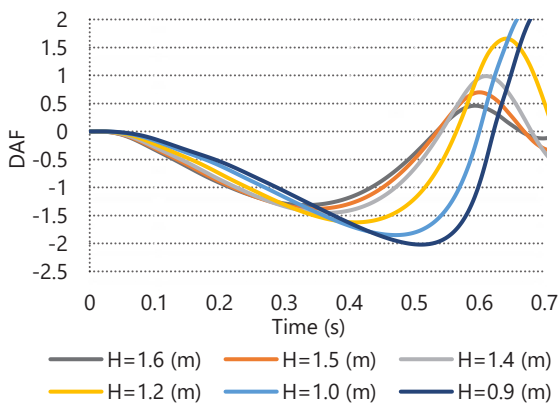
Tiếp theo, bài báo tiến hành khảo sát thêm một số bài toán khác nhằm phân tích rõ hơn ảnh hưởng của khối lượng di động lên dao động của dầm chữ I bản bụng lượn sóng hình thang gối tựa đơn với các thông số tải trọng sau: vật có khối lượng $m_p = 8900$ kg, $v = 19$ m/s, $E = 3.0 \times 10^9$ N/m². Dầm được chia làm 30 phần tử, phương pháp Newmark được dùng để phân tích bài toán dao động của dầm, chọn hai hệ số tích phân Newmark $\alpha = 1/2$, $\beta = 1/4$, chọn bước thời gian $\Delta t = 0,005$ s. Để tiếp tục quá trình nghiên cứu, bài toán được chia thành các trường hợp khảo sát:

3.2.1. Khảo sát ảnh hưởng của chiều cao dầm

Bảng 1.

Thay đổi theo chiều cao dầm.

Dmax (m)	Chiều cao dầm H (m)					
	0,02	1,6	1,5	1,4	1,2	1,0



Hình 8. Biểu đồ biến thiên DAF theo chiều cao dầm H.

Nhận xét: Hệ số động chuyển vị (DAF) thường được định nghĩa là tỷ lệ giữa chuyển vị động lớn nhất với chuyển vị tĩnh lớn nhất.

Từ đồ thị hình 8, cho thấy rằng với cùng một giá trị Dmax, khi giảm chiều cao dầm thì hệ số động chuyển vị (DAF) càng tăng.

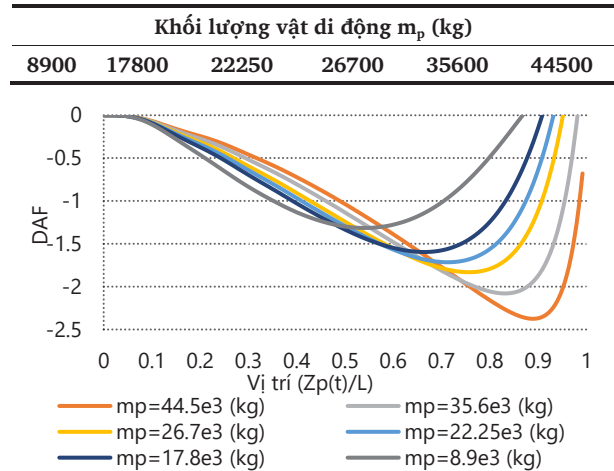
Giá trị cực đại không nằm tại chính giữa dầm mà có xu hướng dịch chuyển về phía bên phải, cùng chiều với chiều chuyển động. Điều này có thể được giải thích do ảnh hưởng hiệu ứng của bài toán động, trong trường hợp này cụ thể là ảnh hưởng của vận tốc và khối lượng vật chuyển động.

Hệ số động chuyển vị tỉ lệ nghịch với chiều cao dầm. Khi tăng chiều cao dầm gấp 1,5 lần từ 1,0 m ÷ 1,5 m, hệ số động chuyển vị giảm 25,37 %.

3.2.2. Khảo sát ảnh hưởng của khối lượng vật di động

Bảng 2.

Thay đổi khối lượng vật chuyển động.



Hình 9. Biểu đồ biến thiên DAF theo khối lượng vật chuyển động.

Nhận xét: Theo đồ thị hình 9, cho thấy rằng khi khối lượng vật chuyển động càng lớn thì hệ số động chuyển vị cũng càng lớn. Điều này xảy ra do khối lượng của vật chuyển động tỷ lệ thuận với lực quán tính, lực hướng tâm cũng như trọng lực tác dụng lên dầm. Do đó kết quả tính là phù hợp với lý thuyết về động lực học.

Do ảnh hưởng của bài toán động nên giá trị cực đại không nằm ở giữa dầm mà có xu hướng dịch chuyển về phía bên phải, cùng chiều với chiều chuyển động.

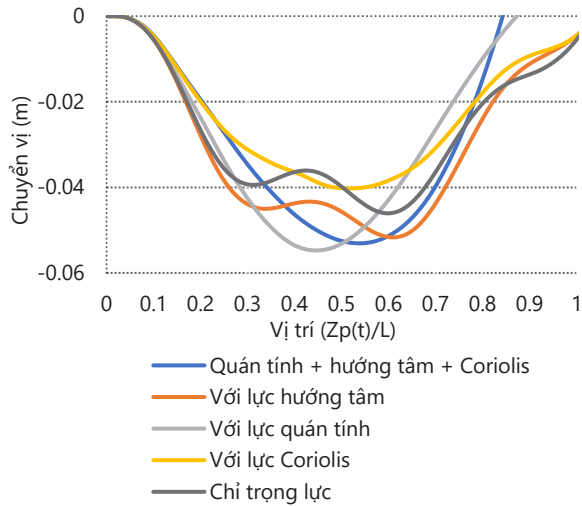
Hệ số động chuyển vị quan hệ tỉ lệ thuận với khối lượng vật chuyển động.

3.2.3. Khảo sát ảnh hưởng của các thành phần lực do vật chuyển động gây ra: trọng lực, lực quán tính, lực Coriolis, lực hướng tâm

Bảng 3.

Các thông số tiết diện dầm khảo sát.

H _{dầm} (m)	B _f (m)	t _f (m)	t _w (m)	Dmax (m)	a _m (m/s ²)
1,6	0,4	0,035	0,015	0,02	2,0



Hình 10. Biểu đồ biểu diễn quan hệ giữa các thành phần lực với chuyển vị lớn nhất.

Nhận xét: Theo đồ thị hình 10, cho thấy rằng trong các lực thành phần thì lực quán tính có xu hướng làm cho chuyển vị tăng lên (tăng 15,7 %), lực hướng tâm cũng có xu hướng làm cho chuyển vị tăng lên (tăng 10,8 %), còn lực Coriolis có xu hướng làm cho chuyển vị nhỏ lại (giảm 12,6 %) so với chỉ có trọng lực.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày các cơ sở lý thuyết về phần tử dầm chữ I có bản bụng lượn sóng hình thang và mô hình vật mang khối lượng chuyển động trên dầm. Phần tử này đảm bảo độ tin cậy và chứng tỏ sự hợp lý trong việc xác định ứng xử động lực học của dầm chữ I bản bụng lượn sóng hình thang dưới tác dụng của khối lượng di động. Ảnh hưởng của sự thay đổi chiều cao dầm, khối lượng vật chuyển động và sự ảnh hưởng của các thành phần lực do vật chuyển động gây ra trên dầm đã được khảo sát một cách chi tiết. Kết quả cho thấy thông số khối lượng và sự ảnh hưởng của các thành phần lực ảnh hưởng đáng kể đến chuyển vị của dầm: lực quán tính và lực hướng tâm có xu hướng làm cho chuyển vị của dầm tăng lên, trong khi lực Coriolis làm cho chuyển vị của dầm nhỏ lại.

Trong việc tính toán thiết kế dầm (dưới ảnh hưởng của khối lượng di động) thì khi xét thêm ảnh hưởng của lực Coriolis làm cho nội lực dầm nhỏ hơn dẫn đến tiết kiệm vật liệu hơn. Mặt khác nếu ta không xét hai thành phần lực quán tính và lực hướng tâm thì làm cho bài toán thiết kế trở nên nguy hiểm và mất độ an toàn hơn.

Tài liệu tham khảo

[1] Abbas HH, *Analysis and design of corrugated web I-girders for bridges using high performance steel*, Ph.D. dissertation, Lehigh University, Bethlehem, Pa, 2003.

[2] Kang YJ, Yoo CH. *Thin-walled curved beams. I: formulation of nonlinear equations*. J Eng Mech Div 1994; 120(EM10):2072–101.

[3] Kang YJ, Yoo CH. *Thin-walled curved beams. II: analytical solutions for buckling of arches*. J Eng Mech Div 1994; 120(EM10):2102–25.

[4] Ismail Esen, *Dynamic response of beam due to an accelerating moving mass using moving finite element approximation*, Mathematical and Computational Applications, vol. 16, no. 1, pp 171-182.

[5] Ngoc Duong Nguyen, Sung Nam Kim, Seung-Ryong Han, Young-Jong Kang, *Elastic lateral-torsional buckling strength of I-girder with trapezoidal web corrugations using a new warping constant under uniform moment*, Engineering Structures 32 (2010) 2157–2165.

[6] Tso-Chien Pan et al., *Dynamic vehicle element method for transient response of coupled vehicle-structure systems*. Structural Engineering, 2002, 128: 214–223.