

NGHIÊN CỨU ĐÁP ỨNG ĐỘNG CỦA HỆ DÀM CONG - DÂY - TẤM CHỊU TÁC DỤNG CỦA KHỐI LƯỢNG DI ĐỘNG

STUDY THE DYNAMIC RESPONSE OF A CURVED BEAM - WIRE - PLATE
SYSTEM SUBJECTED TO MOVING MASS

Lê Xuân Thùy

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

TÓM TẮT

Nghiên cứu trình bày kết quả phân tích động lực học hệ liên hợp dầm cong – dây – tấm mô tả hình dạng cầu vòm chịu tác dụng của khối lượng di động. Quá trình phân tích đáp ứng của hệ được thực hiện trên cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH), khối lượng di động được mô phỏng nhờ kỹ thuật phần tử Sinh – Diệt với việc sử dụng ngôn ngữ lập trình ANSYS APDL cho phép khảo sát ảnh hưởng của các thông số kết cấu, tải trọng đến đáp ứng động của hệ. Kết quả nghiên cứu là tài liệu tham khảo khi tính toán thiết kế kết cấu cầu và các kết cấu chịu tác dụng của tải trọng di động khác.

Từ khóa: Cầu vòm; Dầm cong; Khối lượng di động; Phần tử sinh – diệt; ANSYS.

ABSTRACT

This paper presents the results of dynamic analysis of the curved beam-wire-plate system describing the shape of an arch bridge under the influence of moving mass. The process of analyzing the response of the system is carried out on the basis of the finite element method. The moving mass is simulated using the Birth and Dead element technique with the use of the ANSYS APDL programming language for allowing to investigate the influence of structural parameters and loads on the dynamic response of the system. The research results are reference documents when calculating the design of bridge structures and other structures affected by moving loads.

Keywords: Arch bridge; Curved beam; Moving mass; Birth and dead element; ANSYS.

1. MỞ ĐẦU

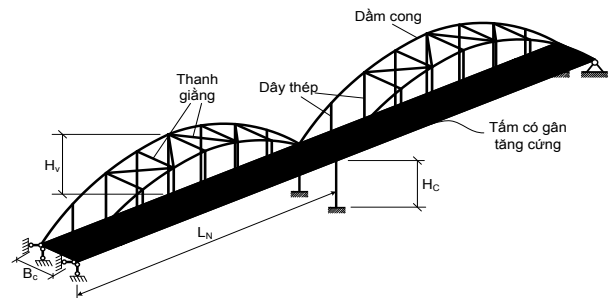
Trong thiết kế các công trình cầu giao thông, ngoài việc phải đảm bảo kết cấu phải chịu được tải trọng cho phép, việc đảm bảo tính thẩm mỹ của công trình cũng là một trong những yếu tố quan trọng cần được xem xét. Do vậy, trong thực tế, khi triển khai các ý tưởng thiết kế khác nhau, việc thay đổi hình dạng, kích thước kết cấu thường xuyên được thực hiện. Lấy ý tưởng từ việc tính toán kết cấu cầu vòm, trong nghiên cứu này, các tác giả hướng đến việc giải quyết bài toán tính toán hệ liên hợp dầm cong – dây – tấm chịu tác dụng của khối lượng di động. Việc xây dựng chương trình tính toán được thiết lập trên nền ngôn ngữ lập trình ANSYS APDL chạy trên phần mềm ANSYS. Với chương trình thiết lập, người tính toán có thể dễ dàng thay đổi kích thước kết cấu cũng như tải trọng, tùy biến để giải quyết nhiều lớp bài toán khác nhau.

Bài toán kết cấu chịu tác dụng của tải trọng di động không phải là một bài toán quá mới, đã có nhiều công trình công bố liên quan nhóm bài toán này với những cách tiếp cận khác nhau: Wen-Yu He và cộng sự [1], Zhang [2], Ahmad M. [3], C. Johansson [4], Ladislav Frysba [5]; Trong bài báo này, trên cơ sở phương pháp PTHH, tác giả sử dụng kỹ thuật phần tử Sinh – Diệt và phần mềm ANSYS để mô phỏng khối lượng di động tác dụng lên kết cấu và xem xét đáp ứng động của hệ. Kết quả bài báo là nền tảng để hướng đến giải quyết các bài toán phức tạp hơn cả về tải trọng tác dụng và kết cấu.

2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN

Xét hệ liên hợp dầm cong – dây – tấm như hình 1. Hệ gồm tấm có gân tăng cứng gắn với dầm cong thông qua các dây cáp và liên kết

ngàm tại đầu dầm. Các dầm cong được nối với nhau nhờ các thanh giằng. Phía dưới tấm là hai cột thẳng đứng có nhiệm vụ đỡ hệ tấm – dầm cong. Ngoài trọng lượng bản thân, tải trọng tác dụng lên hệ là khối lượng m di chuyển dọc theo chiều dài tấm.



Hình 1. Mô hình hệ dầm cong – dây – tấm

3. PHƯƠNG PHÁP PTHH VÀ GIẢI THUẬT PHẦN TỬ SINH DIỆT

Quá trình phân tích đáp ứng động của hệ được thực hiện trên cơ sở phương pháp PTHH, đặc biệt, tải trọng di động được mô phỏng nhờ phân kỹ thuật phần tử Sinh – Diệt.

Phương trình vi phân chuyển động của hệ [6,7]:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{R\}$$

Trong đó, $\{q\}, \{\dot{q}\}, \{\ddot{q}\}$ lần lượt là véc tơ chuyển vị, vận tốc, gia tốc nút của hệ;

$$[M] = \sum_e \left([M^e] + [M_p^e] \right),$$

$$[K] = \sum_e \left([K^e] + [K_p^e] \right),$$

$$[C] = \sum_e \left([C^e] + [C_p^e] \right), [R] = \sum_e \{P(t)\}_e$$

Tương ứng là ma trận khối lượng tổng thể, ma trận độ cứng tổng thể, ma trận cản tổng thể của hệ và véc tơ ngoại lực nút tổng

thể của hệ. Ma trận cản của kết cấu được xác định thông qua các hằng số cản Rayleigh: $[C]_e = \alpha[M]_e + \beta[K]_e$, trong đó, các hằng số cản Rayleigh được xác định thông qua tỷ số cản ξ và hai tần số dao động riêng đầu tiên ω_1, ω_2 của kết cấu. Các đại lượng $[M_p^e], [C_p^e], [K_p^e]$ tương ứng là thành phần ma trận khối lượng, ma trận cản, ma trận độ cứng sinh ra do khối lượng m chuyển động với các thành phần vận tốc và gia tốc $\dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}$ trên phần tử tám.

Tận dụng tối đa kỹ thuật giải bài toán theo phương pháp PTHH trong phần mềm ANSYS, tác giả lập trình giải bài toán đặt ra với việc sử dụng ngôn ngữ APDL và sử dụng các dạng phần tử khác nhau để mô phỏng kết cấu:

Để mô tả tấm chịu uốn, các tác giả sử dụng phần tử SHELL63, đây là phần tử vỏ tứ giác 4 điểm nút, mỗi nút có 6 bậc tự do $u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}$. Với phần tử SHELL63, ta có thể mô tả cho kết cấu tấm, vỏ có độ dày thay đổi. Tải trọng tác dụng có thể là tải cơ, nhiệt.

Kết cấu dầm cong, thanh giằng, cột và các dầm đỡ được mô tả bởi phần tử dầm BEAM188 có 2 nút, mỗi nút 6 bậc tự do. Đây là phần tử rất đa năng với khả năng mô tả kết cấu thanh với nhiều loại mặt cắt ngang khác nhau tương ứng mỗi lựa chọn Sectype, điều này cho phép người tính toán thử nghiệm với kết cấu có những dạng mặt cắt ngang khác nhau chỉ với việc điều chỉnh một vài câu lệnh trong chương trình.

Dây cáp được mô tả nhờ phần tử link10. Phần tử này có 2 nút, mỗi nút có 3 chuyển vị thẳng là u_i, v_i, w_i . Phần tử LINK10 với lựa chọn keyopt(3) có giá trị 0 hoặc 1 tương ứng với phần tử chỉ chịu kéo hoặc chịu nén. Lựa chọn keyopt(3) = 0, ta có mô tả phần tử đúng với tính chất chịu tải của dây cáp.

Khối lượng di động được mô phỏng bởi phần tử khối lượng MASS21, phần tử này được đặt vào mọi vị trí mà tải trọng di động đi qua. Kỹ thuật phần tử Sinh – Diệt được áp dụng với nhóm phần tử MASS21 này. Quy tắc hoạt động của kỹ thuật sinh diệt này như sau:

1) Tất cả các phần tử MASS21 trên quỹ đạo di chuyển của khối lượng di động được diệt đi (kill - inactive phần tử).

2) Tùy thuộc vào vận tốc và thời gian xét, phần tử MASS21 tương ứng vị trí có mặt của khối lượng di động được active, sau khi khối lượng di động đi qua, phần tử lại được inactive.

Thuật toán này được cụ thể hóa bằng ngôn ngữ APDL trong ANSYS.

4. KHẢO SÁT SỐ

Thông số mô hình tính: Chiều dài nhịp $L_N = 50\text{m}$, hệ có 2 nhịp, bề rộng tấm $B_C = 8\text{m}$, chiều dày tấm $t_h = 0,3\text{m}$, chiều cao đỉnh vòm so với mặt tấm $H_v = L_N/5$. Dầm cong và các thanh giằng nối dầm cong hai bên nhịp được làm từ thép mặt cắt ngang hình vành khăn, thứ tự thông số kích thước mặt cắt ngang: Đường kính ngoài $D_v = 0,3\text{m}$, $D_{th} = 0,15\text{m}$, bề dày $t_{hv} = 0,05\text{m}$, $t_{htg} = 0,04\text{m}$. Từ các dầm cong ở hai bên mỗi nhịp, nối 7 đoạn dây cáp với khoảng cách chia đều đến tấm theo phương thẳng đứng, các dây cáp có đường kính $D_c = 0,08\text{m}$. Vị trí nối dầm cong và tấm (ở chính giữa tấm) được đỡ bởi các cột có chiều cao $H_c = 10\text{m}$, kích thước mặt cắt ngang $a \times a = 1,0\text{m} \times 1,0\text{m}$. Nối hai đỉnh của hai cột chống giữa tấm và 2 góc tấm (theo kích thước B_C) là dầm chính có kích thước mặt cắt ngang $H_{dc} \times B_{dc} = 0,8\text{m} \times 0,5\text{m}$; Nối giữa vị trí nối các dây cáp với tấm là dầm phụ có kích thước $H_{dp} \times B_{dp} = 0,4\text{m} \times 0,2\text{m}$, các dầm chính

và dầm phụ này liên kết chặt với tấm với vai trò các gân tăng cứng (hình 1).

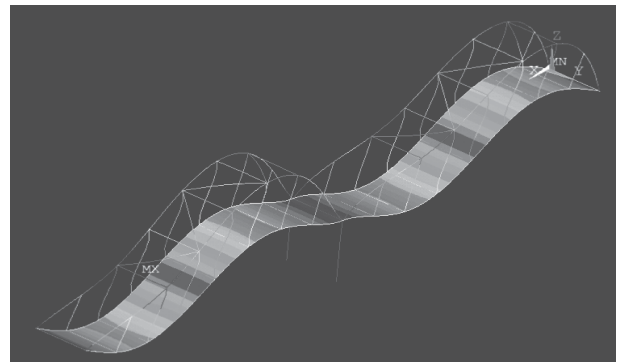
Thông số vật liệu: Vật liệu làm tấm, các dầm đỡ và cột: Mô đun đàn hồi $E_1 = 2,9.10^{10} \text{ N/m}^2$, hệ số poisson $\mu_1 = 0,18$, khối lượng riêng $\rho_1 = 2500 \text{ kg/m}^3$. Vật liệu làm dầm cong và thanh giằng: $E_2 = 2,1.10^{11} \text{ N/m}^2$, $\mu_2 = 0,28$, $\rho_2 = 7850 \text{ kg/m}^3$. Vật liệu làm dây cáp: $E_3 = 2,5.10^{11} \text{ N/m}^2$, $\mu_3 = 0,3$, $\rho_3 = 7850 \text{ kg/m}^3$.

Thông số tải trọng: Trọng lượng bản thân hệ P_{bt} tác dụng lên mỗi phần tử (lấy gia tốc trọng trường $g = 9,8 \text{ m/s}^2$); Khối lượng M di động tác dụng lên hệ kết cấu có giá trị $M = 10^4 \text{ kg}$ di chuyển dọc chiều dài từ đầu phải qua đầu trái, chính giữa tấm với vận tốc 30 km/giờ .

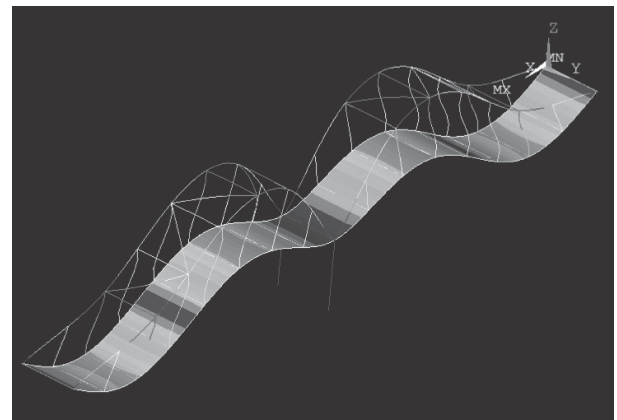
Giải bài toán dao động riêng, các tác giả thu được các tần số dao động riêng đầu tiên của hệ và dạng riêng tương ứng như hình 2.

Giải bài toán dao động cưỡng bức với khối lượng di động M tác dụng, tác giả lấy thời gian tính là $T_t = T_0 + 2s$, với T_0 là thời gian tải trọng đi hết quãng đường 2 nhịp dầm cong. Điểm xuất kết quả: Điểm A: Chính giữa dầm nổi 2 cột giữa 2 nhịp; điểm B: Chính giữa tấm trong nhịp bên phải; điểm C: Chân cột gần phía

người quan sát; vị trí nổi dây cáp dài nhất trên 2 nhịp với tấm mô phỏng mặt cầu (xuất lực căng dây cáp).



a) Dạng riêng thứ nhất



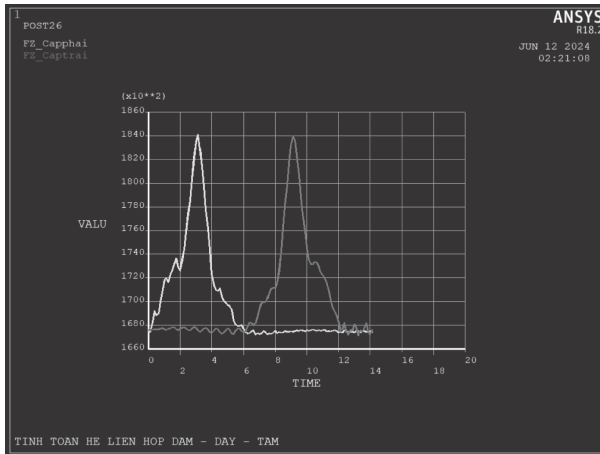
b) Dạng riêng thứ hai

Hình 2. Các dạng riêng đầu tiên của hệ kết cấu ($f_1 = 0,9558 \text{ Hz}$, $f_2 = 0,9962 \text{ Hz}$)

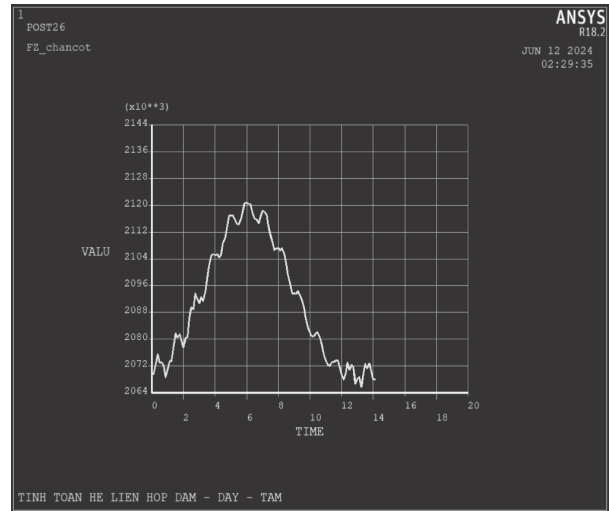
Bảng 1. Giá trị cực trị đáp ứng tại điểm tính:

	$W_A^{\max} [\text{cm}]$	$W_B^{\max} [\text{cm}]$	$F_{\text{Cap}}^{\text{Phai max}} [\text{N}]$	$F_{\text{Cap}}^{\text{trai max}} [\text{N}]$	$F_z^{\text{C max}} [\text{N}]$
Giá trị	0,162	6,922	184087	183945	$2,1207.10^6$

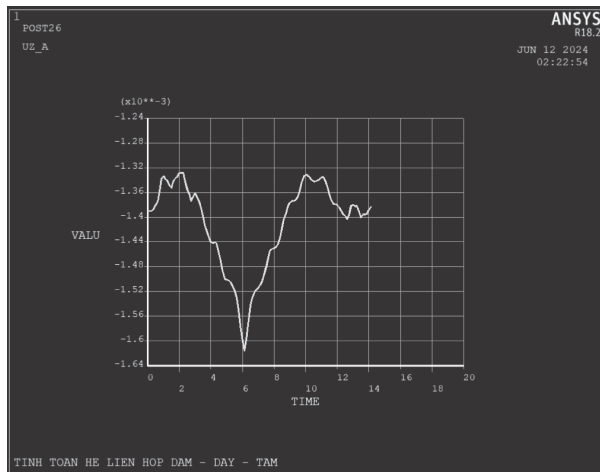




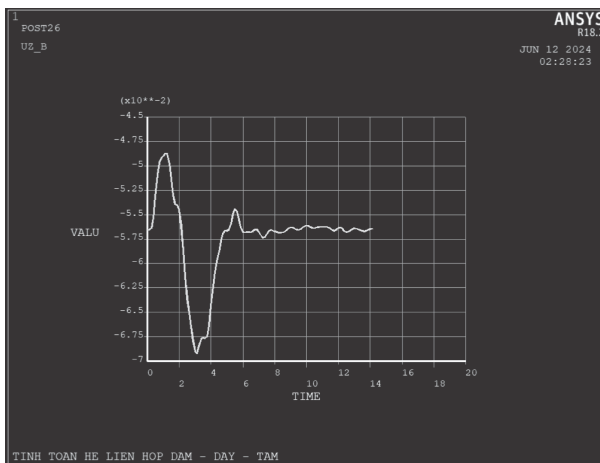
Hình 3. Lực căng dây cáp dài nhất trên 2 nhịp dầm [N]



Hình 6. Phản lực F_z^{Cot} tại chân cột chống [N]



Hình 4. Chuyển vị thẳng đứng tại điểm A [m]



Hình 5. Chuyển vị thẳng đứng tại điểm B [m]

Nhận xét

Chuyển vị thẳng đứng tại điểm B (giữa đoạn nhịp phải) lớn hơn khá nhiều so với chuyển vị tại điểm A, do A là vị trí giữa đoạn có cột chống ở hai bên, còn ở B không có cột chống. Lực căng lớn nhất xuất hiện trong dây cáp trên 2 nhịp là gần bằng nhau, đạt giá trị cực trị khi tải trọng đi qua vị trí mặt tẩm có gắn dây cáp. Khi tải trọng đi qua hoặc trước khi tải trọng đi đến, dao động tại điểm xét là khá nhỏ (giảm dao động nhanh). Có điều này là do tải tác dụng ở đây là trọng lượng bản thân hệ và khối lượng di động chứ không phải là một dạng tải trọng có tần số kích thích.

5. KẾT LUẬN

Trong phạm vi nội dung nghiên cứu, tác giả đã sử dụng ngôn ngữ lập trình ANSYS APDL và kỹ thuật phần tử Sinh – Diệt để giải bài toán hệ kết cấu chịu tác dụng của khối lượng di động. Kết quả cho ra đáp ứng động của hệ và chương trình tính cho phép khảo sát nhiều thông số kết cấu, tải trọng, giúp đánh giá được ảnh hưởng của các thông số đó đến đáp ứng động của hệ. Kết quả cũng đã chỉ ra được:

- Kỹ thuật phần tử Sinh – Diệt hoàn toàn giải quyết được bài toán kết cấu chịu tác dụng của tải trọng di động.

- Với trường hợp tải trọng tác dụng là khối lượng di động, sự dao động của hệ là không nhiều. Tại các điểm tính, giá trị cực trị của đáp ứng tăng lên nhanh khi tải đi đến, giảm đi nhanh khi tải đi qua.

Với những kết quả đạt được trong nghiên cứu, đây sẽ là nền tảng tốt để tác giả phát triển tính toán với bài toán có dạng kết cấu, tải trọng phức tạp hơn (hệ chịu tác dụng của đoàn tải trọng di động, chịu tác dụng của hệ dao động di động, ...).

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ hỗ trợ nghiên cứu khoa học của Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn với mã số đề tài “23.1.09”.❖

Ngày nhận bài: **15/5/2024**

Ngày phản biện: **09/6/2024**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Wen-Yu He, Peng Liu, Hua-Cai Cheng, Zi-Bing Li, Jian-Qing Bu (2022), *Displacement reconstruction of beams subjected to moving load using data fusion of acceleration and strain response*, Engineering Structures Volume 268, 1 October 2022, 114693.

[2]. Zhang, Yuntai; Jiang, Lizhong; Zhou, Wangbao; Liu, Shaohui; Feng, Yulin; Liu, Xiang; Lai, Zhipeng (2022), *Dynamic response analysis of a multiple-beam structure subjected to a moving load*, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Volume 21, Issue 3, p.769-784, July 2022.

[3]. Ahmad M., Ruhollah M., Mohammad H. K. (2015), *Nonlinear Dynamic Analysis of a Rectangular Plate Subjected to Accelerated/Decelerated Moving Load*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 53, 1, pp.151-166.

[4]. C. Johansson, C. Pacoste, R. Karoumi (2013), *Closed-form solution for the mode superposition analysis of the vibration in multi-span beam bridges caused by concentrated moving loads*, Computers and Structures 119 (2013) 85–94.

[5]. Ladislav Frysba; *Vibration of solid and structures under moving loads*, Thomas Telford, ISBN 0-7277-2741-9 (1999).

[6]. Bathe K. J., *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Prentice - Hall, Inc., New Jersey (1976).

[7]. Nguyễn Hoài Sơn, Vũ Như Phan Thiện, Đỗ Thanh Việt; *Phương pháp phần tử hữu hạn với Matlab*, NXB. Đại học Quốc gia TP.Hồ Chí Minh, (2001).

[8]. Saeed Moaveni; *Finite element analysis: theory and application with ANSYS*, Pearson Prentice Hall., Pearson Education, Inc, (2008).

[9]. Erdogan Madenci, Ibrahim Guven; *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*, Springer International Publishing, (2015).

[10]. Release 11.0 Documentation for ANSYS.