

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

Nguyễn Thị Cẩm Nhung

**PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC HỆ LIÊN HỢP
DẦM ĐÔI-DÂY-CỘT-THANH ĐÀN HỒI CHỊU TÁC DỤNG
CỦA TẢI TRỌNG DI ĐỘNG VÀ LỰC KHÍ ĐỘNG**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2018

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ - BỘ QUỐC PHÒNG

Người hướng dẫn khoa học: GS.TS Hoàng Xuân Lượng

Phản biện 1: GS.TS Trần Đức Nhiệm

Đại học Giao Thông Vận Tải Hà Nội

Phản biện 2: GS.TS Trần Văn Liên

Đại học Xây Dựng Hà Nội

Phản biện 3: PGS.TS Trần Chung

Viện Khoa Học và Công Nghệ Xây Dựng

Luận án sẽ được bảo vệ tại Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo quyết định số /QĐ-HV, ngày tháng năm 2018 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi giờ ngày tháng năm 2018

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự
- Thư viện Quốc gia

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Hệ liên hợp dầm-dây-cột là dạng công trình sử dụng hệ thống dây cáp để hỗ trợ chịu một phần tải trọng của kết cấu chính. Một trong những ưu điểm nổi bật của hệ liên hợp dạng dầm-dây-cột là chúng cho phép truyền bớt tải trọng từ phần này sang phần khác thuộc công trình. Ngược lại, tải trọng của công trình từ các phần khác nhau có thể được phân bố về cột trụ trung tâm. Nhờ sự linh hoạt trong thiết kế và nhiều ưu điểm khác, hệ liên hợp dầm-dây-cột ngày càng được sử dụng nhiều trong các kết cấu thực tế, chẳng hạn như sân vận động, tháp truyền hình, cầu treo hay cầu dây văng.

Cùng sự phát triển mạnh mẽ của khoa học công nghệ, hệ liên hợp dầm-dây-cột dạng cầu dây văng hiện đại có kết cấu thanh mảnh hơn, trọng lượng nhỏ hơn và khả năng vượt nhịp ngày càng lớn hơn. Cầu dây văng hai tầng còn cho phép lưu lượng phương tiện giao thông lớn và đa dạng. Một số cây cầu hệ dây hai tầng có chiều dài nhịp chính hơn 1000m (Hình 1.2) như cầu Verrezano (1298m, Mỹ, 1969), Tsing Ma (1377m, Hồng Kông, 1997), Minami Bisan-Seto (1100m, Nhật Bản, 1988), 25 de Abril (1012m, Bồ Đào Nha, 1966) ... Tuy nhiên các kết cấu liên hợp dạng này hầu hết đều được xây dựng ở những khu vực chịu tác động của gió, không những phụ thuộc vào vận tốc gió mà còn phụ thuộc vào chuyển vị và vận tốc chuyển động của kết cấu. Mặt khác, theo sự phát triển của kinh tế xã hội, tải trọng và mật độ phương tiện giao thông qua cầu cũng gia tăng, làm ảnh hưởng đáng kể đến đáp ứng động của kết cấu cầu. Do đó cầu dây văng thường xuyên phải chịu tác dụng đồng thời của cả tải trọng di động và lực khí động.

Trong những năm gần đây, vấn đề nghiên cứu kết cấu liên hợp dạng cầu dây văng một tầng, hai tầng chịu tác dụng của các dạng hoạt tải khác nhau như tải trọng di động, tải trọng khí động, động đất... đã thu hút sự quan tâm của nhiều nhà khoa học trên thế giới và đã đạt được một số kết quả nhất định. Với hệ thống sông ngòi dày đặc từ Bắc vào Nam, ở Việt Nam hiện nay một số công trình cầu hệ treo quy mô lớn đã hoàn thành, một số khác đang trong giai đoạn chuẩn bị và xây dựng, đòi hỏi sự nghiên cứu chuyên sâu và toàn diện đối

với các tác động và cơ chế gây ra dao động cho các kết cấu liên hợp này.

Vì vậy, đề tài “**Phân tích động lực học hệ liên hợp dầm đôi-dây-cột-thanh dàn hồi chịu tác dụng của tải trọng di động và lực khí động**” mà luận án giải quyết là cấp thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn trong bối cảnh cơ sở hạ tầng phát triển mạnh mẽ ở Việt Nam.

2. Mục đích nghiên cứu của luận án

- Xây dựng thuật toán phần tử hữu hạn (PTHH) và chương trình máy tính phân tích động lực học hệ liên hợp dầm đôi – dây – cột – thanh chịu tác dụng của tải trọng di động và lực khí động.

- Khảo sát một số yếu tố ảnh hưởng đến đáp ứng động lực học của hệ liên hợp, đưa ra các nhận xét, khuyến cáo kỹ thuật nhằm định hướng cho việc thiết kế, chế tạo và sử dụng các kết cấu liên hợp dầm – dây – cột.

- Tiến hành thực nghiệm trên mô hình kết cấu liên hợp chịu tác dụng của một hoặc nhiều tải trọng di động tại phòng thí nghiệm, góp phần kiểm tra độ tin cậy thuật toán và chương trình tính đã lập.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án

- Về kết cấu: Kết cấu liên hợp dầm đôi – dây – cột – thanh.

- Về tải trọng: Tải trọng di động dưới dạng khối lượng di động và hệ dao động di động, tải trọng khí động theo mô hình tuyến tính của Scanlan.

Phạm vi nghiên cứu: Dao động tự do và dao động cưỡng bức của hệ liên hợp dầm đôi – dây – cột – thanh chịu tác dụng của tải trọng di động và lực khí động. Giả thiết vật liệu trong giai đoạn đàn hồi tuyến tính.

4. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu lý thuyết, dựa trên phương pháp PTHH kết hợp với nghiên cứu thực nghiệm trên mô hình.

5. Cấu trúc luận án

Luận án gồm phần mở đầu, 4 chương, kết luận, danh mục công trình công bố, tài liệu tham khảo và phụ lục. Trong đó có 147 trang thuyết minh, 19 bảng, 117 hình vẽ và đồ thị, 123 tài liệu tham khảo và 22 trang phụ lục.

Mở đầu. Trình bày tính cấp thiết của đề tài luận án.

Chương 1. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu

Chương 2. Nghiên cứu động lực học hệ liên hợp dầm đôi-dây-cột-thanh chịu tải trọng di động và lực khí động.

Chương 3. Khảo sát số.

Chương 4. Nghiên cứu thực nghiệm phản ứng động hệ liên hợp dầm đôi-dây-cột-thanh chịu tác dụng của tải trọng di động.

Kết luận và kiến nghị: Trình bày những kết quả mới của luận án và một số kiến nghị của tác giả rút ra từ nội dung nghiên cứu.

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

Trình bày tổng quan về hệ liên hợp dầm – dây – cột và ứng dụng trong tính toán kỹ thuật, tổng quan về mô hình tải trọng di động, các hiện tượng khí động phát sinh bởi gió và mô hình lực khí động. Trình bày các nghiên cứu về mô hình kết cấu liên hợp, hệ liên hợp chịu tác dụng của tải trọng di động, hệ liên hợp chịu tác dụng của lực khí động và hệ liên hợp chịu tác dụng đồng thời của cả hai dạng tải trọng này. Từ các công trình đã công bố, trên cơ sở các vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu và phát triển, tác giả luận án tập trung giải quyết các vấn đề chủ yếu sau:

- Xây dựng mô hình bài toán hệ liên hợp dầm đôi – dây – cột – thanh dàn hồi chịu tác dụng của tải trọng di động và lực khí động, thiết lập hệ phương trình vi phân dao động của hệ bằng phương pháp PTHH.

- Thiết lập thuật toán giải các bài toán động lực học hệ liên hợp dầm đôi – dây – cột – thanh chịu tác dụng của tải trọng di động và lực khí động.

- Lập chương trình giải các bài toán trên trong môi trường Matlab. Xác định đáp ứng động lực học của kết cấu như chuyển vị, mô men uốn, lực dọc trong thanh dàn hồi, lực căng dây cáp.

- Khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố: tốc độ, số lượng tải trọng di động, vận tốc gió trung bình, độ cứng các thanh dàn hồi liên kết dầm trên và dầm dưới, khoảng cách giữa 2 dầm chính, vật liệu kết cấu, thiết bị tiêu tán năng lượng TMD, ... đến khả năng làm việc của hệ liên hợp. Đề xuất các phương án hợp lý trong thiết kế, chế tạo đối với kết cấu dạng dầm đôi

– dây – cột – thanh đàn hồi chịu tác dụng của tải trọng di động, của lực khí động và tác dụng đồng thời của cả hai dạng tải trọng này.

- Tiến hành nghiên cứu thực nghiệm, xác định phản ứng động của kết cấu dầm đôi liên hợp chịu tác dụng của một tải trọng di động, đoàn tải trọng di động di chuyển với vận tốc khác nhau. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm được so sánh, đối chiếu với nghiên cứu lý thuyết.

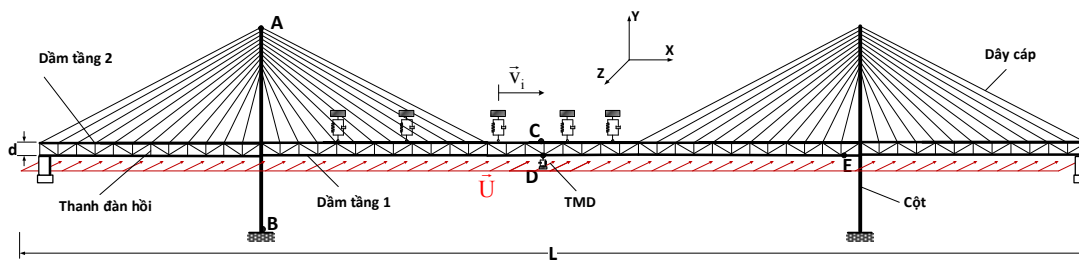
CHƯƠNG 2

NGHIÊN CỨU ĐỘNG LỰC HỌC HỆ LIÊN HỢP DẦM ĐÔI – DÂY – CỘT – THANH CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG DI ĐỘNG VÀ LỰC KHÍ ĐỘNG

2.1. Đặt vấn đề

Trong chương này, tác giả xây dựng thuật toán PTHH và chương trình tính COMLAF_2017, nhằm phân tích đáp ứng động lực học của hệ liên hợp dầm đôi-dây-cột-thanh chịu tác dụng của tải trọng di động và lực khí động theo mô hình Scanlan.

2.2. Đặt bài toán và các giả thiết



Hình 2.1. Mô hình bài toán

Xét sơ đồ tính gồm hai dầm bố trí song song, thuộc mặt phẳng đứng, được liên kết với nhau bởi các thanh đàn hồi, cột và hệ thống dây cáp, liên kết bám dính tuyệt đối với dầm (Hình 2.1). Hệ mô hình hóa cho kết cấu cầu dây văng 2 tầng. Thiết bị tiêu tán năng lượng có dạng khối lượng – lò xo – cản nhớt (TMD) được gắn vào chính giữa dầm dưới [1], [83]. Hệ chịu tác dụng nhiều tải trọng di động đồng thời với lực khí động. Tải trọng di động được xét đến trong luận án có dạng khối lượng di động hoặc hệ dao động di động, di chuyển trên hai dầm chính của kết cấu. Mô hình lực

khí động hai bậc tự do của Scanlan [90] được lựa chọn sử dụng.

Giả thiết: Vật liệu kết cấu đồng nhất, đàn hồi tuyến tính, chuyển vị và biến dạng của hệ là bé. Tải trọng di động không tách khỏi kết cấu trong quá trình di chuyển. Lực khí động tác dụng vuông góc với mặt phẳng dầm-dây, có ảnh hưởng không đáng kể đối với dây cáp, cột và các tải trọng di động. Kết cấu dầm đôi không ảnh hưởng tới các hệ số khí động.

2.3. Quan hệ ứng xử cơ học của kết cấu dầm đôi – dây – cột – thanh

Các phần tử sử dụng trong bài toán gồm: Phần tử TMD, phần tử dây cáp không gian có khối lượng và phần tử thanh không gian (3D) dùng để mô hình hóa hai dầm chính, cột, các thanh nối. Phương trình tổng thể mô tả đáp ứng động của hệ được thiết lập dựa trên cơ sở quan hệ ứng xử và phương trình mô tả dao động của các phần tử thuộc hệ.

2.3.1. Phần tử thanh không gian

Hai dầm chính, cột và các thanh đàn hồi được rời rạc hóa thành hữu hạn các phần tử thanh không gian hai điểm nút, mỗi nút có 6 bậc tự do $u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}$ với $i = 1, 2$. Chuyển vị của điểm $M(x, y, z, t)$ thuộc phần tử thanh theo các phương trục Ox, Oy và Oz được xác định theo công thức sau:

$$\begin{cases} u = u(x, y, z, t) = u_0(x, t) + z\theta_y(x, t) - y\theta_z(x, t) \\ v = v(x, y, z, t) = v_0(x, t) - z\theta_x(x, t) \\ w = w(x, y, z, t) = w_0(x, t) + y\theta_x(x, t) \end{cases} \quad (2.2)$$

Phương trình mô tả dao động của phần tử:

$$[M_e^0]\{\ddot{q}\}_e + [C_e^0]\{\dot{q}\}_e + [K_e^0]\{q\}_e = \{F\}_e \quad (2.19)$$

2.3.2. Phần tử TMD [1]

Phần tử TMD gồm 2 nút I, J có tọa độ $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$ dùng để mô tả các phần tử lò xo đàn hồi tuyến tính với hệ số cứng k_{tmd} , và cản nhớt tuyến tính với hệ số cản c_{tmd} , có phương dọc theo phần tử. Phương của các lực đàn hồi và lực cản nhớt được xác định theo tọa độ 2 nút trong

không gian. TMD được giả thiết chỉ thay đổi dao động theo phương thẳng đứng, bỏ qua ảnh hưởng của TMD đến dao động xoắn của kết cấu.

2.3.3. Phần tử dây cáp

Phần tử dây cáp đàn hồi không gian được xây dựng dựa trên biểu thức giải tích của phần tử dây đàn hồi. Ma trận độ cứng của phần tử được tính thông qua quá trình lặp hiệu chỉnh các lực nút theo công thức:

$$\begin{Bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \end{Bmatrix} = [K]_c \begin{Bmatrix} \Delta L_{xz} \\ \Delta L_y \end{Bmatrix} \quad (2.47)$$

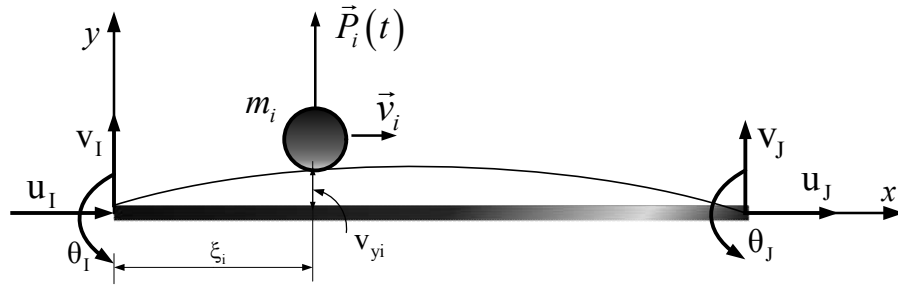
$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix}^{(i+1)} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix}^{(i)} + \begin{Bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \end{Bmatrix} \quad (2.48)$$

2.4. Xây dựng phương trình vi phân dao động của hệ liên hợp chịu tác dụng của tải trọng di động và lực khí động

2.4.1. Hệ liên hợp chịu tác dụng của tải trọng di động

Trường hợp kết cấu chịu tác dụng của N tải trọng di động, tại thời điểm t, phần tử bất kì trên dầm chính sẽ có n tải trọng di động di động ($0 \leq n \leq N$) di chuyển qua.

- Phần tử thanh chịu tác dụng của khối lượng di động:



Hình 2.5. Phần tử thanh chịu tác dụng của khối lượng di động

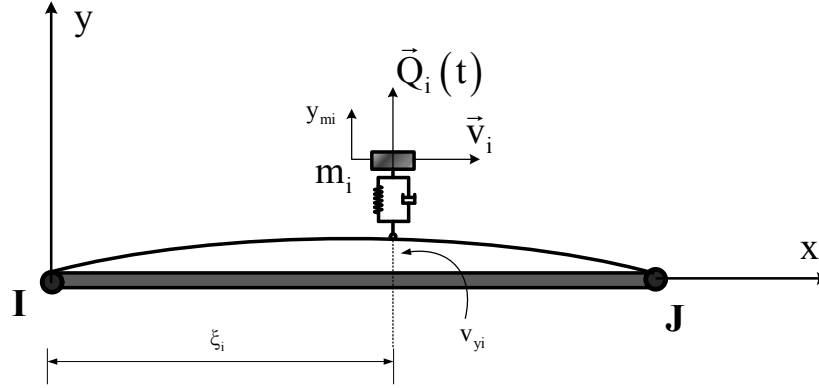
Phương trình vi phân mô tả dao động của phần tử thanh – n khối lượng di động ($0 \leq n \leq N$) được viết dưới dạng:

$$\left([M_e^0] + [M_e^p] \right) \{\ddot{q}\}_e + \left([C_e^0] + [C_e^p] \right) \{\dot{q}\}_e + \left([K_e^0] + [K_e^p] \right) \{q\}_e = \{P_e(t)\} \quad (2.75)$$

với:

$$\left[M_e^P \right] = \sum_{i=1}^n \left[M_e^{Pi} \right], \left[C_e^P \right] = \sum_{i=1}^n \left[C_e^{Pi} \right], \left[K_e^P \right] = \sum_{i=1}^n \left[K_e^{Pi} \right], \{ P_e(t) \} = \sum_{i=1}^n \{ P_{ei}(t) \}$$

- Phần tử thanh chịu tác dụng của hệ dao động di động:

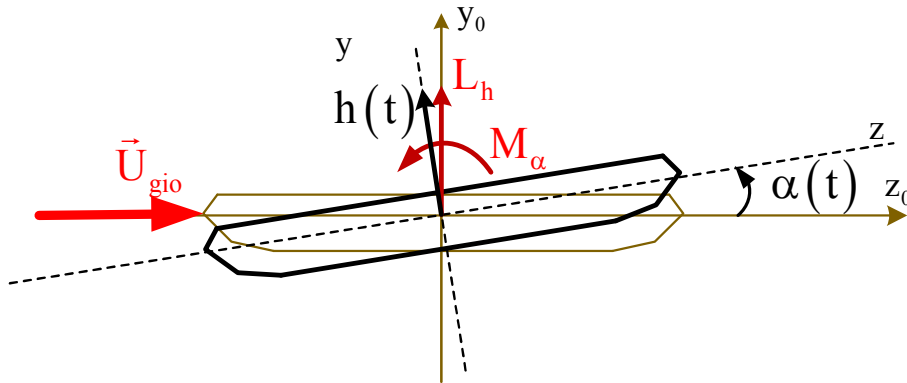


Hình 2.6. Phần tử thanh chịu tác dụng của hệ dao động di động

Hệ phương trình vi phân mô tả dao động của phần tử thanh và n – hệ dao động di động như sau:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\left[M_e^0 \right] + \sum_{i=1}^n \left[M_e^{Pi} \right] \right) \{ \ddot{q} \}_e + \sum_{i=1}^n m_i \left[N_{yi} \right]^T \ddot{y}_{mi} + \left(\left[C_e^0 \right] + \sum_{i=1}^n \left[C_e^{Pi} \right] \right) \{ \dot{q} \}_e + \\ \left(\left[K_e^0 \right] + \sum_{i=1}^n \left[K_e^{Pi} \right] \right) \{ q \}_e = \sum_{i=1}^n \{ P_{ei}(t) \} \\ m_1 \ddot{y}_{m1} + c_1 \dot{y}_{m1} + k_1 y_{m1} - c_1 \left[N_{y1} \right] \{ \dot{q} \}_e - \left(c_1 \left[N'_{y1} \right] \dot{x}_1 + k_1 \left[N_{y1} \right] \right) \{ q \}_e = Q_1 \\ \vdots \\ m_n \ddot{y}_{mn} + c_n \dot{y}_{mn} + k_n y_{mn} - c_n \left[N_{yn} \right] \{ \dot{q} \}_e - \left(c_n \left[N'_{yn} \right] \dot{x}_n + k_n \left[N_{yn} \right] \right) \{ q \}_e = Q_n \end{array} \right.$$

2.4.2. Hệ liên hợp chịu tác dụng của lực khí động



Hình 2.8. Mặt cắt dầm chịu tác dụng của lực khí động

Lực khí động tác dụng lên dầm (Hình 2.8) [90], [91], [95]:

$$L_h = \frac{1}{2} \rho_a U^2 B \left(\frac{KH_1^*}{U} \dot{h}(x,t) + \frac{KH_2^*}{U} \dot{\alpha}(x,t) + K^2 H_3^* \alpha(x,t) + K^2 H_4^* h(x,t) \right)$$

$$M_\alpha = \frac{1}{2} \rho_a U^2 B^2 \left(\frac{KA_1^*}{U} \dot{h}(x,t) + \frac{KA_2^*}{U} \dot{\alpha}(x,t) + K^2 A_3^* \alpha(x,t) + K^2 A_4^* h(x,t) \right)$$

Phương trình vi phân dao động của phần tử thanh chịu tác dụng của lực khí động:

$$[M_e^0] \{\ddot{q}\}_e + ([C_e^0] - [C_e^{ae}]) \{\dot{q}\}_e + ([K_e^0] - [K_e^{ae}]) \{q\}_e = \{0\} \quad (2.114)$$

2.4.3. Hệ liên hợp chịu tác dụng đồng thời của tải trọng di động và lực khí động

Phương trình dao động của phần tử thanh chịu tác dụng đồng thời của lực khí động và n khối lượng di động ($0 \leq n \leq N$) có dạng:

$$([M_e^0] + [M_e^P]) \{\ddot{q}\}_e + ([C_e^0] + [C_e^P] - [C_e^{ae}]) \{\dot{q}\}_e + ([K_e^0] + [K_e^P] - [K_e^{ae}]) \{q\}_e = \{P_e(t)\} \quad (2.115)$$

Phương trình dao động của phần tử thanh chịu tác dụng đồng thời của lực khí động và n hệ dao động di động ($0 \leq n \leq N$) có dạng:

$$\begin{bmatrix} [M_e^0] + [M_e^P] & M_{11} & \dots & M_{1n} \\ 0 & m_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}\}_e \\ \ddot{y}_{m1} \\ \vdots \\ \ddot{y}_{mn} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_e^0] + [C_e^P] - [C_e^{ae}] & 0 & \dots & 0 \\ C_{11} & c_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & 0 & \dots & c_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{q}\}_e \\ \dot{y}_{m1} \\ \vdots \\ \dot{y}_{mn} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_e^0] + [K_e^P] - [K_e^{ae}] & 0 & \dots & 0 \\ K_{11} & k_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & 0 & \dots & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q\}_e \\ y_{m1} \\ \vdots \\ y_{mn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P\}_e + \{F\}_e^{ae} \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_n \end{Bmatrix} \quad (2.116)$$

Từ các phương trình mô tả dao động của phần tử, bằng phương pháp tập hợp ma trận, ta có được phương trình mô tả dao động toàn hệ. Sau khi

ghép nối các ma trận tổng thể, véc tơ tải trọng tổng thể và thực hiện điều kiện biên, phương trình vi phân dao động của toàn hệ có dạng sau:

$$[\bar{M}]\{\ddot{\bar{q}}\} + [\bar{C}]\{\dot{\bar{q}}\} + [\bar{K}]\{\bar{q}\} = \{\bar{R}\} \quad (2.120)$$

trong đó $[\bar{M}] = \sum_e ([M_e^0] + [M_e^P])$ là ma trận khối lượng tổng thể,

$[\bar{C}] = \left(\alpha_r \sum_e [M_e^0] + \beta_r \sum_e [K_e^0] \right) + \left(\sum_{e_m} [C_e^P] - \sum_e [C_e^{ae}] \right)$ là ma trận cản tổng thể, e - chỉ số phần tử, e_m - chỉ số phần tử do tải di động tác dụng.

$[\bar{K}] = \sum_e ([K_e^0] + [K_e^P] - [K_e^{ae}])$ là ma trận độ cứng tổng thể,

$$\{\bar{R}\} = \sum_e \left\{ \begin{array}{c} \{F_e^P\} + \{F_e^{ae}\} \\ \{Q\} \end{array} \right\} \text{ là véc tơ tải trọng nút tổng thể do lực khí}$$

động và các tải trọng di động tác dụng lên hệ.

2.5. Thuật toán PTHH giải phương trình vi phân dao động của hệ

Hệ phương trình (2.120) là hệ phương trình vi phân tuyến tính cấp 2, có các hệ số phụ thuộc thời gian.

Để giải hệ phương trình (2.120), tác giả sử dụng phương pháp tích phân trực tiếp Newmark, trong đó các ma trận cản khí động, ma trận độ cứng khí động được bổ sung vào ma trận tổng thể trong quá trình tính, được cập nhật sau mỗi bước thời gian tính.

2.6. Giới thiệu và kiểm tra độ tin cậy của chương trình tính

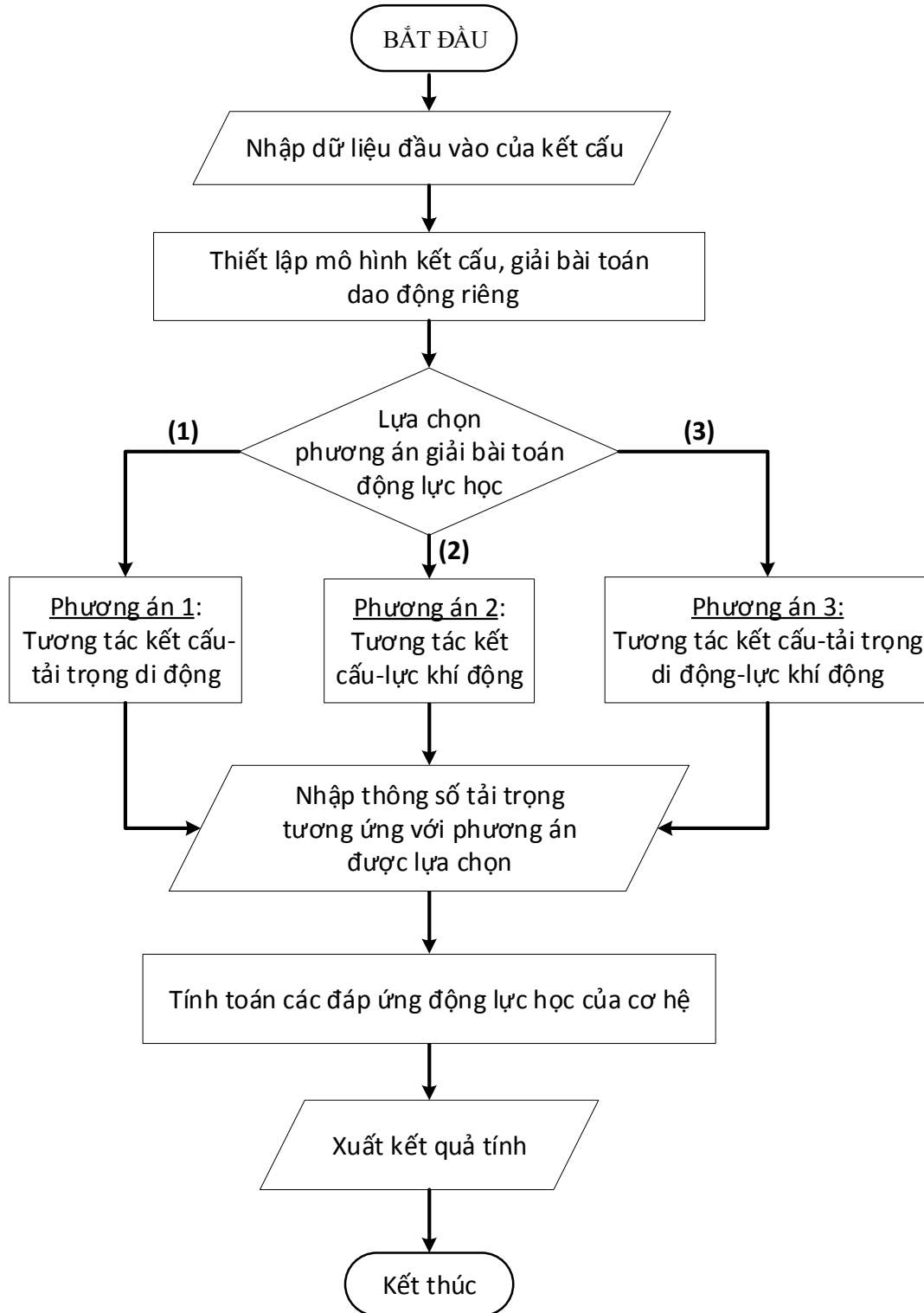
2.6.1. Giới thiệu chương trình tính

Bộ chương trình tính của luận án được tác giả xây dựng trong môi trường Matlab có tên COMLAF_2017 (COMPLEX - MOVING LOAD AERODYNAMIC FORCE), gồm các modul chính sau:

- Modul nhập số liệu, chia phần tử;
- Modul giải bài toán dao động riêng;
- Modul giải bài toán kết cấu chịu lực khí động và tải trọng di động;
- Modul xuất kết quả.

Bộ chương trình tính COMLAF_2017 cho phép xác định được tần số dao động riêng, tính toán đáp ứng chuyển vị, ứng suất, tần số dao động của

kết cấu chịu tác dụng của lực khí động và tải trọng di động; đồng thời nó cũng cho phép khảo sát được ảnh hưởng của một số yếu tố đến khả năng làm việc của kết cấu.



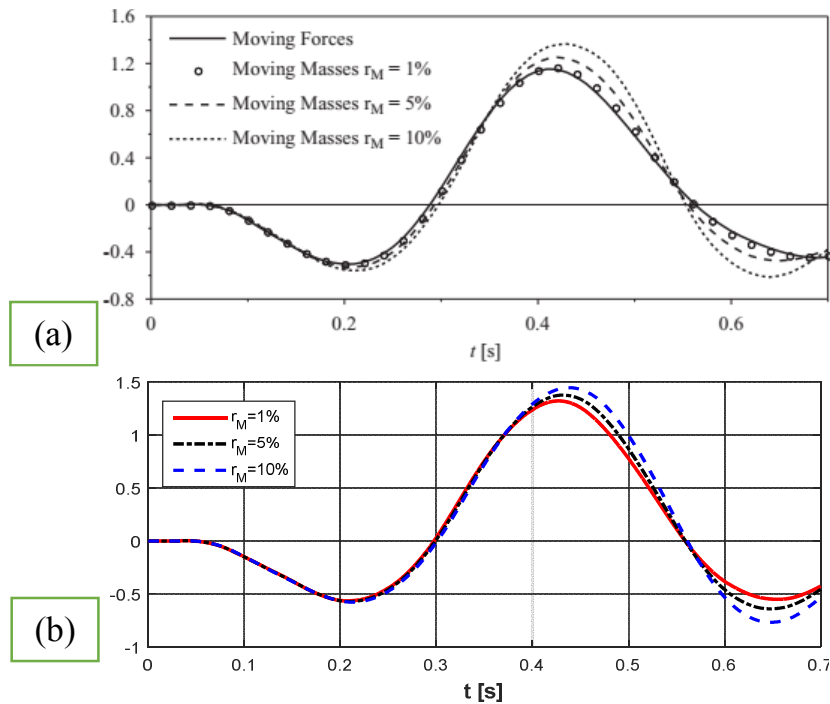
Hình 2.10. Sơ đồ khối bộ chương trình tính COMLAF_2017

2.8.2. Kiểm tra độ tin cậy của chương trình

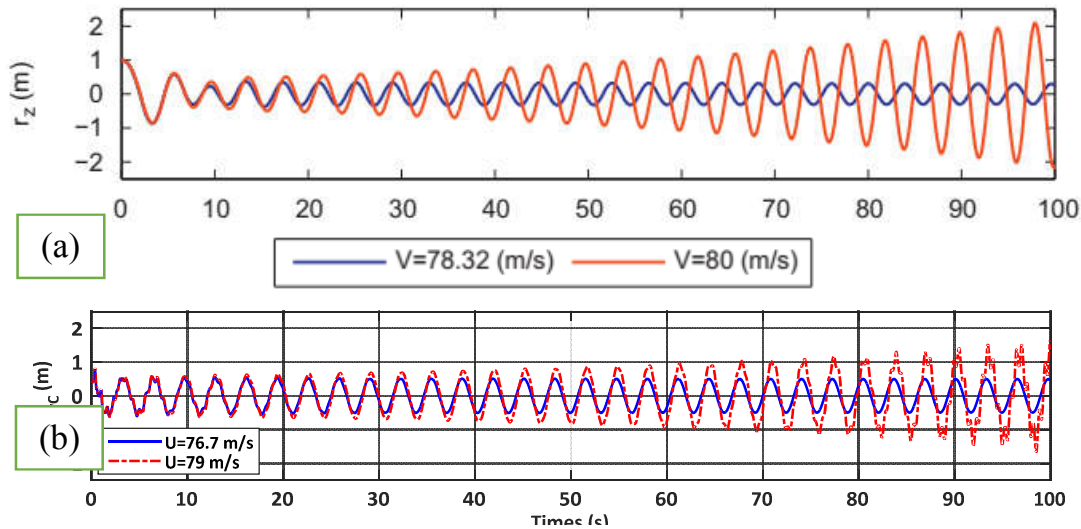
Tác giả đã sử dụng chương trình COMLAF_2017 để tính toán và so sánh tần số dao động riêng của hệ liên hợp dầm dây mô phỏng cầu dây văng Meiko-Nishi (Nhật Bản) trong công trình của Abdel-Ghaffar AM [20] và Raid Karoumi [83], kiểm tra đáp ứng chuyển vị đứng tại mặt cắt chính giữa dầm 3 nhịp chịu tác dụng nhiều tải trọng di động trong công trình của Vera de Salvo [106] và kiểm tra đáp ứng của kết cấu cầu Hardanger (Na Uy) chịu tác dụng của tải trọng gió U với kết quả được công bố của tác giả Ole Øiseth [77].

Bảng 2.1. So sánh tần số dao động uốn riêng của cầu Meiko-Nishi

Tần số dao động (Hz)	[20]	[83]	Luận án	Sai số (%)
1	0,311	0,334	0,339	8,04 – 1,05
2	0,411	0,437	0,440	7,06 – 0,69
3	0,650	0,702	0,706	8,62 – 0,57



Hình 2.13. Độ võng tương đối tại chính giữa dầm theo thời gian
(a) tác giả Vera de Salvo [106], (b) chương trình COMLAF_2017



Hình 2.15. Đáp ứng chuyển vị đứng giữa nhịp cầu Hardanger

(a) tác giả Ole Øiseth [77], (b) chương trình COMLAF_2017

Từ các kết quả so sánh trên, có thể kết luận chương trình tính COMLAF của luận án có đủ độ tin cậy để thực hiện các tính toán cho đề tài luận án trong các chương tiếp theo.

2.9. Kết luận chương 2

- Xây dựng thuật toán PTHH và chương trình tính trong môi trường Matlab giải bài toán phân tích động lực học hệ liên hợp dầm đôi-dây-cột-thanh chịu tác dụng của tải trọng di động và lực khí động.
- Kiểm tra độ tin cậy của chương trình tính bằng việc giải bài toán với các dữ liệu và điều kiện như trong công trình công bố của tác giả nước ngoài. Kết quả cho thấy chương trình đảm bảo độ tin cậy.

CHƯƠNG 3

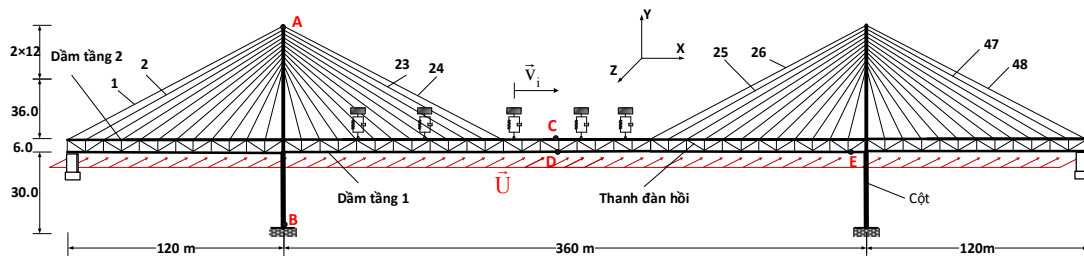
KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG MỘT SỐ YẾU TỐ ĐẾN ĐÁP ỨNG ĐỘNG CỦA KẾT CẤU DẦM ĐÔI-DÂY-CỘT-THANH CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG DI ĐỘNG VÀ LỰC KHÍ ĐỘNG

3.1. Đặt vấn đề

Sử dụng chương trình tính đã lập ở chương 2, thực hiện khảo sát số xác định đáp ứng động lực học của hệ liên hợp dầm đôi-dây-cột-thanh chịu tác dụng của tải trọng di động và lực khí động.

3.2. Bài toán xuất phát

Xét hệ liên hợp dầm đôi – dây – cột – thanh có kích thước hình học như Hình 3.1. Dầm trên và dưới song song, cách nhau 6m, mỗi dầm có chiều dài tổng cộng 600m, mặt cắt ngang tương đương chữ nhật, với bề rộng tương đương $b = 20\text{m}$, chiều cao tương đương $h = 0,8\text{m}$, vật liệu có mô đun đàn hồi $E_b = 2,1.10^{11}\text{N/m}^2$, hệ số Poisson $\nu_b = 0,3$, khối lượng riêng $\rho_b = 19640\text{kg/m}$. Tổng cộng có 48 dây cáp, diện tích mặt cắt ngang $A_c = 0,0113 \div 0,0362\text{ m}^2$, các điểm nối cáp trên dầm cách nhau $\Delta l_{bc} = 20\text{m}$, lên cột $\Delta l_{pc} = 5\text{m}$, vật liệu có mô đun đàn hồi $E_c = 2,1.10^{11}\text{N/m}^2$, hệ số Poisson $\nu_c = 0,3$, khối lượng riêng $\rho_c = 0,0125 \div 0,398\text{ kg/m}$. Các thanh đàn hồi có diện tích mặt cắt ngang $A_{tr} = 0,15\text{m}^2$, được làm từ cùng một loại vật liệu với dầm, liên kết dầm trên và dầm dưới theo phương đứng và xiên, khoảng cách giữa các thanh đàn hồi là $\Delta S_{tr} = 10\text{m}$. Các cột làm bằng bê tông có mô đun đàn hồi $E_c = 2,8.10^{10}\text{N/m}^2$, hệ số Poisson $\nu_c = 0,3$, khối lượng riêng $\rho_c = 43780\text{kg/m}^3$, diện tích mặt cắt ngang của cột hình chữ nhật. Các kích thước khác thể hiện như trên hình vẽ.



Hình 3.1. Mô hình của bài toán

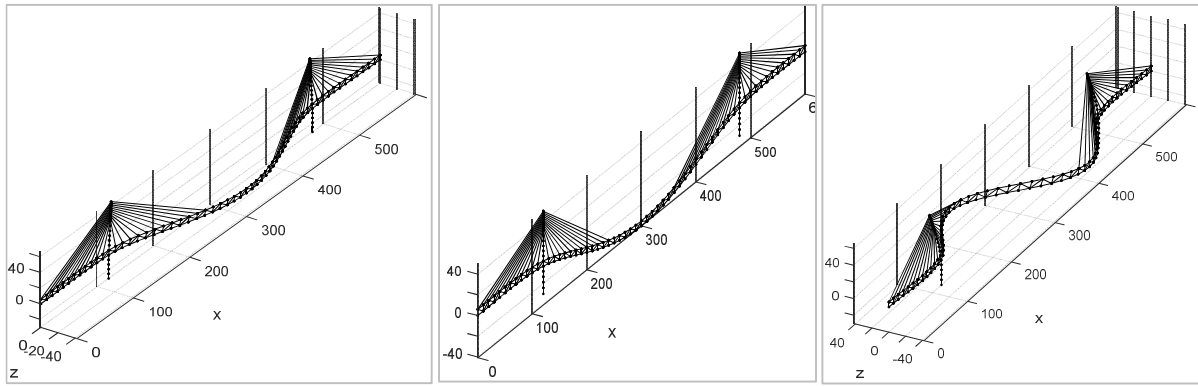
Thông số tải trọng: Các khối lượng di động có $m = 44000\text{kg}$, các hệ dao động di động gồm khối lượng $m = 44000\text{kg}$, lò xo đàn hồi có độ cứng $k_s = 9,12.10^6\text{N/m}$ và phần tử cản với hệ số cản $c_s = 8,6.10^4\text{Ns/m}$ mắc song song. Năm tải trọng di động di chuyển dọc chiều dài dầm trên từ phía trái kết cấu với vận tốc $v_0 = 20\text{ m/s}$, tăng tốc với gia tốc $a_1 = 2\text{ m/s}^2$ đến khi đạt được vận tốc chuyển động ổn định $v_{\max} = 25\text{ m/s}$ thì chạy đều, sau đó giảm tốc với $a_2 = -2\text{ m/s}^2$, và đạt vận tốc $v_0 = 20\text{ m/s}$ ngay trước khi rời khỏi kết cấu. Sau khoảng 5s thì tải trọng kế tiếp di chuyển vào kết cấu.

Lực gió với vận tốc trung bình $U = 15 \text{ m/s}$ tác dụng lên dầm theo phương Oz. Các hệ số khí động H_i^* , A_i^* ($i=1,2,3,4$) được nội suy tương ứng với vận tốc U bất kì, theo số liệu trong hàm thổi gió của Scanlan [95].

Điểm xuất kết quả chuyển vị: Mặt cắt chính giữa dầm trên (điểm C) và dầm dưới (điểm D), đỉnh cột trái (điểm A).

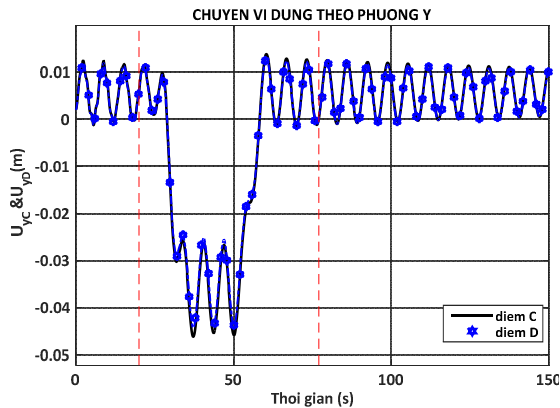
Điểm xuất kết quả lực: Mô men uốn tại chân cột trái (điểm B), lực dọc trong thanh dầm hồi chính giữa và lực căng một số dây cáp (các dây cáp có thứ tự từ trái sang phải).

Bài toán dao động riêng: Giải bài toán dao động riêng, nhận được các tần số riêng và các dạng dao động riêng, trong đó ba tần số riêng đầu tiên có giá trị: $f_1 = 0,1691 \text{ Hz}$, $f_2 = 0,2585 \text{ Hz}$, $f_3 = 0,4479 \text{ Hz}$.

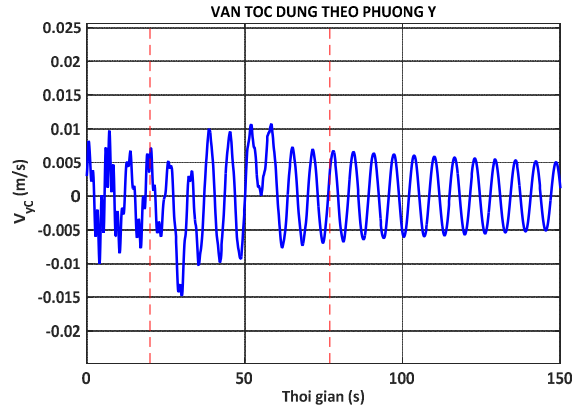


Hình 3.3. Ba dạng dao động riêng đầu tiên của kết cấu

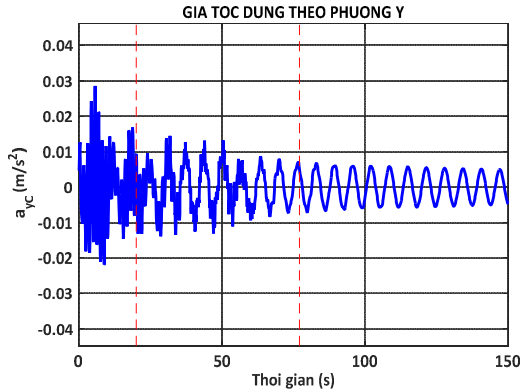
Bài toán dao động cưỡng bức: Giải bài toán ta được đáp ứng độ võng, vận tốc, ứng suất như trên hình 3.4, 3.5, 3.6, 3.7.



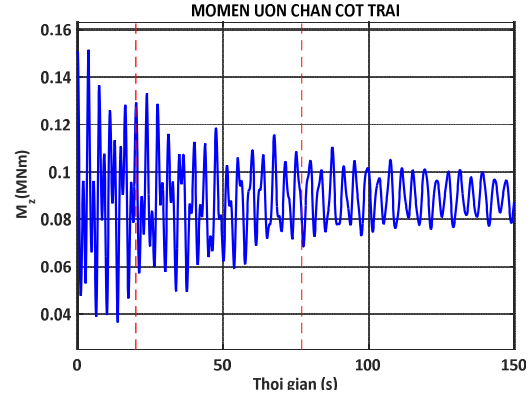
Hình 3.4. Chuyển vị đứng tại C



Hình 3.5. Vận tốc đứng tại C



Hình 3.6. Gia tốc đứng tại C



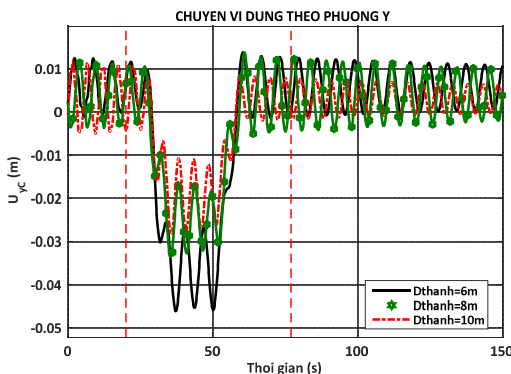
Hình 3.7. Moomen uốn chân cột trái

Nhận xét: Với các thông số của tải trọng di động và lực khí động như đã xét, trong khoảng thời gian các tải trọng di động di chuyển trên kết cấu, đáp ứng chuyển vị, vận tốc, gia tốc và lực tại các điểm khảo sát đều có thay đổi đáng kể. Khi các tải trọng di động chưa di chuyển trên kết cấu hoặc đã đi qua điểm tính, đáp ứng động có dạng dao động tuần hoàn tắt dần do tác động của gió. Sở dĩ có hiện tượng này là do với giá trị vận tốc gió U và vận tốc tải trọng di động được khảo sát, tải trọng tác động lên kết cấu chưa đủ lớn để dẫn tới sự thay đổi biên độ dao động của kết cấu tăng theo thời gian.

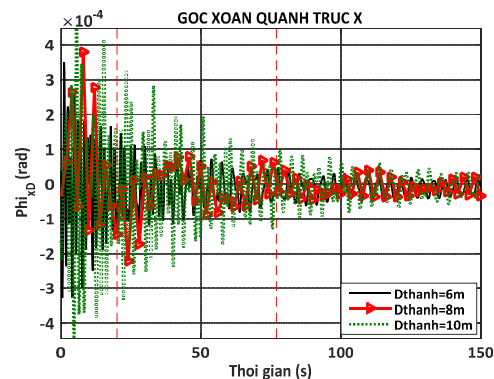
3.3. Khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố đến đáp ứng động của hệ dầm đôi – dây – cột – thanh chịu tác dụng của tải trọng di động và lực khí động

3.3.2. Ảnh hưởng của khoảng cách giữa dầm trên và dầm dưới

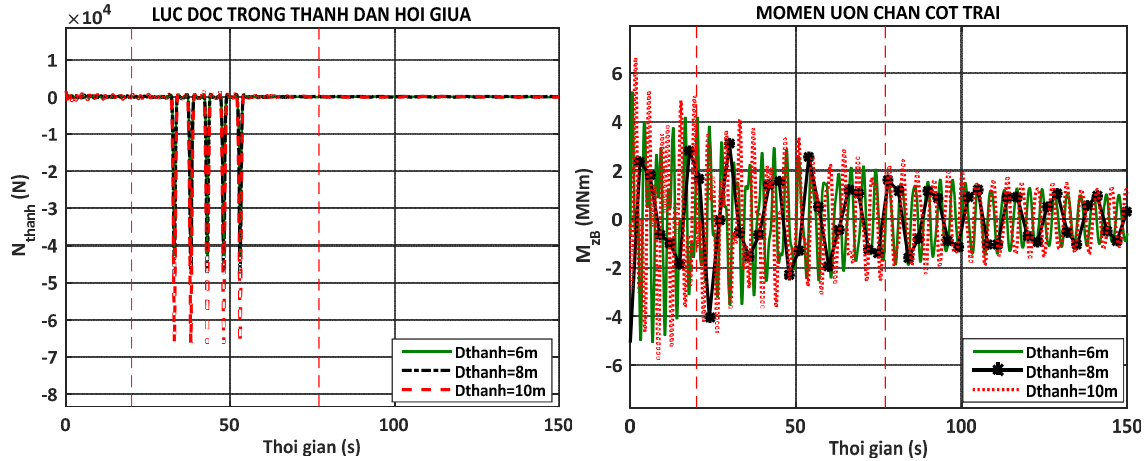
Tiến hành khảo sát bài toán với khoảng cách thay đổi từ 5 mét đến 11 mét. Kết quả đáp ứng đáp ứng động của kết cấu:



Hình 3.20. Chuyển vị đứng tại C



Hình 3.22. Góc xoắn tại C

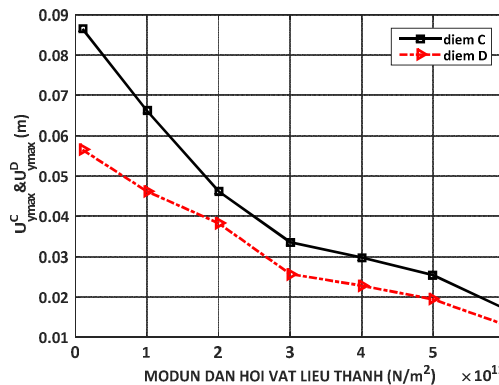


Hình 3.24. Lực dọc thanh giữa **Hình 3.26.** Mômen uốn chân cột trái

Nhận xét: Khi thay đổi L_d từ 5m đến 11m, chuyển vị theo phương đứng tại C giảm 2,05 lần, trong khi đó góc xoắn mặt cắt dầm tại C tăng 1,65 lần, lực dọc trong thanh dàn hồi giữa dầm tăng 1,61 lần và mô men uốn chân cột trái tăng 1.2 lần.

3.3.4. Ảnh hưởng của vật liệu thanh nối

Khảo sát bài toán với mô đun đàn hồi của vật liệu thanh biến thiên từ $1 \times 10^{10} (N/m^2)$ đến $6 \times 10^{11} (N/m^2)$. Kết quả giá trị lớn nhất của chuyển vị theo phương đứng tại điểm chính giữa dầm trên và dầm

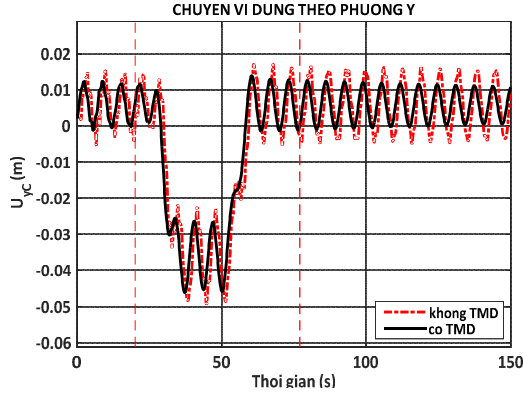


Hình 3.40. Quan hệ giữa chuyển vị đứng $U_{y\max}^C$, $U_{y\max}^D$ và vật liệu thanh

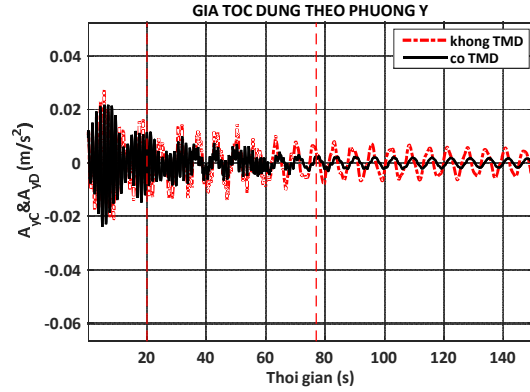
Nhận xét: Khi mô đun đàn hồi của vật liệu thanh nối tăng, chuyển vị đứng tại điểm chính giữa hai dầm đều giảm. Mặt khác sự chênh lệch giá trị chuyển vị đứng tại 2 điểm này cũng giảm dần. Điều này phản ánh đúng bản chất cơ học của hệ, đồng thời thêm khẳng định độ tin cậy của chương trình tính đã lập ở chương trước.

3.3.5. Ảnh hưởng của thiết bị tiêu tán năng lượng TMD

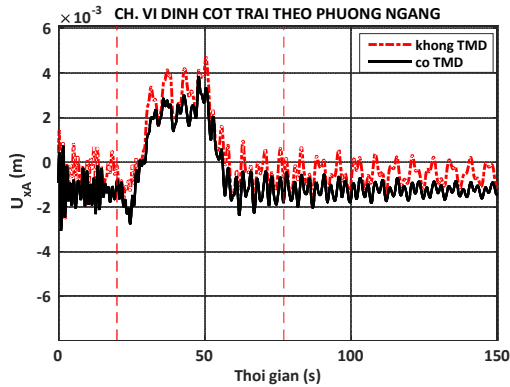
Thiết bị TMD có khối lượng 10 tấn (xấp xỉ 0,3% khối lượng toàn bộ kết cấu), được treo ở chính giữa dầm dưới (nút 61).



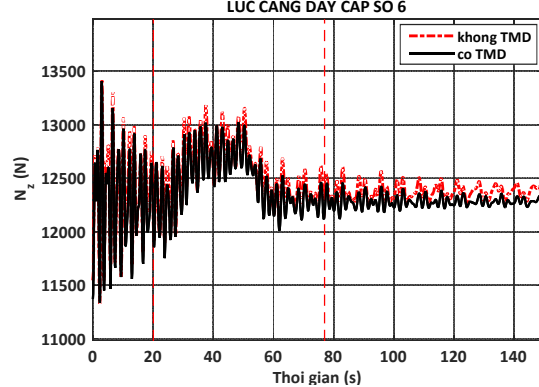
Hình 3.41. Chuyển vị đứng tại C



Hình 3.42. Gia tốc đứng tại C



Hình 3.43. Chuyển vị ngang tại A

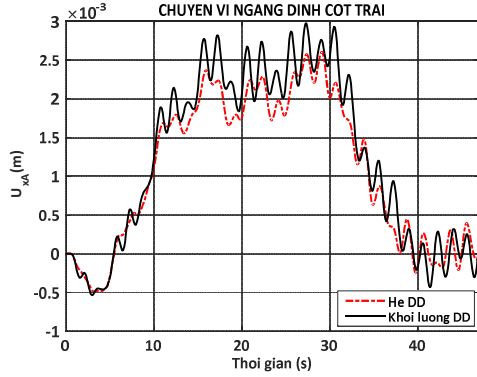


Hình 3.44. Lực căng dây cáp số 6

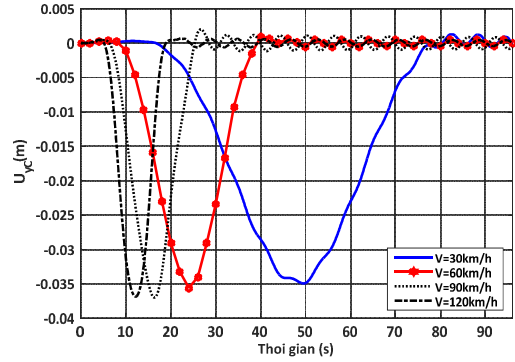
Nhận xét: Có thể thấy TMD rất hiệu quả trong việc giảm dao động theo phương đứng tại điểm giữa dầm, phương ngang của đỉnh cột cũng như mô men uốn tại chân cột khi kết cấu chịu tác dụng đồng thời của tải trọng di động và lực khí động. Giá trị lớn nhất của đáp ứng động trên kết cấu tại những điểm này không thay đổi nhiều, tuy nhiên biên độ dao động lại giảm đi đáng kể. Điều này là vì lắp thêm TMD làm tăng thêm hệ số cản của kết cấu

3.3.6. Ảnh hưởng của tải trọng di động

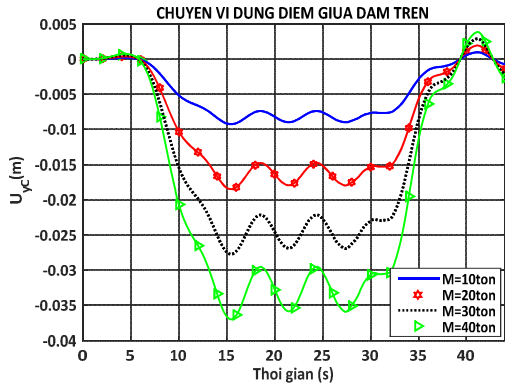
Tính toán hệ liên hợp chịu tác dụng của tải trọng di động với các dạng tải trọng khác nhau, giá trị vận tốc, khối lượng tải trọng và khoảng cách giữa các tải trọng khác nhau (vận tốc gió bằng không). Kết quả:



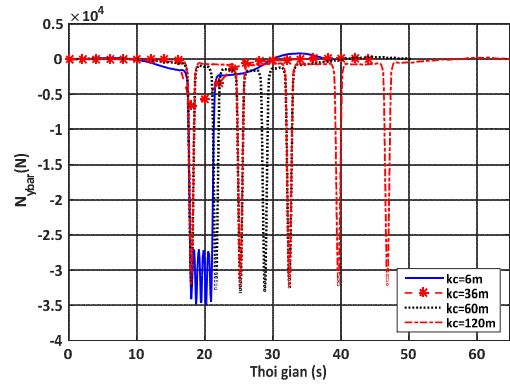
Hình 3.48. Chuyển vị ngang tại A



Hình 3.50. Chuyển vị đứng tại C



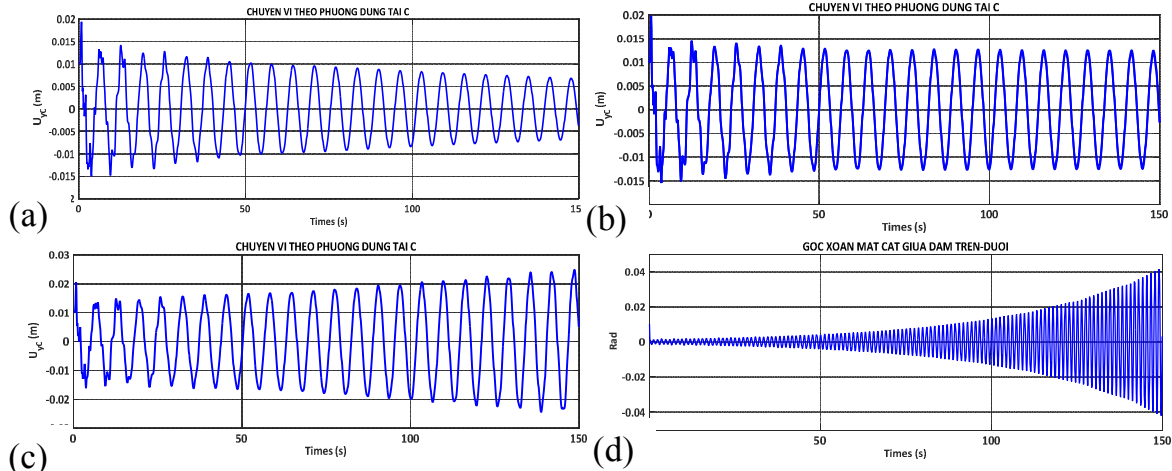
Hình 3.56. Chuyển vị đứng tại C



Hình 3.66. Lực dọc thanh giữa

Nhận xét: Đáp ứng của các đại lượng được khảo sát không chỉ phụ thuộc vào tốc độ di chuyển của tải trọng (Hình 3.50) mà còn phụ thuộc vào loại tải trọng (Hình 3.48), trọng lượng của tải trọng (Hình 3.56) và khoảng cách giữa các tải trọng (Hình 3.66). Các giá trị lớn nhất này xuất hiện tại thời điểm các tải trọng di chuyển qua vị trí giữa dầm.

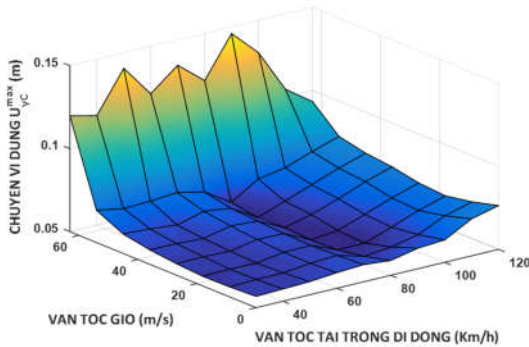
3.3.7. Ảnh hưởng của lực khí động



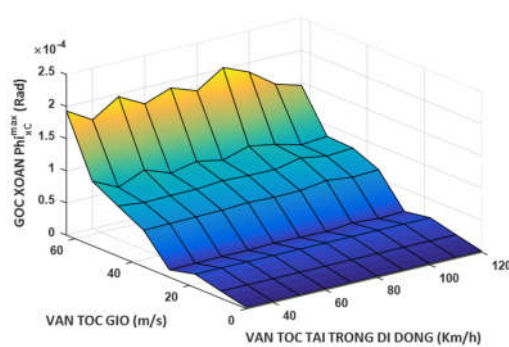
Hình 3.74. Chuyển vị điểm C với các vận tốc gió khác nhau

Nhận xét: Khi vận tốc gió tăng dần (không có tải trọng di động), đáp ứng của kết cấu tại một số vị trí quan trọng đều tăng theo thời gian. Hình 3.74 là hai dạng đáp ứng quan trọng nhất của kết cấu khi chịu tác dụng của lực gió, gồm chuyển vị đứng (a,b,c) và dao động xoắn (d) tại chính giữa nhịp dầm. Từ đồ thị xác định được vận tốc tới hạn của dòng khí: $U_{th} = 60 \text{ m/s}$.

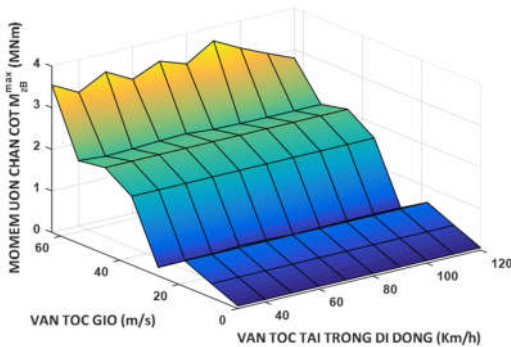
3.3.8. Ảnh hưởng đồng thời của đoàn tải trọng di động và lực khí động



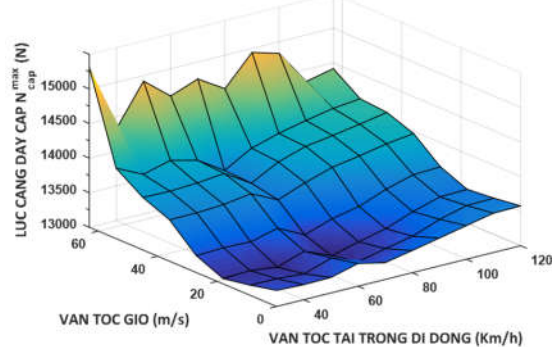
Hình 3.79. Chuyển vị đứng tại C



Hình 3.80. Góc xoắn mặt cắt tại C



Hình 3.82. Mômen uốn chân cột trái



Hình 3.83. Lực căng dây cáp chủ

Nhận xét: Khi vận tốc gió nhỏ, do trọng lượng bản thân nên tốc độ di chuyển khác nhau của các tải trọng di động có ảnh hưởng đáng kể đến đáp ứng động của kết cấu. Tuy nhiên, kết cấu không nhạy cảm với sự thay đổi vận tốc các tải trọng di động trong trường hợp vận tốc gió lớn, bởi khi đó đáp ứng của kết cấu chi phối bởi gió chiếm ưu thế hơn.

3.4. Kết luận chương 3

- Tính được tần số riêng và thể hiện các dạng dao động riêng của kết cấu; khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố: tải trọng, vật liệu, kích thước

hình học của kết cấu,... đến đáp ứng động lực học của hệ liên hợp.

- Các kết quả tính toán và nhận xét có tác dụng định hướng trong việc tính toán, lựa chọn các tham số thiết kế hợp lý cho các công trình liên hợp như cầu dây văng, cổng chào, tháp truyền thông, chịu tác dụng của tải trọng khí động cũng như tải trọng di động.

CHƯƠNG 4

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM PHẢN ỨNG ĐỘNG CỦA KẾT CẤU DẦM ĐÔI – DÂY – CỘT – THANH CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG DI ĐỘNG

4.1. Mục đích thí nghiệm

1. Xem xét trực quan, định hướng phản ứng động của mô hình dầm đôi-dây-cột-thanh bằng vật liệu thép tiêu chuẩn chịu nhiều khối lượng di động bằng phương pháp thực nghiệm trong phòng thí nghiệm.

2. Góp phần kiểm tra mức độ phù hợp của thuật toán và chương trình tính COMLAF_2017 đã lập trong chương 2.

4.2. Địa điểm, mô hình và các thiết bị thí nghiệm

Thí nghiệm được thực hiện trên mô hình tại phòng thí nghiệm Sức bền vật liệu – Học viện Kỹ thuật Quân sự.

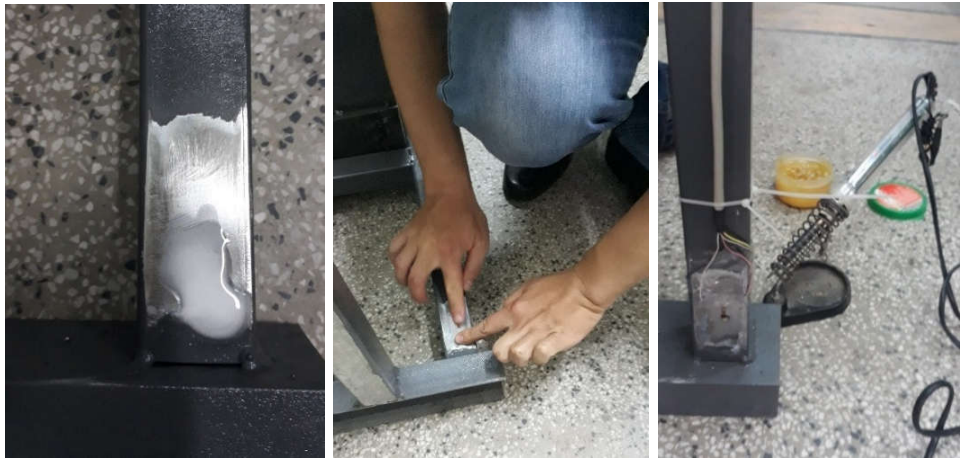


Hình 4.1. Mô hình thí nghiệm

Thiết bị thí nghiệm gồm 2 nhóm: Nhóm gây tải và nhóm thiết bị đo, trong đó nhóm thiết bị gây tải gồm xe 4 bánh, động cơ không đồng bộ 3 pha rô to ngắn mạch; nhóm thiết bị đo gồm hệ thống máy đo LMS, cảm biến gia tốc PCB Piezotronic, tấm điện trở đo biến dạng KFG-5-120-C1-11.

4.3. Phương pháp xác định gia tốc, chuyển vị và biến dạng của kết cấu

Để xác định đáp ứng động tại vị trí nào đó thuộc kết cấu, cần tiến hành gắn tấm điện trở trên bề mặt kết cấu, gắn đầu đo gia tốc cố định tại điểm cần đo. Dưới tác dụng của tải trọng, đầu đo sẽ dao động theo cùng với kết cấu. Khi đó, tín hiệu đáp ứng theo thời gian từ đầu đo được truyền về máy tính của thiết bị đo và hiển thị trên màn hình. Từ bộ số liệu thu thập được, phần mềm LMS Testlab phân tích và kết quả cho ta đáp ứng vận tốc và chuyển vị theo thời gian tại các điểm đo, theo phương được đo.



Hình 4.6. Quy trình gắn tấm điện trở đo biến dạng

4.4. Phân tích và xử lý kết quả thí nghiệm

Việc thu thập, tích hợp số liệu (đáp ứng gia tốc, vận tốc, chuyển vị và biến dạng tại những điểm cần đo theo thời gian) của mỗi lần thí nghiệm được máy tính chuyên dụng của bộ thiết bị đo LMS thực hiện. Để có được kết quả đo trung bình, tác giả phải tiến hành đo đặc nhiều lần rồi xử lý thống kê. Theo đó, giá trị lớn nhất là trung bình cộng của các giá trị lớn nhất các lần đo do đáp ứng theo thời gian của mỗi lần đo là khác nhau.

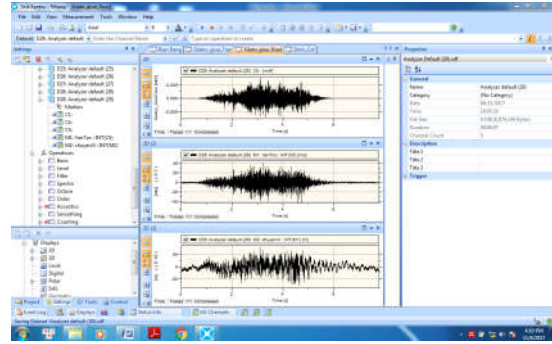
4.5. Thí nghiệm và kết quả đạt được

4.5.1. Mô tả thí nghiệm

Tại phía dưới của dầm trên (vị trí E gần sát cột) và chân cột trái (điểm B) tiến hành gắn tấm điện trở đo đáp ứng biến dạng (Hình 4.6). Đầu đo gia tốc được gắn tại vị trí giữa dầm trên (điểm C), dầm dưới (điểm D) và đỉnh cột trái (điểm A). Thực hiện thí nghiệm với các trường hợp khác nhau:

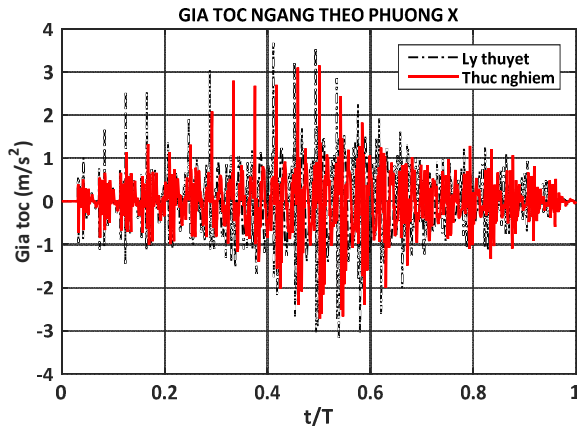
- Trường hợp 1: Một xe có khối lượng $m=7\text{kg}$ chuyển động dọc theo tầng trên hoặc tầng dưới của kết cấu.
- Trường hợp 2: Đoàn tải trọng gồm ba xe, mỗi xe có khối lượng $m=2\text{kg}$, chuyển động dọc theo tầng trên hoặc tầng dưới của kết cấu.

4.5.2. Thí nghiệm trên kết cấu liên hợp chịu một khối lượng di động

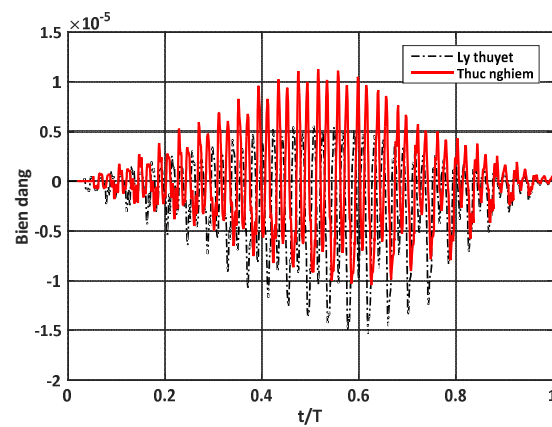


Hình 4.8. Quan sát thí nghiệm **Hình 4.9.** Kết quả dữ liệu một lần đo

Kết quả bộ số liệu thí nghiệm sau khi được tác giả xử lý thống kê trên phần mềm Matlab và so sánh với kết quả tính toán bằng chương trình COMLAF_2017 đã lập



Hình 4.10. Gia tốc ngang tại A

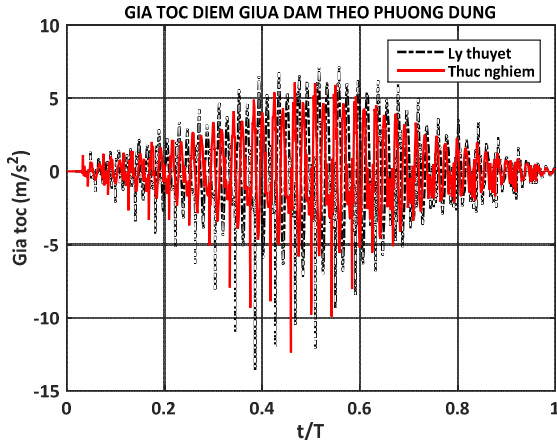


Hình 4.11. Biến dạng dọc tại E

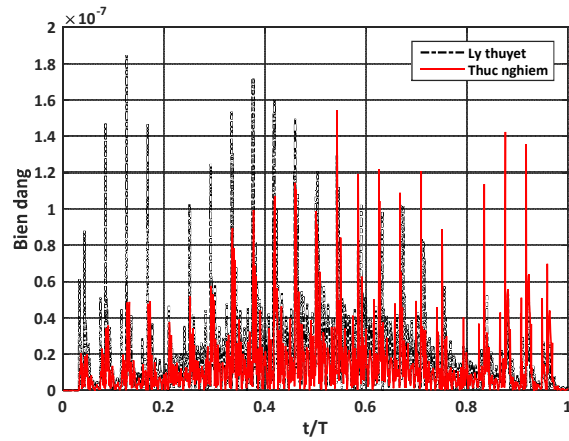
Bảng 4.2. Giá trị đáp ứng lớn nhất của kết cấu liên hợp
(Trường hợp hệ chịu một khối lượng di động)

	Đầu đo	Lý thuyết	Thực nghiệm	Sai số [%]
Gia tốc	A (m/s^2)	3,75	3,24	15,7
	C (m/s^2)	12,12	10,97	10,5
	D (m/s^2)	12,50	10,58	15,2
Biến dạng	B	$1,42 \cdot 10^{-7}$	$1,28 \cdot 10^{-7}$	10,9
	E	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-5}$	17,2

4.5.3. Thí nghiệm hệ liên hợp chịu tác dụng của đoàn tải trọng di động



Hình 4.13. Gia tốc đứng tại C



Hình 4.14. Biến dạng dọc tại B

Bảng 4.3. Giá trị đáp ứng lớn nhất của kết cấu

(Trường hợp hệ chịu tác dụng của đoàn tải trọng di động)

	Đầu đo	Lý thuyết	Thực nghiệm	Sai số [%]
Gia tốc	A (m/s^2)	4,34	3,65	18,9
	C (m/s^2)	13,86	12,75	8,7
	D (m/s^2)	14,32	12,95	10,6
Biến dạng	B	$1,79 \cdot 10^{-7}$	$1,52 \cdot 10^{-7}$	17,8
	E	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$	19,9

Nhận xét: Đáp ứng gia tốc và biến dạng theo thời gian tại các điểm đo trong thí nghiệm và lý thuyết là phù hợp về mặt quy luật. Sai số với bài toán đoàn tải trọng di động lớn hơn trường hợp một tải trọng di động tác dụng lên kết cấu, tuy nhiên giá trị lớn nhất ứng với hai phương pháp đều nhỏ hơn 20%, theo tác giả giá trị sai số này là chấp nhận được.

4.6. Kết luận chương 4

- Kết quả thực nghiệm và tính toán lý thuyết bằng chương trình tính COMLAF_2017 trên mô hình thực nghiệm tương tự là khá đồng dạng về quy luật, sai số trong phạm vi chấp nhận được, điều này cho phép góp phần khẳng định độ tin cậy của chương trình tính COMLAF_2017.

- Bộ số liệu thí nghiệm làm phong phú, bổ sung thêm tài liệu nghiên cứu về đáp ứng động của kết cấu liên hợp mô phỏng cầu dây văng chịu tác dụng của tải trọng di động.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Những đóng góp mới của luận án

1. Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn xây dựng phương trình và thuật toán xác định phản ứng động lực học của hệ liên hợp dầm đôi-dây-cột-thanh chịu tác dụng của tải trọng di động và lực khí động.

2. Xây dựng được bộ chương trình tính COMLAF_2017 trong môi trường Matlab, làm công cụ phân tích động lực học tuyến tính của hệ liên hợp chịu tải trọng di động, lực khí động và đồng thời cả hai tải trọng trên. Chương trình tính đã được kiểm chứng cho thấy bảo đảm độ tin cậy.

3. Khảo sát số phong phú trên nhiều thí dụ sát với thực tế, với sự thay đổi về thông số tải trọng, vật liệu, kích thước hình học, có và không có thiết bị TMD, để nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố đó đến các thông số động lực học của hệ. Các nhận xét có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

4. Thiết kế mô hình dầm đôi – dây – cột – thanh bằng vật liệu thép tiêu chuẩn. Thực hiện thí nghiệm mô hình trong phòng với hệ liên hợp chịu tải trọng di động, có được các số liệu đáp ứng động của hệ.

2. Nhận xét và kiến nghị

1. Luận án đã giải quyết được bài toán kết cấu dầm đôi – dây – cột – thanh chịu tác dụng đồng thời cả tải trọng di động và lực khí động. Đây là một cơ sở khoa học cho các nghiên cứu tiếp theo đối với các hệ liên hợp phức tạp khác như tấm – dây – cột, vỏ - dây – cột, ... chịu tác dụng đồng thời của nhiều dạng tải trọng: lực khí động, tải trọng di động, tải trọng động đất, tải trọng sóng xung kích, ...

2. Tương tác qua lại giữa kết cấu với tải trọng di động và lực khí động có ảnh hưởng rất lớn đến đáp ứng động của hệ, đặc biệt trong trường hợp vận tốc các dạng tải trọng này lớn. Vì vậy, với mỗi kết cấu liên hợp cụ thể cần xác định được giá trị vận tốc tới hạn để khuyến cáo trong quá trình thiết kế, xây dựng và sử dụng.

3. Những nhận xét rút ra từ luận án giúp cho người thiết kế có cơ sở để lựa chọn hợp lý các chi tiết và vật liệu kết cấu.

CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Nguyễn Thái Chung, Nguyễn Thị Cẩm Nhung, Lê Xuân Thùy, Nguyễn Văn Đăng, Lê Hoàng Anh (2012), “Phân tích động lực hệ liên hợp dầm đôi-dây-cột-thanh chịu tác dụng của tải trọng di động”, *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật số 147* – Học viện KTQS, tr 128-137.
2. Nguyễn Thái Chung, Nguyễn Thị Cẩm Nhung (2014), “Nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố đến phản ứng động của hệ liên hợp dầm đôi – dây – cột chịu tác dụng của tải trọng di động”, *Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc*, ISBN 978-604-913-235-3, tr.73-82.
3. Nguyễn Thái Chung, Nguyễn Thị Cẩm Nhung, Vũ Anh Tuấn (2015), “Phân tích động lực học hệ liên hợp dầm đôi – dây – cột chịu tác dụng của lực khí động”, *Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc*, tập 2, NXB Đà Nẵng, ISBN: 978-604-84-1273-9, tr51-61.
4. Nguyễn Thị Cẩm Nhung (2015), “Nghiên cứu lựa chọn các thông số hợp lý của TMD nhằm giảm dao động hệ liên hợp chịu tác dụng của tải trọng di động”, *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật*, số 164, tr.111-120.
5. Hoàng Xuân Lược, Nguyễn Thị Cẩm Nhung (2016), “Phân tích động lực học hệ liên hợp dầm đôi-dây-cột-thanh chịu tác dụng của hệ dao động di động và lực khí động”, *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật*, số 179, tr255-260.
6. Hoàng Xuân Lược, Nguyễn Thị Cẩm Nhung (2017), “Nghiên cứu dao động hệ liên hợp dầm đôi – dây – cột – thanh chịu tác dụng của nhiều tải trọng di động”, *Tạp chí Xây Dựng* 9-2017, ISSN 0866-0762, tr.73-76.
7. Nguyen Thi Cam Nhung, Hoang Xuan Luong, Nguyen Thai Chung and Bui Manh Cuong (2017), “Numerical and experimental study on the dynamic response of the double beams-cables-columns system subjected to moving loads”, *The Tenth Nationnal Conference on Mechanics* (accepted).
8. Nguyễn Thái Chung, Nguyễn Thị Cẩm Nhung, Lê Xuân Thùy (2017), “Phân tích động lực học hệ liên hợp dầm cong – dây – tấm chịu tác dụng của tải trọng di động”, *Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ 10* (chấp nhận đăng).
9. Nguyen Thi Cam Nhung, Nguyen Thai Chung and Hoang Xuan Luong (2017), “Modeling of a beam-cable structure with a two node catenary cable element for analysis of aerodynamic vibrations”, *The Tenth Nationnal Conference on Mechanics* (accepted)