

XÁC ĐỊNH TẢI TRỌNG TÁC DỤNG LÊN KẾT CẤU DẦM GIẢN ĐƠN DỰA TRÊN SỐ LIỆU ĐO ĐỘ VÔNG

Nguyễn Quốc Bảo^{a,*}, Hoàng Tiến^b, Nguyễn Hùng Sơn^a

^aKhoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,

55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bPhòng thí nghiệm Navier, Trường Đại học Cầu đường, 6-8 avenue Blaise-Pascal Cité Descartes,
77455 Champs-sur-Marne, Marne-la-Vallée cedex 2, Pháp

Nhận ngày 26/01/2024, Sửa xong 29/3/2024, Chấp nhận đăng 09/4/2024

Tóm tắt

Việc xác định tải trọng khai thác tác dụng lên kết cấu công trình là một vấn đề được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu do tải trọng khai thác có thể ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe cũng như tuổi thọ công trình. Bài báo này tổng hợp và phân tích cơ sở lý thuyết của việc xác định tải trọng tác dụng lên một dầm giản đơn. Hai phương pháp xác định tải trọng khai thác được đề xuất ứng dụng, bao gồm: (1) phương pháp BPM, dựa trên số liệu đo độ võng dưới tác dụng của tải trọng khai thác và các đặc trưng hình học, vật liệu của dầm; và (2) phương pháp SLM, dựa trên số liệu đo độ võng dưới tác dụng của tải trọng khai thác và số liệu đo độ võng dưới tác dụng của tải trọng chuẩn. Ngoài ra, phương pháp cân tải trọng (LWM) cũng được thực hiện để so sánh, đối chứng với hai phương pháp nêu trên. Bằng phương pháp giải tích, mô hình số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn và mô hình thực nghiệm, bài báo đã mở ra khả năng áp dụng phương pháp xác định tải trọng vào các công trình thực tế.

Từ khoá: tải trọng khai thác; tải trọng chuẩn; độ võng; thực nghiệm; phương pháp số.

DETERMINATION OF THE LOAD APPLIED ON A SIMPLE SUPPORTED BEAM BASED ON MEASURED DEFLECTION DATA

Abstract

Many scientists are interested in the research issue of determining the service loads acting on existing structures, as these loads can significantly affect both the health and longevity of the structures. The present article synthesizes and analyzes the theoretical basis for determining the loads acting on a simple supported beam. It proposed two methods to be applied, including: (1) the Beam Property-based Method (BPM), which relies on measured deflection data under the service loads and considers the geometric, material characteristics of the beam; and (2) the Standard Load-based Method (SLM), which compares the measured deflection data under the service loads with the data obtained under the standard load. Moreover, the load weighing method (LWM) is also implemented for comparison with the two methods mentioned above. Through theoretical analysis, numerical models using the finite element method and experimental models, this article explores the feasibility of applying these methods to real projects.

Keywords: service load; standard load; deflection; experimentation; numerical method.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(2V\)-05](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(2V)-05) © 2024 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Khi các ngành công nghiệp và dịch vụ ngày một phát triển thì nhu cầu vận tải hàng hóa và vận tải hành khách ngày một tăng cao, kéo theo sự gia tăng về tải trọng khai thác của các xe lưu thông trên hệ thống giao thông đường bộ; trong đó cầu là một công trình nhân tạo trên tuyến, đảm bảo sự thông suốt trên toàn tuyến, [1]. Thông thường, các công trình cầu được thiết kế theo Tiêu chuẩn để chịu được

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: baong@huce.edu.vn (Bảo, N. Q.)

một số loại tải trọng nhất định, trong đó có hoạt tải xe thiết kế. Tuy nhiên, trong trường hợp xe khai thác vượt quá tải trọng cho phép lưu thông trên cầu có thể gây ra những vấn đề nghiêm trọng, dẫn đến nguy cơ giảm độ bền, độ ổn định và tuổi thọ của cầu, tiềm ẩn những nguy cơ tai nạn và có thể gây tổn thất về tính mạng con người, [2]. Để đảm bảo an toàn cũng như tăng thời gian khai thác cho công trình cầu, công tác kiểm soát tải trọng xe qua cầu trở nên rất cần thiết, [3, 4]. Ngoài ra, các thông tin về tải trọng xe qua cầu còn được dùng để đưa ra quyết định về chế độ duy tu, bảo dưỡng và gia cường cầu trong tương lai, [5, 6]. Việc xác định và theo dõi tải trọng có thể giúp tìm ra những bộ phận của cầu cần được kiểm tra, bảo trì, hoặc thậm chí là sửa chữa, thay thế để đảm bảo các tiêu chuẩn an toàn, [7–9]. Hơn nữa, việc xác định tải trọng xe qua cầu cũng có thể giúp tối ưu hóa việc khai thác cầu.

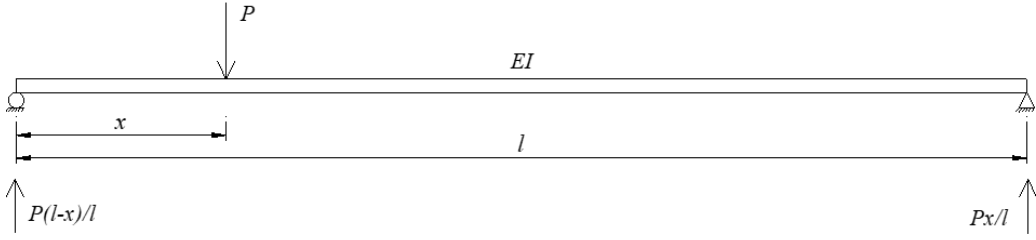
Việc xác định tải trọng xe có thể dựa vào các trạm cân động hoặc các trạm cân di động do kết quả đo tại đây khá chính xác. Tuy nhiên, chi phí đầu tư là con số không nhỏ so với số lượng điểm đặt trạm không lồ trong hệ thống giao thông đường bộ của nước ta. Một cách khác để xác định tải trọng lưu thông trên công trình cầu là áp dụng phương pháp giám sát liên tục. Phương pháp này thu thập và xử lý các số liệu đo, số liệu quan trắc của các đại lượng cơ học của kết cấu thông qua các cảm biến được lắp đặt trên cầu. Do vậy, việc xác định tải trọng khai thác có thể được thực hiện một cách liên tục, theo thời gian thực, đồng thời cũng giúp phát hiện sớm các hư hỏng và nguy cơ sụp đổ của cầu, giảm thiểu tối đa rủi ro, [10–15]. Việc xác định các tải trọng di động trên công trình cầu được thực hiện dựa trên các dữ liệu đo động (phản ứng động) của kết cấu, [16, 17]. Chen et al. [17] đã tiến hành các phân tích số và phân tích thực nghiệm để từ đó nhận dạng được các tải trọng động (tải trọng trục) này với độ chính xác và độ tin cậy cao. Hasanov và Baysal [18] đã trình bày bài toán nghịch đảo để xác định tải trọng phân bố tác dụng lên dầm công xôn. Các kết quả giải tích (gần đúng) và kết quả thí nghiệm của dầm công xôn cũng được trình bày trong bài báo [14] trong bài toán tìm giá trị của lực tác dụng chưa biết như: áp lực đất, áp lực gió, lực va đập,... Đối với cầu kiện dầm sử dụng cốt sợi GFRP chịu tải trọng ngắn hạn, bài báo [19] đã tiến hành các thực nghiệm để phân tích, trình bày sự khác biệt về độ võng dưới ảnh hưởng của hàm lượng cốt dọc, cũng như của cấp độ bền bê tông.

Bài báo này tổng hợp và phân tích khả năng ứng dụng vào thực tế một trong những phương pháp xác định tải trọng khai thác qua cầu dựa trên số liệu đo độ võng. Phương pháp giải tích, mô hình số và mô hình thực nghiệm được tổng hợp, xây dựng để khẳng định khả năng ứng dụng của phương pháp. Một kết cấu dầm nhịp giản đơn được quan tâm nghiên cứu trong bài báo này. Khi có số liệu độ võng tại vị trí giữa nhịp dầm do tải trọng khai thác (được giả định là gần như tĩnh) gây ra, các tác giả đã đề xuất áp dụng hai phương pháp xác định tải trọng: (1) Phương pháp BPM: khi các thông số về đặc trưng hình học của dầm và đặc trưng của vật liệu làm dầm được biết chính xác; (2) Phương pháp SLM: thông qua số liệu đo độ võng của một trường hợp tải trọng chuẩn. Ngoài ra, phương pháp cân tải trọng (LWM) cũng được sử dụng để so sánh khả năng ứng dụng của các phương pháp BPM và SLM.

2. Cơ sở lý thuyết xác định tải trọng tác dụng dựa trên độ võng

2.1. Xác định độ võng tại giữa nhịp do tải trọng tập trung gây ra

Xét một dầm nhịp giản đơn (một đầu kê trên gối cố định, một đầu kê trên gối di động) có chiều dài nhịp bằng l . Dầm này có tiết diện không đổi dọc chiều dài và gọi E là mô đun đàn hồi của vật liệu làm dầm, I là mômen quán tính tiết diện dầm. Cho một tải trọng tập trung P gần như tĩnh di chuyển dọc chiều dài dầm. Tại một thời điểm xác định, khi tải trọng P cách gối trái một khoảng cách x , phân lực tại các gối trái và phải của dầm lần lượt là $\frac{P(l-x)}{l}$ và $\frac{Px}{l}$, như thể hiện trên Hình 1. Như vậy có thể xác định giá trị mômen tại tiết diện giữa nhịp khi cho tải trọng P di chuyển dọc theo chiều dài dầm như sau, [20]:



Hình 1. Bố trí chung dầm

$$M_{l/2} = \begin{cases} \frac{Px}{2} & \text{khi } 0 \leq x \leq \frac{l}{2} \\ \frac{P(l-x)}{2} & \text{khi } \frac{l}{2} < x \leq l \end{cases} \quad (1)$$

Nếu gọi y là giá trị độ võng của dầm tại tiết diện giữa nhịp do tải trọng P gây ra thì, [14, 20]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -\frac{M_{l/2}}{EI} \quad (2)$$

Từ các điều kiện biên ($(x = 0; y = 0); (x = l; y = 0); (x = l/2; (dy/dx)_{trái} = (dy/dx)_{phải})$ và các phương trình (1)–(2), giá trị độ võng y có thể tính được như trong phương trình (3) dưới đây:

$$y = \frac{P}{48EI} \begin{cases} (4x^3 - 3xl^2) & \text{khi } 0 \leq x \leq \frac{l}{2} \\ [4(l-x)^3 - 3(l-x)l^2] & \text{khi } \frac{l}{2} < x \leq l \end{cases} \quad (3)$$

2.2. Xác định tải trọng tác dụng dựa trên giá trị đo độ võng và các thông số của dầm (phương pháp BPM) - trường hợp một tải trọng tập trung

Khi này, tích phân của giá trị độ võng y , được tính theo phương trình (3), trên toàn bộ chiều dài nhịp (sau đây gọi là tích phân độ võng) được tính như sau, [21]:

$$\int_0^l y dx = \int_0^{l/2} y dx + \int_{l/2}^l y dx = -\frac{5}{384} \frac{Pl^4}{EI} \quad (4)$$

Ngoài ra, tích phân này có thể được rời rạc hóa trên chiều dài l như dưới đây:

$$\int_0^l y dx = \sum_{i=1}^n y_i \Delta l \quad (5)$$

trong đó n là số đoạn dầm bằng nhau được chia trên chiều dài dầm và Δl là chiều dài đoạn dầm được chia $\Delta l = l/n$; y_i là giá trị độ võng trung bình đo được tại tiết diện giữa nhịp do tải trọng P đặt trong đoạn dầm thứ i gây ra.

Như vậy, với kết quả độ võng tại giữa nhịp khi đặt tải trọng P dọc chiều dài dầm có thể xác định được tích phân độ võng theo các phương trình (4)–(5) và từ đó có thể tính được giá trị tải trọng tác dụng P khi các biến số l , E và I xác định:

$$P = -\frac{384}{5} \frac{EI}{l^4} \sum_{i=1}^n y_i \Delta l \quad (6)$$

2.3. Xác định tải trọng tác dụng dựa trên giá trị đo độ võng và các thông số của dầm (phương pháp BPM) - trường hợp hai hay nhiều tải trọng tập trung

Trường hợp có hai tải trọng tập trung, ký hiệu lần lượt là P_1 và P_2 , cách nhau một khoảng cách cố định là a , được đặt dọc theo chiều dài dầm, mô tả trường hợp một xe tải có hai trục bánh xe theo phương dọc cầu. Khi này, giá trị độ võng tại giữa dầm do các tải trọng này gây ra lần lượt là y_1 và y_2 :

$$y_1 = \frac{P_1}{48EI} \begin{cases} (4x^3 - 3xl^2) & \text{khi } 0 \leq x \leq \frac{l}{2} \\ [4(l-x)^3 - 3(l-x)l^2] & \text{khi } \frac{l}{2} < x \leq l \end{cases} \quad (7)$$

$$y_2 = \frac{P_2}{48EI} \begin{cases} [4(x-a)^3 - 3(x-a)l^2] & \text{khi } a \leq x \leq \frac{l}{2} + a \\ [4(l-(x-a))^3 - 3(l-(x-a))l^2] & \text{khi } \frac{l}{2} + a < x \leq l + a \end{cases} \quad (8)$$

trong đó x là khoảng cách tính từ gối bên trái đến tải trọng P_1 .

Giá trị độ võng do cả hai tải trọng này gây ra có thể được tính theo phương pháp cộng tác dụng. Khi đó, tích phân độ võng do hai tải trọng này gây ra được xác định như sau:

$$\begin{aligned} \int (y_1 + y_2) dx &= \int y_1 dx + \int y_2 dx \\ &= \left(\int_{-\infty}^0 y_1 dx + \int_0^l y_1 dx + \int_l^{+\infty} y_1 dx \right) + \left(\int_{-\infty}^a y_2 dx + \int_a^{l+a} y_2 dx + \int_{l+a}^{+\infty} y_2 dx \right) \\ &= \int_0^l y_1 dx + \int_a^{l+a} y_2 dx = -\frac{5}{384} \frac{(P_1 + P_2) l^4}{EI} = -\frac{5}{384} \frac{Pl^4}{EI} \end{aligned} \quad (9)$$

trong đó $P = P_1 + P_2$. Thực hiện tương tự như trong mục 2.2 sẽ suy ra được phương trình (6). Ngoài ra đối với trường hợp có nhiều tải trọng tập trung hơn (trường hợp xe tải ba trục hay bốn trục), các bước tương tự cũng được thực hiện để có thể chứng minh điều tương tự trong mục 2.2.

2.4. Xác định tải trọng tác dụng dựa trên tải trọng chuẩn (phương pháp SLM)

Việc xác định các giá trị môđun đàn hồi E của vật liệu làm dầm, mômen quán tính I của dầm và chiều dài nhịp trong phòng thí nghiệm hay trong các bài toán lý thuyết là việc làm không quá khó. Tuy nhiên, trên thực tế đối với các công trình xây dựng đang khai thác (các công trình cầu) thì việc xác định chính xác các thông số này là một vấn đề phức tạp và khó khăn. Để giải quyết vấn đề này, việc xác định tải trọng tác dụng trong một thời điểm nào đó có thể tiến hành như sau:

- Bước 1: Xác định tải trọng chuẩn P_0 bằng cách cân tải trọng. Tải trọng chuẩn được định nghĩa là tải trọng đã biết chính xác tổng tải trọng thông qua việc cân tải trọng.
- Bước 2: Xác định độ võng tại tiết diện giữa nhịp y_0 do tải trọng chuẩn P_0 đặt dọc chiều dài dầm gây ra bằng các phép đo độ võng: sử dụng võng kế, toàn đạc điện tử,...
- Bước 3: Xác định tích phân độ võng tại tiết diện giữa nhịp do tải trọng chuẩn P_0 gây ra theo các phương trình (4)–(5):

$$\int_0^l y_0 dx = \sum_{i=1}^n y_{0i} \Delta l = -\frac{5}{384} \frac{P_0 l^4}{EI} \quad (10)$$

- Bước 4: Xác định độ võng tại tiết diện giữa nhịp y_t do tải trọng thực tế P_t đặt dọc chiều dài dầm gây ra, được thực hiện tương tự bước 2.

- Bước 5: Xác định tích phân độ võng tại tiết diện giữa nhịp do tải trọng thực tế P_t gây ra, được thực hiện tương tự bước 4:

$$\int_0^l y_t dx = \sum_{j=1}^m y_{tj} \Delta l = -\frac{5}{384} \frac{P_t l^4}{EI} \quad (11)$$

- Bước 6: Xác định tải trọng tác dụng dựa trên tải trọng chuẩn thông qua các phương trình (10) và (11):

$$\frac{\sum_{j=1}^m y_{tj} \Delta l}{\sum_{i=1}^n y_{0i} \Delta l} = \frac{-\frac{5}{384} \frac{P_t l^4}{EI}}{-\frac{5}{384} \frac{P_0 l^4}{EI}} \Rightarrow P_t = \frac{\sum_{j=1}^m y_{tj} \Delta l}{\sum_{i=1}^n y_{0i} \Delta l} P_0 \quad (12)$$

Phương trình (12) đúng khi các thông số chiều dài nhịp dầm l , mô đun đàn hồi E của vật liệu làm dầm, mô men quán tính I của dầm không đổi trong các lần đo tại bước 2 và 4. Kết quả nhận được trong phương trình (12) cũng phù hợp với nguyên lý cộng tác dụng khi ứng xử là tuyến tính. Trên thực tế, trong giai đoạn khai thác, khi chưa xuất hiện những hư hỏng mới giữa các lần đo thì các thông số nêu trên thường không đổi. Ngoài ra, để tăng tính chính xác cho phép tính, thời điểm thực hiện các phép đo của bước 2 và bước 4 nên gần nhau. Để xác định tính chính xác của phương pháp nêu trên và cũng để minh chứng khả năng áp dụng trong bài toán thực nghiệm từ đó đề xuất áp dụng vào thực tế, các phần tiếp theo sẽ trình bày và so sánh với kết quả nhận được từ phương pháp số cũng như từ phương pháp thực nghiệm.

3. Mô hình số và mô hình thực nghiệm xác nhận tính đúng đắn của phương pháp giải tích

Để xác thực kết quả giải tích, việc xây dựng các mô hình số và mô hình thực nghiệm tương ứng được thực hiện với các số liệu chính như sau:

- Đối tượng thí nghiệm: 01 dầm thép có chiều dài bằng 1171 mm (là giá trị chiều dài trung bình đo được của dầm thép thí nghiệm);

- Mặt cắt ngang dầm thép có dạng hình chữ nhật với chiều dày bằng 9,84 mm và bề rộng bằng 28,34 mm (là các giá trị kích thước trung bình đo được của dầm thép thí nghiệm);

- Vật liệu thép làm dầm có hệ số Poisson bằng 0,3, tỷ trọng bằng 7850 kg/m³ và mô đun đàn hồi bằng 200 GPa;

- Dầm thép được đặt trên một gối cố định và một gối di động, khoảng cách giữa hai gối bằng 1000 mm.

Mô hình số: Phần mềm Abaqus, [22] được lựa chọn như một công cụ số để so sánh với kết quả giải tích. Đây là một trong những bộ phần mềm lớn, rất hữu hiệu và chính xác trong việc mô phỏng, tính toán kết cấu công trình bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Dầm thí nghiệm được mô hình bằng phần tử thanh, có các tham số hình học và vật liệu như đã trình bày ở trên.

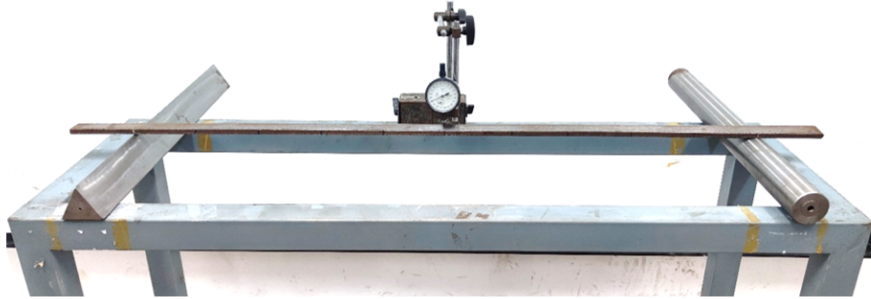
Mô hình thực nghiệm: Toàn bộ mô hình thực nghiệm được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm của Bộ môn Cầu và Công trình ngầm, Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, xem Hình 2:

- Tấm thép có kích thước và thông số vật liệu như mô tả ở phần trên;

- Gối cầu được chế tạo từ vật liệu thép, trong đó gối di động có dạng hình trụ tròn, gối cố định có dạng hình lăng trụ tam giác đều;

- Tải trọng tác dụng lên dầm là các quả nặng (được xác định khối lượng trước) treo tại các vị trí xác định;

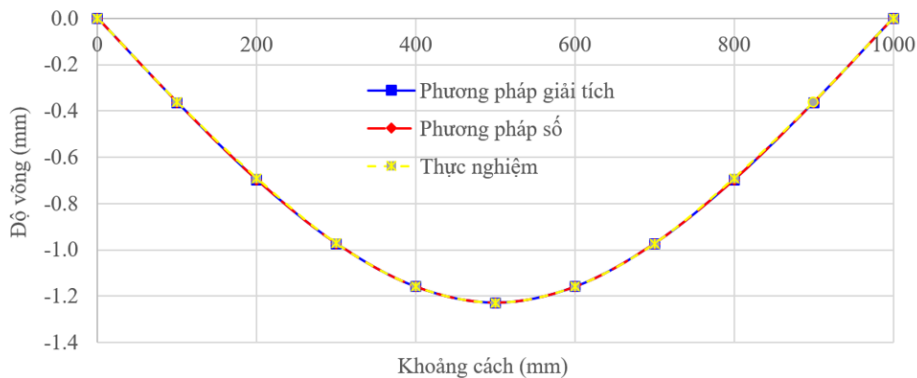
- Độ võng dầm được đo bằng đồng hồ thiên phân kế, với dải đo từ 0-5 mm, độ chính xác lên đến 0,001 mm. Độ võng dầm tại vị trí giữa nhịp được xác định thông qua giá trị trung bình của hiệu số đọc đồng hồ khi có tải và khi không có tải của ba lần đo.



Hình 2. Mô hình thực nghiệm

3.1. Trường hợp 1 – Một tải trọng tập trung

Trong trường hợp này, một tải trọng tập trung có trọng lượng bằng 2,70317 kg (số liệu cân thực tế), được đặt lần lượt tại từng vị trí cách nhau 100 mm dọc chiều dài dầm. Đồ thị độ võng tại giữa dầm nhận được từ phương pháp giải tích, từ phương pháp số và từ thực nghiệm được biểu thị trên Hình 3. Một số giá trị độ võng tại những vị trí cách nhau 100 mm được tổng hợp trong Bảng 1. Như thể hiện trên các hình vẽ và bảng này, đường cong độ võng xác định theo phương pháp giải tích trùng hoàn toàn với đường cong độ võng xác định theo phương pháp số (sai số bằng 0%). Điều đó khẳng định sự thống nhất giữa phương pháp giải tích và phương pháp phần tử hữu hạn. Ngoài ra, kết quả thực nghiệm có sự sai khác rất nhỏ so kết quả giải tích, sai số lớn nhất giữa hai kết quả này là 1,05%. Sai số này có thể xuất phát từ sai số vị trí đặt tải hoặc sai số người đo,... Như vậy có thể nói phương pháp giải tích, mô hình số và mô hình thực nghiệm cho kết quả như nhau.



Hình 3. So sánh độ võng giữa dầm tính theo phương pháp giải tích, phương pháp số và thực nghiệm cho trường hợp 1 (trong đó trục hoành thể hiện khoảng cách từ điểm đặt tải đến gối trái)

Trong Bảng 1, sai số giữa phương pháp thực nghiệm và phương pháp giải tích được tính bằng tỷ số phần trăm giữa hiệu số kết quả giải tích và kết quả thực nghiệm chia cho kết quả giải tích, sai số giữa phương pháp số và phương pháp giải tích được tính bằng tỷ số phần trăm giữa hiệu số kết quả giải tích và kết quả số chia cho kết quả giải tích. Ngoài ra, tích phân độ võng theo chiều dài dầm của cả ba mô hình nêu trên cho kết quả lần lượt là -767,2683; -767,2683 và -759,5000 tương ứng với mô hình giải tích, mô hình số và mô hình thực nghiệm. Hai kết quả đầu bằng với giá trị $-\frac{5}{384} \frac{Pl^4}{EI}$ nhận

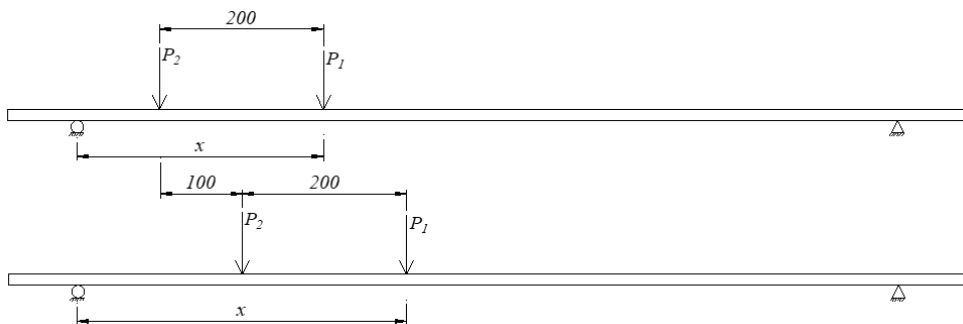
được từ phương trình (5), trong khi kết quả cuối cùng sai khác 1,01% được đánh giá là nhỏ. Sự sai khác này xuất phát từ sai số 1,05% được giải thích ở trên và việc rời rạc hóa tích phân khi chia đàm thí nghiệm làm 10 đoạn nhỏ.

Bảng 1. So sánh độ võng giữa đàm tính theo phương pháp giải tích, phương pháp số và thực nghiệm cho trường hợp 1

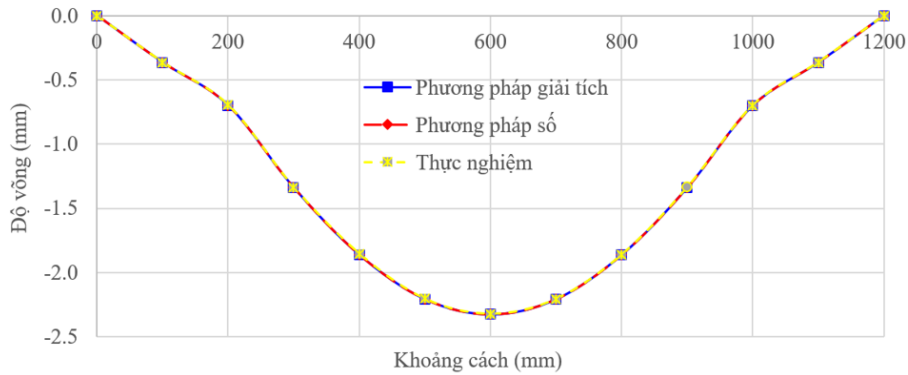
x (mm)	Độ võng (mm)			Sai số	
	Phương pháp giải tích	Phương pháp số	Thực nghiệm	Phương pháp số vs. Giải tích	Thực nghiệm vs. Giải tích
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%	0,00%
100	-0,3634	-0,3634	-0,3620	0,00%	0,38%
200	-0,6973	-0,6973	-0,6900	0,00%	1,05%
300	-0,9723	-0,9723	-0,9720	0,00%	0,03%
400	-1,1589	-1,1589	-1,1590	0,00%	-0,01%
500	-1,2276	-1,2276	-1,2280	0,00%	-0,03%
600	-1,1589	-1,1589	-1,1590	0,00%	-0,01%
700	-0,9723	-0,9723	-0,9730	0,00%	-0,07%
800	-0,6973	-0,6973	-0,6900	0,00%	1,05%
900	-0,3634	-0,3634	-0,3620	0,00%	0,38%
1000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%	0,00%

3.2. Trường hợp 2 – Hai tải trọng tập trung với khoảng cách không đổi

Trường hợp thứ hai xem xét hai tải trọng tập trung đặt cách nhau 200 mm, trong đó: tải trọng tập trung thứ nhất P_1 có trọng lượng bằng 2,70317 kg (số liệu cân thực tế) và tải trọng tập trung thứ hai P_2 có trọng lượng bằng 2,71486 kg (số liệu cân thực tế) - trường hợp hai tải trọng xấp xỉ bằng nhau. Hai tải trọng này được “di chuyển” tịnh tiến đồng thời dọc chiều dài đàm và được coi như gần như tĩnh. Hình 4 thể hiện vị trí đặt tải giữa hai lần đo liên tiếp. Hình 5 thể hiện đồ thị độ võng tại giữa đàm nhận được từ phương pháp giải tích, từ phương pháp số và từ thực nghiệm. Một số giá trị độ võng tại giữa đàm được tổng hợp trong Bảng 2, trong đó giá trị khoảng cách x thể hiện vị trí của tải trọng thứ 1 (P_1) so với gối trái. Khi tải trọng P_1 cách đầu đàm dưới 200 mm, tải trọng P_2 chưa gây ra độ võng cho đàm; đồng thời, khi khoảng cách này từ 1000-1200 mm, chỉ duy nhất tải trọng P_2 gây ra độ võng cho đàm. Hình 5 và Bảng 2 đều cho thấy giá trị độ võng gây ra bởi hai tải trọng tập trung theo kết quả giải tích trùng với kết quả số; giá trị thực nghiệm có sai số lớn nhất là 0,67%.



Hình 4. Vị trí đặt tải giữa hai lần đo liên tiếp trong trường hợp 2 – hai tải tập trung



Hình 5. So sánh độ võng giữa dầm tính theo phương pháp giải tích, phương pháp số và thực nghiệm cho trường hợp 2

Bảng 2. So sánh độ võng dầm tính theo phương pháp giải tích, phương pháp số và thực nghiệm cho trường hợp 2

x (mm)	Độ võng (mm)			Sai số	
	Phương pháp giải tích	Phương pháp số	Thực nghiệm	Phương pháp số vs. Giải tích	Thực nghiệm vs. Giải tích
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%	0,00%
100	-0,3634	-0,3634	-0,3625	0,00%	0,24%
200	-0,6973	-0,6973	-0,6955	0,00%	0,26%
300	-1,3372	-1,3372	-1,3355	0,00%	0,13%
400	-1,8592	-1,8592	-1,8525	0,00%	0,36%
500	-2,2041	-2,2041	-2,2035	0,00%	0,03%
600	-2,3228	-2,3228	-2,3205	0,00%	0,10%
700	-2,2052	-2,2052	-2,2055	0,00%	-0,01%
800	-1,8612	-1,8612	-1,8615	0,00%	-0,02%
900	-1,3399	-1,3399	-1,3365	0,00%	0,25%
1000	-0,7003	-0,7003	-0,6985	0,00%	0,26%
1100	-0,3649	-0,3649	-0,3625	0,00%	0,67%
1200	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%	0,00%

Giá trị tích phân độ võng theo chiều dài dầm của cả ba phương pháp giải tích, số và thực nghiệm cho kết quả lần lượt là -1537,8547; -1537,8547 và -1523,4500. Giá trị nhận được từ mô hình giải tích và mô hình số bằng $-\frac{5}{384} \frac{Pl^4}{EI}$ (tính theo phương trình (5)). Giá trị thực nghiệm có sai khác 0,94% được đánh giá là khá nhỏ. Sự sai khác này xuất phát từ sai số đo võng được giải thích ở trên và việc rời rạc hóa tích phân. Từ kết quả của hai trường hợp tải trọng 1 và 2 mở ra khả năng xác định tải trọng khai thác.

4. Xác định tải trọng tác dụng dựa trên giá trị độ võng đo

4.1. Trường hợp 3 – Một tải trọng tập trung

Trường hợp này xem xét một tải trọng tập trung có trọng lượng X_3 (kg) được đặt dọc chiều dài dầm tương tự trường hợp 1. Bảng 3 tổng hợp giá trị độ võng đo của trường hợp 1 và trường hợp 3. Khi này, giá trị tải trọng tác dụng có thể được xác định theo các phương pháp như sau:

- Phương pháp BPM: Theo phương trình (6): bằng 50,7988 N, tương đương 5,17827 kg.
- Phương pháp SLM: Theo phương trình (12): bằng 51,3184 N, tương đương 5,23123 kg.
- Phương pháp LWM: Cân xác định trọng lượng của tải trọng: bằng 51,5575 N, tương đương 5,25561 kg.

Như vậy, tải trọng được xác định theo phương pháp BPM sai khác so với phương pháp LWM là 1,47%, trong khi tải trọng được xác định theo phương pháp SLM sai khác so với phương pháp LWM là 0,46%. Các sai khác này là khá nhỏ và chấp nhận được trong việc xác định tải trọng tác dụng dựa trên giá trị độ võng đo. Phương pháp SLM có ưu điểm hơn so với phương pháp BPM do không cần xác định các đặc trưng của kết cấu trong các lần thử nghiệm.

4.2. Trường hợp 4 – Hai tải trọng tập trung khác nhau

Xét hai tải trọng tập trung có trọng lượng lần lượt là X_{41} và X_{42} (kg), cách nhau một khoảng là 200 mm, đặt theo dọc chiều dài dầm (tải trọng X_{41} được đặt cách xa tải trọng X_{42} so với gối trái). Giá trị thực nghiệm về độ võng của dầm tại vị trí giữa nhịp do hai tải trọng này gây ra, cũng như của trường hợp 2 được ghi nhận trong Bảng 3. Thực hiện tương tự theo ba phương pháp xác định giá trị tải trọng tác dụng như ở phần trên:

- Phương pháp BPM: Theo phương trình (6), tổng giá trị tải trọng tác dụng bằng 62,34585 N, tương đương 6,3553 kg.

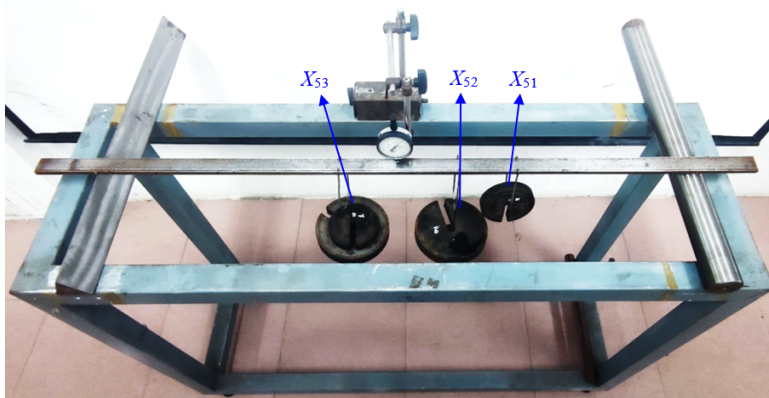
- Phương pháp SLM: Theo phương trình (12), tổng giá trị tải trọng tác dụng bằng 62,9353 N, tương đương 6,41543 kg.

- Phương pháp LWM: Cân xác định tổng tải trọng: bằng 62,9577 N, tương đương 6,41771 kg, trong đó là X_{41} bằng 2,70317 kg và X_{42} bằng 3,71454 kg.

Tổng tải trọng xác định theo phương pháp BPM sai khác so với phương pháp LWM khoảng 0,97%, tổng tải trọng được xác định theo phương pháp SLM sai khác so với phương pháp LWM là 0,04%. Những sai khác này là khá nhỏ và có thể chấp nhận được trong việc xác định tải trọng tác dụng dựa trên giá trị độ võng đo.

4.3. Trường hợp 5 – Ba tải trọng tập trung

Trường hợp cuối cùng được xem xét gồm ba tải trọng tập trung có trọng lượng lần lượt là X_{51} , X_{52} và X_{53} (kg) đặt cách nhau một khoảng lần lượt là 100 mm và 200 mm, theo dọc chiều dài dầm, xem Hình 6, trong đó là X_{51} bằng 1,01552 kg, X_{52} bằng 2,70317 kg và X_{53} bằng 3,71454 kg (xác định bằng phương pháp LWM). Tất cả các giá trị thực nghiệm về độ võng của dầm tại vị trí giữa nhịp cho cả năm trường hợp tải trọng nêu trên được tổng hợp trong Bảng 3.



Hình 6. Mô hình thực nghiệm trường hợp 5 – ba tải tập trung

Bảng 3. Giá trị độ võng thực nghiệm của năm trường hợp nghiên cứu

x (mm)	Độ võng (mm)				
	Trường hợp 1	Trường hợp 2	Trường hợp 3	Trường hợp 4	Trường hợp 5
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
100	-0,3620	-0,3625	-0,6910	-0,3610	-0,1355
200	-0,6900	-0,6955	-1,3410	-0,6920	-0,6225
300	-0,9720	-1,3355	-1,8820	-1,4680	-1,0595
400	-1,1590	-1,8525	-2,2450	-2,1120	-1,8985
500	-1,2280	-2,2035	-2,3820	-2,5560	-2,5705
600	-1,1590	-2,3205	-2,2480	-2,7500	-2,9965
700	-0,9730	-2,2055	-1,8810	-2,6600	-3,1115
800	-0,6900	-1,8615	-1,3410	-2,2860	-2,9245
900	-0,3620	-1,3365	-0,6870	-1,6980	-2,4265
1000	0,0000	-0,6985	0,0000	-0,9590	-1,6965
1100		-0,3625		-0,4970	-0,9555
1200		0,0000		0,0000	-0,4955
1300					0,0000

Giá trị tích phân độ võng thực nghiệm của năm trường hợp nghiên cứu được xác định lần lượt là 759,500; 1523,450; 1469,800; 1803,9 và 2089,3. Khi này nếu coi trường hợp 1 là tải trọng chuẩn (được cân chỉnh xác và bằng 2,70317 kg) thì tải trọng của cả bốn trường hợp từ 2 đến 5 được tính theo phương pháp SLM lần lượt bằng: 5,42218 kg; 5,23123 kg; 6,42034 kg và 7,43612 kg. Nếu xác định theo phương pháp LWM thì tải trọng của bốn trường hợp nêu trên lần lượt là: 5,41803 kg; 5,25561 kg; 6,41771 kg và 7,43323 kg. Như vậy, việc xác định tải trọng dựa vào tải trọng chuẩn (phương pháp SLM) của bốn trường hợp từ 2 đến 5 có sai số lần lượt là 0,08%; 0,46%; 0,04% và 0,04%. Các sai số này là không lớn và có thể chấp nhận được.

5. Kết luận

Khi các xe tải có tổng tải trọng ngày càng tăng, gây ra những hậu quả nghiêm trọng đến kết cấu công trình cầu thì việc xác định tải trọng xe qua cầu là một điều cần thiết. Bài báo đã tổng hợp, phân tích cơ sở lý thuyết của việc xác định tải trọng tác dụng dựa trên số liệu đo độ võng của một dầm nhịp giản đơn, từ đó phân tích khả năng áp dụng vào thực tế của hai phương pháp để xác định tải trọng tác dụng lên kết cấu dầm khi biết các đặc trưng hình học và vật liệu của dầm (phương pháp BPM) hoặc sử dụng tải trọng chuẩn (phương pháp SLM). Bài báo đã xây dựng được một mô hình số sử dụng phần tử hữu hạn để khẳng định tính đúng đắn của phương pháp giải tích, đồng thời cũng xây dựng được năm mô hình thực nghiệm với các trường hợp tải trọng có độ lớn khác nhau và/hoặc có số lượng tải trọng khác nhau. Khi xác định dựa vào giá trị đã biết của đặc trưng hình học và đặc trưng vật liệu làm dầm (phương pháp BPM), giá trị tải trọng lệch so với thực tế lớn nhất là 1,47%. Nhược điểm của phương pháp này là việc xác định các đặc trưng hình học và vật liệu của một công trình đang khai thác là điều không dễ. Trong khi đó, khi xác định tải trọng tác dụng dựa vào tải trọng chuẩn (phương pháp SLM), giá trị sai số trong các bài toán thực nghiệm lớn nhất là 0,46%. Điều này mở ra khả năng áp dụng phương pháp xác định tải trọng khai thác dựa vào số liệu đo độ võng do tải trọng này gây ra. Nghiên cứu cần được phát triển trên các loại kết cấu khác nhau: kết cấu liên tục, kết cấu nhịp giản đơn có nhiều dầm và phát triển cho các tải trọng di động trên công trình.

Tài liệu tham khảo

- [1] TCVN 11823:2017. *Tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [2] Nguyễn, Q. B. (2015). Đánh giá độ tin cậy công trình cầu - hiệu ứng dây chuyền. *Tạp chí Cầu đường Việt Nam*, 3:13–19.
- [3] TCVN 12882:2020. *Tiêu chuẩn quốc gia về đánh giá tải trọng khai thác cầu đường bộ*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [4] TCVN 2737:2020. *Tải trọng và tác động - Tiêu chuẩn thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [5] Thảo, N. D., Hùng, V. D. (2021). Nghiên cứu hiệu chỉnh mô hình đánh giá khả năng chịu tải công trình cầu dựa vào số liệu đo đạc thực nghiệm trên mô hình toàn cầu. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 15(7V):36–48.
- [6] Li, H., Wang, T., Wu, G. (2023). [Nonlinear vibration analysis of beam-like bridges with multiple breathing cracks under moving vehicle load](#). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 186:109866.
- [7] Thông tư số 41/2021/TT-BGTVT. *Quy định về quản lý, vận hành khai thác và bảo trì công trình đường bộ*. Bộ Giao thông vận tải.
- [8] Thông tư số 37/2018/TT-BGTVT. *Quy định về quản lý, vận hành khai thác và bảo trì công trình đường bộ*. Bộ Giao thông vận tải.
- [9] Fattorini, F., Salvatore, W., Renzi, E., Tamasi, G. (2023). [Application to the territorial authorities of the “Guidelines for the classification and management of risk, for the evaluation of safety and for the monitoring of existing bridges”](#). The case study of the Municipality of Rome. *Procedia Structural Integrity*, 44:689–696.
- [10] Lobianco, A. L., Zoppo, M. D., Ludovico, M. D. (2023). [Correlation of local and global structural damage state for SHM](#). *Procedia Structural Integrity*, 44:910–917.
- [11] Lan, Y., Zhang, Y., Lin, W. (2023). [Diagnosis algorithms for indirect bridge health monitoring via an optimized AdaBoost-linear SVM](#). *Engineering Structures*, 275:115239.
- [12] Hu, H., Wang, J., Dong, C.-Z., Chen, J., Wang, T. (2023). [A hybrid method for damage detection and condition assessment of hinge joints in hollow slab bridges using physical models and vision-based measurements](#). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 183:109631.
- [13] Nguyen, D. H., Nguyen, Q. B., Bui-Tien, T., De Roeck, G., Abdel Wahab, M. (2020). [Damage detection in girder bridges using modal curvatures gapped smoothing method and Convolutional Neural Network: Application to Bo Nghi bridge](#). *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 109:102728.
- [14] Andersen, P., Mukhopadhyay, S. K. (1950). *Determination of Load Distribution on a Beam from Measurements on its Deflected Form*. University of Minnesota.
- [15] Hoang, T., Duhamel, D., Foret, G., Yin, H. P., Joyez, P., Caby, R. (2017). [Calculation of force distribution for a periodically supported beam subjected to moving loads](#). *Journal of Sound and Vibration*, 388: 327–338.
- [16] Matsuoka, K., Tanaka, H. (2023). [Drive-by deflection estimation method for simple support bridges based on track irregularities measured on a traveling train](#). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 182:109549.
- [17] Chen, Z., Fang, Y., Kong, X., Deng, L. (2023). [Identification of multi-axle vehicle loads on beam type bridge based on minimal residual norm steepest descent method](#). *Journal of Sound and Vibration*, 563: 117866.
- [18] Hasanov, A., Baysal, O. (2014). [Identification of an unknown spatial load distribution in a vibrating cantilevered beam from final overdetermination](#). *Journal of Inverse and Ill-posed Problems*, 23(1):85–102.
- [19] Trần, T. N. H., Đặng, V. H., Phạm, T. T. (2023). [Nghiên cứu thực nghiệm độ võng của cầu kiện bê tông chịu uốn sử dụng cốt sợi GFRP dạng thanh](#). *Proceedings of the International Conference - Celebrating 60 Years of IBST*, 158–163.
- [20] Lều, T. T. (2006). *Cơ học kết cấu tập 1 và 2*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [21] Stanford, J. (2013). *Structural Analysis Made Easy: A Practice Book for Calculating Statically Determined Systems*.
- [22] Smith, M. (2009). *ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9*. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp.