

# PHÂN TÍCH KHẢ NĂNG CHỊU TẢI CẦU BẢN BÊ TÔNG CỐT THÉP ỨNG SUẤT TRƯỚC TRÊN MÔ HÌNH SỐ ĐÃ ĐƯỢC HIỆU CHỈNH TỪ SỐ LIỆU ĐO BIẾN DẠNG DO HOẠT TẢI THỬ NGHIỆM DI ĐỘNG TRÊN CẦU

## ANALYSIS OF LOADING CAPACITY OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE SLAB BRIDGE ON A NUMERICAL MODEL CALIFIED FROM STRAIN MEASUREMENT DATA DUE TO TESTING VEHICLE MOVING ON THE BRIDGE

Nguyễn Duy Thảo\*

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: ndthao@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 11/02/2024; Sửa bài / Revised: 19/4/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 22/4/2024)

**Tóm tắt** - Bài báo giới thiệu phương pháp và kết quả phân tích khả năng chịu tải công trình cầu bản bê tông cốt thép dự ứng lực trên mô hình số có xét đến việc hiệu chỉnh mô hình phân tích từ kết quả đo đạc thực nghiệm biến dạng - ứng suất. Kết cấu cầu được mô hình hóa trên máy tính bằng phương pháp phần tử hữu hạn; các kết quả đo đạc biến dạng - ứng suất được thực hiện trên mô hình cầu Nguyễn Tri Phương Tp. Đà Nẵng dưới tác dụng của xe tải thử nghiệm di chuyển trên cầu gây ra. Các kết quả đo đạc thực nghiệm là cơ sở để điều chỉnh các thông số của mô hình phân tích số sao cho ứng xử của kết cấu phù hợp với các kết quả đo đạc thực nghiệm. Kết quả nghiên cứu cho thấy cầu có khả năng chịu tải lớn hơn so với việc phân tích thông thường và mang lại hiệu quả kinh tế cao trong công tác kiểm định thử tải các công trình cầu.

**Từ khóa** - Biến dạng; ứng suất; cầu bản bê tông cốt thép ứng suất trước; phương pháp phần tử hữu hạn.

### 1. Đặt vấn đề

Hoạt tải khai thác công trình cầu thường có xu hướng tăng dần theo thời gian với quy luật: xe lớn hơn, nặng hơn và di chuyển với tốc độ ngày càng nhanh hơn. Do vậy, để đảm bảo an toàn việc đánh giá khả năng chịu tải là rất cần thiết và cần phải tiến hành thường xuyên định kỳ trong suốt quá trình khai thác sử dụng công trình cầu. Có nhiều công trình nghiên cứu biên soạn các tài liệu hướng dẫn đánh giá cầu ở Hoa kỳ [1-5]; các nghiên cứu này cập nhật liên tục các giá trị hiệu chỉnh về hệ số tải trọng và hệ số sức kháng phù hợp với các cơ sở dữ liệu về sức kháng và tải trọng thay đổi theo thời gian. Bên cạnh việc đánh giá khả năng chịu tải cầu theo hướng phân tích tính toán trên mô hình lý thuyết, thử tải cầu cũng được sử dụng như một công cụ hữu hiệu trong việc xác định khả năng chịu tải thực tế công trình cầu, kiểm chứng lại giả thiết tính toán hay đánh giá khả năng chịu tải công trình cầu dưới tác dụng của các tải trọng đặc biệt. Từ các kết quả thí nghiệm thử tải trên mô hình toàn cầu đã cho thấy, một số kết cấu cầu có khả năng chịu tải trọng lớn hơn giá trị được tính toán theo các kết quả phân tích thông thường. Hiện nay, ở nước ta việc thử tải cầu áp dụng theo các quy định [6-7] bao gồm thử tải tĩnh và thử tải động, trong đó việc thử tải tĩnh phải huy động một số lượng xe thử tải khá lớn để đảm bảo gây tạo hiệu ứng lực tối thiểu 80% giá trị nội lực tiêu chuẩn do hoạt tải

**Abstract** - The paper introduces a method and the results of analyzing the loading capacity of a prestressed reinforced concrete slab bridge structure using numerical modeling, considering the adjustment of the analysis model based on experimental strain-stress measurement results. The bridge structure is computer-modeled using the finite element method; strain-stress measurements are conducted on the model of Nguyen Tri Phuong bridge (Danang city) under the influence of moving test loads on the bridge. The experimental results serve as a basis for adjusting the parameters of the numerical analysis model to ensure the structure behaves in accordance with the experimental measurements. The research results show that the bridge has a higher load-bearing capacity compared to conventional analysis and provides significant economic efficiency in load testing of bridge structures.

**Key words** - Strain; stress; prestressed reinforced concrete slab bridge; finite element method.

thiết kế gây ra. Thử tải tĩnh sẽ cần tốn nhiều thời gian và chi phí thực hiện khi cầu có chiều dài vượt nhịp lớn và nhiều làn xe, thời gian ngừng các phương tiện giao thông qua cầu (đóng cầu) cũng sẽ tăng lên làm ảnh hưởng lớn đến việc khai thác cầu. Để hạn chế các nhược điểm trên, bài báo giới thiệu phương pháp và kết quả phân tích khả năng chịu tải công trình cầu dựa vào kết quả đo biến dạng-ứng suất chỉ do duy nhất một xe tải thử nghiệm di chuyển trên cầu gây ra; các số liệu đo đạc thực nghiệm được sử dụng để hiệu chỉnh mô hình phân tích số kết cấu cầu theo phương pháp lập dần cho đến khi sai số giữa kết quả phân tích trên mô hình và kết quả đo đạc thực nghiệm nằm trong giới hạn cho phép. Mô hình số kết cấu cầu sau khi đã được hiệu chỉnh từ số liệu đo đạc hiện trường sẽ được sử dụng để đánh giá khả năng chịu tải thực tế so với hoạt tải thiết kế hoặc đánh giá cấp phép với các loại tải trọng xe khác nhau, tải trọng đặc biệt (siêu trường, siêu trọng) khi có nhu cầu.

### 2. Trình tự các bước hiệu chỉnh mô hình phân tích kết cấu từ kết quả đo thực nghiệm biến dạng-ứng suất trên sơ đồ toàn cầu

Do nhiều nguyên nhân khác nhau, ứng xử kết cấu công trình cầu thực tế dưới tác dụng của hoạt tải có sự sai khác nhất định so với ứng xử được phân tích trên mô hình lý thuyết. Do vậy, cần thiết phải sử dụng các kết quả đo đạc

<sup>1</sup> The University of Danang–University of Science and Technology, Vietnam (Duy-Thao Nguyen)

biến dạng-ứng suất thực tế để hiệu chỉnh lại mô hình phân tích lý thuyết. Trong kết cấu cầu bản bê tông cốt thép (BTCT) ứng suất trước, các yếu tố hiệu chỉnh thường được chọn như cường độ bê tông dầm, độ cứng hệ liên kết ngang, điều kiện biên, sự phối ngang của hoạt tải... Quá trình thay đổi, hiệu chỉnh các thông số trên được thực hiện như bài toán lặp thử dần cho đến khi thỏa mãn các yêu cầu về sai số biến dạng-ứng suất giữa kết quả phân tích và kết quả đo đạc thực nghiệm. Các nghiên cứu [8] đưa ra các kiến nghị về sai số như sau:

$$Er_a = \sum |\varepsilon_m - \varepsilon_c| \quad (1)$$

$$Er_p = \frac{\sum (\varepsilon_m - \varepsilon_c)^2}{\sum (\varepsilon_m)^2} \quad (2)$$

$$Er_s = \frac{\sum \max |\varepsilon_m - \varepsilon_c|}{\sum \max |\varepsilon_m|} \quad (3)$$

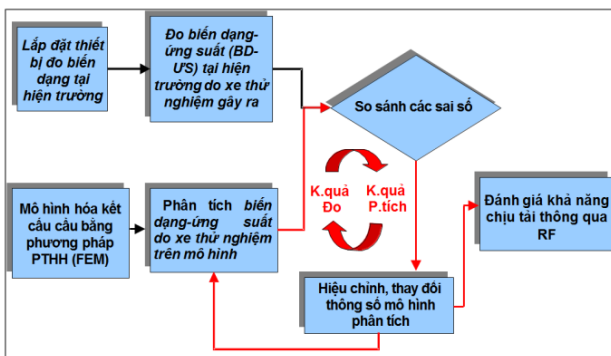
$$\rho = \frac{\sum (\varepsilon_m - \bar{\varepsilon}_m)(\varepsilon_c - \bar{\varepsilon}_c)}{\sum (\varepsilon_m - \bar{\varepsilon}_m)^2 (\varepsilon_c - \bar{\varepsilon}_c)^2} \quad (4)$$

Trong đó:  $Er_a, Er_p, Er_s, \rho$  lần lượt là sai số tuyệt đối, sai số phần trăm, sai số tỷ lệ và hệ số tương quan giữa biến dạng-ứng suất đo thực nghiệm và phân tích lý thuyết trên mô hình số;  $\varepsilon_m, \varepsilon_c$  lần lượt là biến dạng-ứng suất đo thực nghiệm và phân tích lý thuyết;  $\bar{\varepsilon}_m, \bar{\varepsilon}_c$  lần lượt là biến dạng-ứng suất trung bình đo thực nghiệm và phân tích lý thuyết trên mô hình số.

Theo [8], mô hình phân tích lý thuyết được xem là đã hiệu chuẩn theo số liệu đo thực nghiệm khi các giá trị sai số và hệ số tương quan giữa kết quả phân tích trên mô hình và kết quả đo đạc thực nghiệm đảm bảo các yêu cầu sau:  $Er_p < 10\%$ ,  $Er_s < 10\%$  và  $\rho > 0,9$ . Mô hình đã hiệu chuẩn sẽ được sử dụng để đánh giá khả năng chịu tải thực tế thông qua hệ số  $RF$  (Rating Factor) theo [5] và [9] như sau:

$$RF = \frac{C-DL}{LL} = \frac{HL}{LL} \quad (5)$$

Trong đó:  $C$  là sức kháng (khả năng chịu tải) của kết cấu;  $DL$  là hiệu ứng của tải trọng thường xuyên trên kết cấu;  $LL$  là hiệu ứng của hoạt tải trên kết cấu;  $HL = C - DL$  là khả năng chịu hoạt tải của kết cấu.



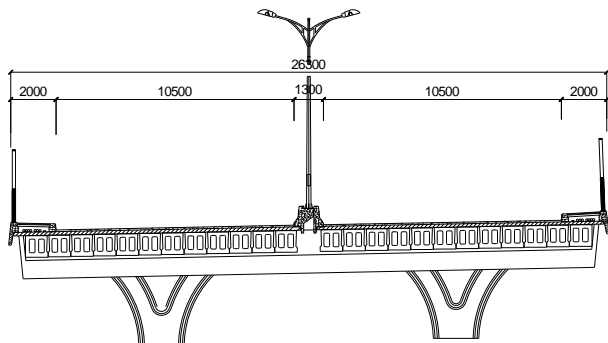
**Hình 1.** Sơ đồ minh họa quá trình phân tích lặp đánh giá tải trọng trên mô hình phân tích được hiệu chỉnh từ kết quả đo biến dạng do xe thử nghiệm gây ra

Khi  $RF \geq 1$ : khả năng chịu hoạt tải lớn hơn hay bằng hiệu ứng của hoạt tải; khi  $RF < 1$ : khả năng chịu hoạt tải nhỏ hơn hiệu ứng của hoạt tải (kết cấu không đảm bảo yêu cầu chịu hoạt tải tương ứng khi đánh giá). Nội dung và trình tự phân tích kết cấu cầu trên mô hình số được điều chỉnh từ số liệu đo biến dạng-ứng suất trên sơ đồ toàn cầu do xe tải thử nghiệm gây ra thể hiện như Hình 1.

### 3. Đánh giá khả năng chịu tải cầu bản BTCT ứng suất trước

#### 3.1. Các số liệu phân tích ban đầu

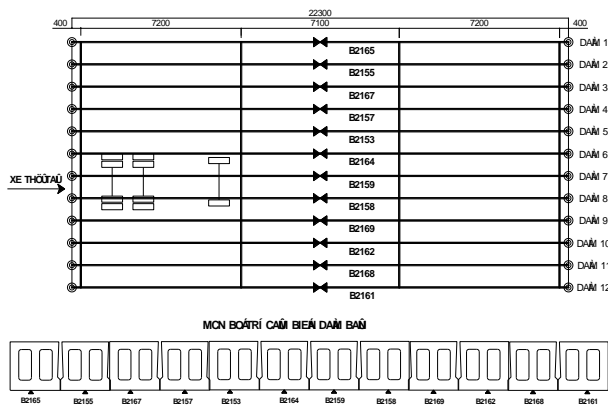
Để thuận lợi cho việc lắp đặt thiết bị đo đạc thực nghiệm trên mô hình toàn cầu tại hiện trường, trong nghiên cứu này cầu bản BTCT ứng suất trước được lựa chọn làm đối tượng nghiên cứu tại phần cầu dẫn, cầu Nguyễn Tri Phương (Tp. Đà Nẵng); cầu bản đơn giản có chiều dài nhịp  $L=22,3m$ ; mặt cắt ngang gồm 24 dầm được bố trí thành hai liên làm việc độc lập như Hình 2.



**Hình 2.** Mặt cắt ngang cầu bản BTCT ứng suất trước

Các thông số ban đầu của cầu bản được lấy theo hồ sơ thiết kế như sau: mô đun đàn hồi dầm  $E_d= 33434$  (N/mm<sup>2</sup>), bản mặt cầu tăng cường dày 15cm có mô đun hàn hồi  $E_b= 27222$  (N/mm<sup>2</sup>), mô men quán tính dầm  $J_d= 5,80.E^{10}$  (mm<sup>4</sup>), mô men quán tính của cáp dự ứng lực căng ngang cầu  $J_{cap}= 45000$  (mm<sup>4</sup>). Các thông số ban đầu này có thể được điều chỉnh thay đổi trong quá trình tính lặp thử dần theo sơ đồ như Hình 1 cho đến khi biến dạng-ứng suất trên mô hình phân tích lý thuyết hiệu chỉnh cho giá trị phù hợp với kết quả đo thực tế tại hiện trường công trình.

#### 3.2. Đo đạc biến dạng-ứng suất công trình cầu do hoạt tải thử nghiệm di động trên cầu



**Hình 3.** Lắp đặt 12 cảm biến đo biến dạng-ứng suất tại vị trí giữa nhịp dầm bản

Sử dụng 12 cảm biến điện tử (ST350-USA) đo biến dạng-ứng suất lắp đặt vào biên dưới dầm bản tại vị trí giữa

nhịp của một liên làm việc độc lập như Hình 3, các thông số của các cảm biến được thể hiện như Bảng 1.

Xe tải thử nghiệm là xe tải có 3 trục, tổng trọng lượng các trục xe 25 (T) được cân đo tại trạm cân trước khi thử nghiệm. Các thông số kích thước cơ sở của xe lấy theo giấy đăng kiểm như Hình 4. Xe tải được điều khiển với tốc độ 5 (km/h) di chuyển qua cầu để gây tạo biến dạng-ứng suất trong kết cấu nhịp cầu bản, các cảm biến sẽ thu thập các số liệu và lưu trữ trên máy tính theo thời gian thực trong quá trình đo đạc thực nghiệm. Để đảm bảo độ chính xác của các số liệu đo đạc, các phương tiện giao thông khác cũng tạm thời ngừng lưu thông qua cầu trong quá trình đo đạc thu thập số liệu biến dạng-ứng suất do xe tải thử nghiệm gây ra.



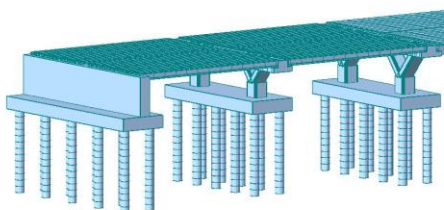
Hình 4. Thông số kích thước, tải trọng xe thử nghiệm trên cầu

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của các cảm biến đo biến dạng- ứng suất trong dầm bản

Cảm biến	Dầm	Chuẩn đo (mm)	Phạm vi đo (( $\mu\epsilon$ ))	Mạch đo ( $\Omega$ )	Độ nhạy ( $\mu\epsilon$ /mV/V)
2165	1	76,2	2000	4x350	599,8
2155	2	76,2	2000	4x350	515,2
2167	3	76,2	2000	4x350	533,8
2157	4	76,2	2000	4x350	528,9
2153	5	76,2	2000	4x350	529,8
2164	6	76,2	2000	4x350	528,0
2159	7	76,2	2000	4x350	559,7
2158	8	76,2	2000	4x350	506,9
2169	9	76,2	2000	4x350	544,1
2162	10	76,2	2000	4x350	533,0
2168	11	76,2	2000	4x350	556,7
2161	12	76,2	2000	4x350	528,0

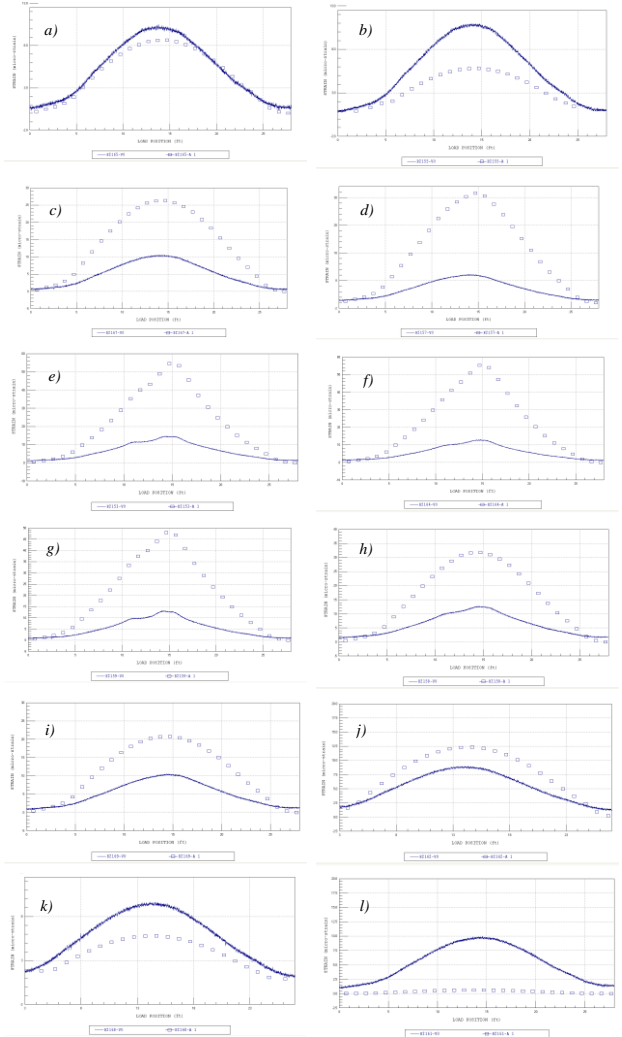
3.3. Mô phỏng kết quả thử nghiệm trên mô hình số và hiệu chỉnh mô hình số từ số liệu đo đạc thực nghiệm biến dạng- ứng suất

Ứng xử của kết cấu dầm bản dưới tác dụng của xe tải thử nghiệm di chuyển trên cầu được mô phỏng trên máy tính bằng phương pháp phần tử hữu hạn (Midas Civil kết hợp xây dựng công cụ tự động nhập số liệu đầu vào của mô hình tính) như Hình 5.



Hình 5. Mô phỏng số ứng xử kết cấu dầm bản bằng FEM

Tiến hành so sánh kết quả phân tích biến dạng- ứng suất tại các vị trí dầm bản trên mô hình số với kết quả đo đạc thực nghiệm được thể hiện như Hình 6. Các kết quả nghiên cứu cho thấy: giá trị biến dạng- ứng suất đo đạc thực nghiệm trên mô hình toàn cầu có sự sai khác nhất định so với kết quả phân tích trên mô hình số và phụ thuộc vào vị trí các dầm bản trên mặt cắt ngang; với các dầm bản ở giữa (phạm vi làn xe thử nghiệm di chuyển trên cầu) biến dạng- ứng suất trên mô hình phân tích lớn hơn so với giá trị đo đạc thực nghiệm tại hiện trường. Trong khi đó, với các dầm bản ngoài biên (hai dầm biên ngoài cùng mỗi phía), biến dạng- ứng suất trên mô hình số cho giá trị nhỏ hơn so với kết quả đo đạc thực nghiệm.



Hình 6. Kết quả biến dạng trên mô hình số chưa hiệu chỉnh (đường dấu □) và kết quả đo thực nghiệm (đường nét liền -): a)-Dầm 1, b)-Dầm 2, c)-Dầm 3, d)-Dầm 4, e)-Dầm 5, f)-Dầm 6, g)-Dầm 7, h)-Dầm 8, i)-Dầm 9, j)-Dầm 10, k)-Dầm 11, l)-Dầm 12

Nguyên nhân của sự sai khác này là do có sự khác biệt về cường độ, độ cứng và sự phân bố tải trọng ngang trên mô hình phân tích số so với ứng xử thực tế làm việc của kết cấu cầu. Do vậy, cần thiết phải điều chỉnh lại mô hình số thông qua các giá trị mô đun đàn hồi dầm  $E_d$ , mô đun đàn hồi bản mặt cầu  $E_b$ , mô men quán tính dầm  $J_d$ , mô men quán tính của cặp dự ứng lực căng ngang cầu  $J_c$ . Quá trình điều chỉnh các thông số của mô hình thực chất là quá trình

tính lặp thứ dần theo sơ đồ như Hình 1, cho đến khi các sai số và hệ số tương quan về kết quả giữa mô hình số và kết quả đo đạc thực nghiệm được thỏa mãn ( $Er_p < 10\%$ ,  $Er_s < 10\%$  và  $\rho > 0,9$ ). Mô hình phân tích số sau khi được hiệu chỉnh được gọi là “mô hình hiệu chuẩn”. Các kết quả so sánh về biến dạng-ứng suất trên “mô hình hiệu chuẩn” so với kết quả đo đạc thực nghiệm được thể hiện như Hình 7. Các thông số của mô hình, sai số và hệ số tương quan giữa kết quả phân tích biến dạng-ứng suất trên các mô hình số (trước và sau hiệu chỉnh) và kết quả đo đạc thực nghiệm sau khi tính lặp thể hiện như Bảng 2.

thực tế của công trình cầu tại hiện trường. Mô hình hiệu chuẩn này sẽ được sử dụng để đánh giá khả năng chịu tải công trình cầu theo hệ số Rating Factor (RF) theo [5], [9].

**Bảng 2.** Các thông số điều chỉnh, sai số và hệ số tương quan giữa kết quả biến dạng-ứng suất trên các mô hình số và kết quả đo đạc thực nghiệm

Thông số	Mô hình ban đầu	Mô hình hiệu chuẩn
Mô đun đàn hồi dầm, $E_d$ (N/mm <sup>2</sup> )	34434	33990
Mô đun đàn hồi BM cầu, $E_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	27222	28580
Mô men quán tính dầm, $J_d$ (mm <sup>2</sup> )	5,80E+10	6,76E+10
Mô men quán tính Cáp ngang, $J_c$ (mm <sup>2</sup> )	45000	56340
Sai số phần trăm, $Er_p$ (%)	432,5	2,6
Sai số tỷ lệ, $Er_s$ (%)	63,0	3,7
Hệ số tương quan, $\rho$	0,85	0,98

**3.4. Đánh giá khả năng chịu tải công trình cầu bản**

Với mô hình số đã được hiệu chuẩn, tiến hành mô phỏng hoạt tải cần đánh giá theo phương pháp phân tử hữu hạn (Midas Civil). Phân tích hiệu ứng của tĩnh tải và hoạt tải HL93 [10] trong kết cấu cầu và đánh giá khả năng chịu hoạt tải theo công thức (5). Kết quả đánh giá khả năng chịu tải đối với xe hai trục và xe ba trục theo chỉ số RF (Trạng thái giới hạn cường độ 1) như Bảng 3, Bảng 4.

**Bảng 3.** Đánh giá khả năng chịu tải đối với xe 2 trục (mô hình đã hiệu chuẩn)

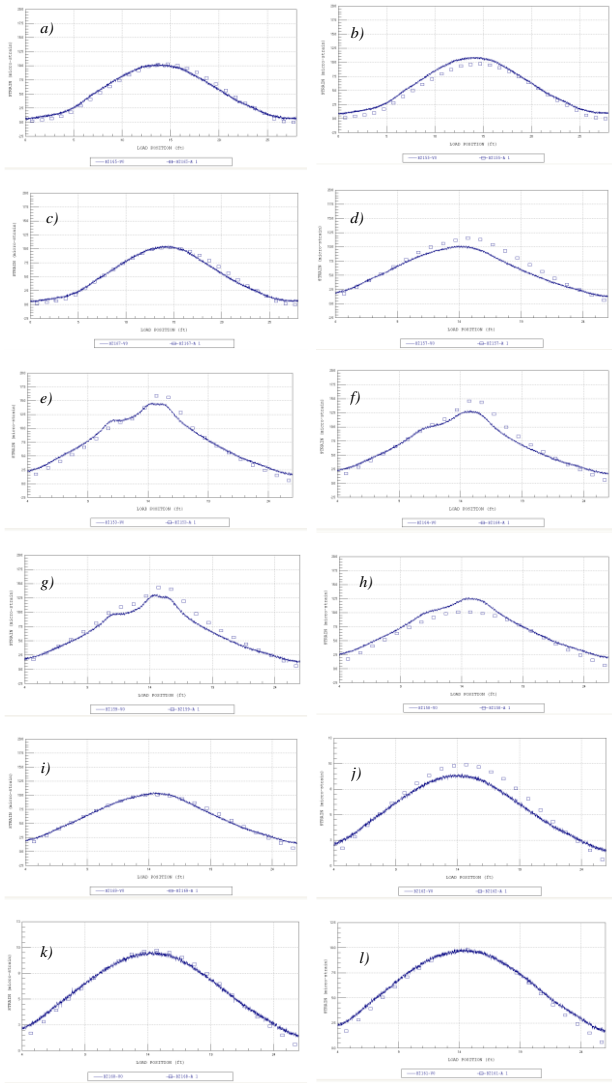
Nội dung	Dầm biên		Dầm trong	
	Mô men, M (kN.m)	Lực cắt, V (kN)	Mô men, M (kN.m)	Lực cắt, V (kN)
Sức kháng, C	5306	2024	5306	2024
Tải trọng thường xuyên, DL	1984	392	2385	447
Hoạt tải, HL93	1055	209	1184	269
RF (TTGH Cường độ 1)	3,15	7,80	2,47	5,86

**Bảng 4.** Đánh giá khả năng chịu tải đối với xe 3 trục (mô hình đã hiệu chuẩn)

Nội dung	Dầm biên		Dầm trong	
	Mô men, M (kN.m)	Lực cắt, V (kN)	Mô men, M (kN.m)	Lực cắt, V (kN)
Sức kháng, C	5306	2024	5306	2024
Tải trọng thường xuyên, DL	2258	469	2136	527
Hoạt tải, HL93	1319	246	1479	317
RF (TTGH Cường độ 1)	2,31	6,32	<b>2,14</b>	4,73

Từ Bảng 3 và Bảng 4 cho thấy, hệ số đánh giá RF theo trạng thái giới hạn cường độ 1 [9-10] đối với dầm trong nhỏ hơn so với dầm biên, điều này chứng tỏ dầm trong làm việc bất lợi hơn (chịu lực lớn hơn) so với dầm biên. Hệ số RF theo mô men M và lực cắt V đối với dầm trong và dầm biên đều lớn 1, như vậy kết cấu cầu bản đảm bảo chịu hoạt tải HL93 theo yêu cầu của thiết kế.

Để thấy được sai khác về việc đánh giá khả năng chịu tải cầu bản trên cả hai mô hình trước và sau hiệu chuẩn, tiến hành mô phỏng hoạt tải HL93 trên mô hình phân tích ban đầu (chưa hiệu chỉnh từ kết quả đo đạc thực nghiệm) và đánh giá chỉ số RF theo Bảng 5 và Bảng 6.



**Hình 7.** Kết quả biến dạng trên mô hình số đã hiệu chỉnh (đường dấu □) và kết quả đo đạc thực nghiệm (đường nét liền -): a)-Dầm 1, b)-Dầm 2, c)-Dầm 3, d)-Dầm 4, e)-Dầm 5, f)-Dầm 6, g)-Dầm 7, h)-Dầm 8, i)-Dầm 9, j)-Dầm 10, k)-Dầm 11, l)-Dầm 12

Các kết quả nghiên cứu cho thấy, sau khi hiệu chỉnh các thông số, độ cứng làm việc theo phương ngang của mô hình hiệu chỉnh là cao hơn so với mô hình ban đầu; điều này chứng tỏ các dầm bản được liên kết với nhau khá tốt và phân phối ngang của hoạt tải trên mô hình hiệu chuẩn là tốt hơn so với mô hình ban đầu. Các sai số giữa kết quả trên mô hình hiệu chuẩn và kết quả thực nghiệm là khá nhỏ và hệ số tương quan đạt được tương đối cao. Do vậy, ứng xử của mô hình hiệu chuẩn được xem như là phù hợp với ứng xử làm việc

Các kết quả đánh giá hệ số RF trên mô hình ban đầu (chưa hiệu chuẩn) đối với mô men, lực cắt và cho dầm trong lần dần biến đều có giá trị lớn hơn 1, cầu vẫn đảm bảo an toàn đối với hoạt tải khai thác HL93. Tuy nhiên hệ số RF nhỏ nhất của mô hình ban đầu là 1,53 thấp hơn nhiều so với hệ số RF nhỏ nhất của mô hình đã hiệu chuẩn là 2,14. Điều này chứng tỏ mô hình sau khi đã hiệu chuẩn sẽ cho kết quả đánh giá lớn hơn về khả năng chịu hoạt tải khai thác so với mô hình ban đầu khoảng 40%. Giá trị này là khá đáng kể và đặc biệt rất quan trọng khi đánh giá khả năng khai thác các công trình cầu cũ đã qua thời gian dài khai thác sử dụng.

**Bảng 5.** Đánh giá khả năng chịu tải đối với xe 2 trục (mô hình ban đầu chưa hiệu chuẩn)

Nội dung	Dầm biên		Dầm trong	
	Mô men, M (kN.m)	Lực cắt, V (kN)	Mô men, M (kN.m)	Lực cắt, V (kN)
Sức kháng, C	5306	2024	5306	2024
Tải trọng thường xuyên, DL	2390	462	2873	525,8
Hoạt tải, HL93	1271	246	1426	317
RF (TTGH Cường độ 1)	2,29	6,35	1,71	4,73

**Bảng 6.** Đánh giá khả năng chịu tải đối với xe 3 trục (mô hình ban đầu chưa hiệu chuẩn)

Nội dung	Dầm biên		Dầm trong	
	Mô men, M (kN.m)	Lực cắt, V (kN)	Mô men, M (kN.m)	Lực cắt, V (kN)
Sức kháng, C	5306	2024	5306	2024
Tải trọng thường xuyên, DL	2720	552	2573	620,3
Hoạt tải, HL93	1589	289	1782	372,4
RF (TTGH Cường độ 1)	1,63	5,09	<b>1,53</b>	3,77

#### 4. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp và kết quả phân tích đánh giá khả năng chịu tải công trình cầu bản BTCT ứng suất trước trên mô hình số bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Để đảm bảo ứng xử của mô hình phân tích phù hợp với thực tế làm việc của công trình cầu, phương pháp phân

tích lặp thử dần được đề xuất áp dụng để hiệu chỉnh các thông số đầu vào của mô hình (mô đun đàn hồi dầm bản  $E_d$ , mô đun đàn hồi bản mặt cầu  $E_b$ , mô men quán tính dầm bản  $J_d$ , mô men quán tính của cáp dự ứng lực căng ngang cầu  $J_c$ ) sao cho phù hợp với dữ liệu đo đạc biến dạng-ứng suất thực nghiệm trên mô hình toàn cầu dưới tác dụng của xe tải thử nghiệm di chuyển trên cầu. Kết quả phân tích cho thấy khả năng chịu hoạt tải khai thác công trình cầu bản lớn hơn khoảng 40% so với phương pháp phân tích thông thường (không hiệu chỉnh mô hình phân tích từ kết quả đo đạc ứng xử trên mô hình toàn cầu). Mô hình phân tích đã hiệu chuẩn có thể sử dụng để đánh giá khả năng chịu tải đối với nhiều loại hoạt tải khác nhau, các tải trọng đặc biệt (siêu trường, siêu trọng...) khi các đơn vị vận tải có nhu cầu và mang lại hiệu quả kinh tế cao.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] F. Moses, "Calibration of Load Factors for LRFR Bridge Evaluation", National Cooperative Highway Research Program, 2101 Constitution Avenue, N.W. Washington, D.C. 20418, Report 454, 2001.
- [2] B. Sivakumar, F. Moses, G. Fu, and M. Ghosn, "Legal truck loads and AASHTO legal loads for posting", National Cooperative Highway Research Program, 500 Fifth Street, NW Washington, DC 20001, NCHRP Report 575, 2007.
- [3] G. Fu and C. Fu, "Bridge Rating Practices and Policies for Overweight Vehicles", National Cooperative Highway Research Program, 500 Fifth Street, NW Washington, DC 20001, NCHRP Report 359, 2006.
- [4] B. Sivakumar and M. Ghosn, "Recalibration of LRFR Live Load Factors in the AASHTO Manual for Bridge Evaluation", National Cooperative Highway Research Program, 500 Fifth Street, NW Washington, DC 20001, NCHRP Report 20-7/285, 2011.
- [5] American Association of State Highway and Transportation Officials, *The Manual for Bridge Evaluation, second Edition*, AASHTO MBE-2-II, 2011.
- [6] Ministry of Transport of Vietnam, *Bridge testing standards*, 22TCN 170.87, 1987.
- [7] Ministry of Transport of Vietnam, *Road bridge inspection standards*, 22TCN 243-98, 1998.
- [8] USA Washington, DC, *Integrated Approach to Load Testing - Instruction Manual, Bridge Diagnostics*, Boulder, CO 80301-2826 2006.
- [9] Ministry of Science and Technology of Vietnam, *Evaluation of Highway Bridge*, TCVN 12882:2020, 2020.
- [10] Ministry of Science and Technology of Vietnam, *Highway Bridge Design Specification*, TCVN 11823:2017, 2017.