

Phân tích các điều kiện áp dụng và phương pháp xác định hệ số động lực do tải trọng đoàn tàu trong thiết kế cầu trên đường sắt tốc độ cao theo Tiêu chuẩn TCVN 13594 -2022

Analysis of application cases and methods for determining dynamic coefficients due to train loads in the design of bridges on high-speed railways according to TCVN 13594 -2022 Standard

> PGS.TS HOÀNG HÀ

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: hoangha.utc2020@gmail.com

TÓM TẮT

Hệ số động lực còn gọi là hệ số khuếch đại động lực (DAF) là một thông số quan trọng để xét đến sự gia tăng hiệu ứng trong kết cấu do tác dụng động lực so với hiệu ứng tĩnh tương ứng dưới tác động của các phương tiện giao thông. Trong bài toán thiết kế cầu trên đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC), hệ số động lực được áp dụng trong trường hợp sử dụng mô hình tĩnh để phân tích kết cấu. Điều kiện áp dụng và phương pháp xác định hệ số động lực theo các tiêu chuẩn kỹ thuật của các nước khác nhau được quy định khác nhau. Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu các điều kiện áp dụng và phương pháp xác định hệ số động lực do tải trọng đoàn tàu trong thiết kế cầu trên ĐSTĐC theo quy định của Tiêu chuẩn TCVN 13594-2022, nội dung nghiên cứu có thể sử dụng làm tài liệu tham khảo để phục vụ nghiên cứu thiết kế cầu trên ĐSTĐC ở Việt Nam trong thời gian tới.

Từ khóa: Hệ số động lực, đường sắt tốc độ cao, điều kiện áp dụng, phương pháp xác định, hiệu ứng tĩnh và động lực.

ABSTRACT

Dynamic coefficient, also known as dynamic amplification factor (DAF), is an important parameter to consider the increase in effects in the structure due to dynamic effects compared to the corresponding static effects under the impact of traffic vehicles. In the design problem of bridges on high-speed railways (HSRs), the dynamic coefficient is applied in the case of using a static model to analyze the structure. The conditions of application and methods of determining the DAF according to the Technical Standards of different countries are regulated differently. This article introduces the results of the study of the conditions of application and methods of determining the DAF due to train loads in the design of bridges on HSRs according to the provisions of TCVN 13594-2022 Standard. The research content can be used as a reference document to serve the research of bridge design on HSRs in Vietnam in the coming time.

Keywords: Dynamic amplification factor, high-speed railway, applicable conditions, determination method, static and dynamic effects.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bài toán thiết kế cầu, hiệu ứng động lực phát sinh trong các bộ phận của kết cấu công trình do tác động của sự di chuyển của các phương tiện giao thông có thể được phân tích theo hai mô hình:

- Mô hình động lực với sự mô phỏng đầy đủ sự tương tác giữa kết cấu cầu - phương tiện, trong đó các đối tượng liên quan đều được thiết lập với các đặc tính kỹ thuật gắn sát thực tế như sơ đồ cấu tạo, kích thước kết cấu, vật liệu, khối lượng, độ cứng, tình trạng bề mặt tiếp xúc, cấu tạo, khối lượng, các đặc trưng giảm chấn, tốc độ di

chuyển của phương tiện...

- Mô hình tĩnh với sự mô phỏng đơn giản hóa, trong đó tác động do tải trọng di động được thay thế bằng tác động tĩnh của các mô hình phương tiện không di chuyển tương ứng. Hiệu ứng động lực được xét đến bằng việc nhân hiệu ứng tĩnh với hệ số mô tả mức độ gia tăng của hiệu ứng động lực so với hiệu ứng tĩnh tương ứng gọi là hệ số khuếch đại động lực (Dynamic Amplification Factor-DAF) và thường được ký hiệu là $(1+\varphi)$ hoặc φ .

Để dàng nhận thấy, việc phân tích theo mô hình tĩnh nhân với

hệ số động lực (giả tĩnh) đơn giản và thuận tiện hơn và được quy định trong hầu hết các tiêu chuẩn thiết kế cầu, trong đó hệ số động lực DAF được nghiên cứu kỹ lưỡng cả bằng lý thuyết, mô hình thí nghiệm và cả đo đạc quan trắc dài hạn trên các công trình cầu thực tế để có đủ độ tin cậy cần thiết [3, 4]. Tuy nhiên, các nghiên cứu đầy đủ hơn đã cho thấy, ở vùng vận tốc di chuyển cao, khi tần số kích động của phương tiện xấp xỉ hoặc trùng với tần số dao động tự nhiên của kết cấu cầu có thể xuất hiện nguy cơ cộng hưởng dao động với sự gia tăng đột ngột của hiệu ứng động lực trong kết cấu [4, 5]. Đây là nguyên nhân để các tiêu chuẩn thiết kế cầu trên các tuyến ĐSTĐC với tốc độ thiết kế từ 200 km/h đến 350 km/h đưa ra các quy định rất chặt chẽ về điều kiện cần thiết/không cần thiết phải phân tích kết cấu theo mô hình động [1, 2, 3, 4].

Theo tiêu chuẩn thiết kế cầu đường sắt khổ 1.435 mm, vận tốc đến 350 km/h (TCVN 13594-2022), Phần 1 đến 3 đưa ra chỉ dẫn khá phức tạp về điều kiện áp dụng và phương pháp xác định hệ số động lực do phụ thuộc vào dạng kết cấu, chiều dài nhịp, mô hình tải trọng đoàn tàu, dải tốc độ thiết kế... Do TCVN 13594-2022 được chuyển đổi từ Tiêu chuẩn Eurocode EN 1991-2 chưa được áp dụng phổ biến ở Việt Nam nên nhiều nội dung cần được nghiên cứu phân tích kỹ lưỡng, trong đó có vấn đề áp dụng hệ số động lực.

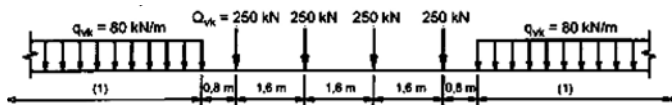
2. CÁC QUY ĐỊNH VỀ ĐIỀU KIỆN ÁP DỤNG VÀ PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH HỆ SỐ ĐỘNG LỰC THEO TCVN 13594-2022

TCVN 13594-2022 liên quan đến nghiên cứu này gồm: (i) TCVN 13594-1 2022: Các yêu cầu chung; (ii) TCVN 13594-2 2022: Thiết kế tổng thể và đặc điểm vị trí và (iii) TCVN 13594-3 2022: Tải trọng và các tác động. Các quy định liên quan đến điều kiện áp dụng hệ số động lực DAF gồm:

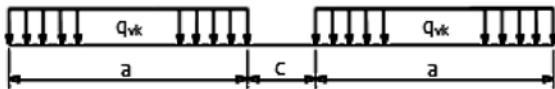
2.1. Mô hình đoàn tàu đường sắt và ĐSTĐC

Quy định tại Điều 11 [3] tương tự như mô hình tải trọng đoàn tàu theo Tiêu chuẩn EN1991-2 Eurocode1 - Phần 2: Tải trọng và tác động có 5 mô hình tải trọng đoàn tàu được đưa ra để xác định các hoạt động giao thông đường sắt ở châu Âu gồm:

- 3 mô hình tải trọng đoàn tàu tiêu chuẩn là LM71 (Hình 1) và SW/0, SW/2 (Hình 2) khi có liên quan. Trong đó, SW/0 sử dụng trong trường hợp đảm liên tục, SW/2 cho đoàn tàu hàng nặng nếu có trên tuyến.



Hình 1. Mô hình tải trọng đoàn tàu thiết kế tiêu chuẩn LM71 theo TCVN 13594-3 2022



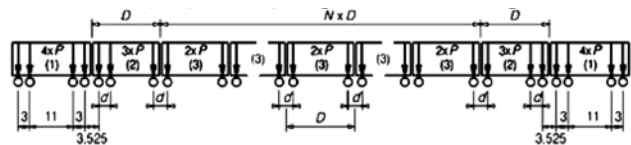
Hình 2. Mô hình tải trọng SW/0, SW/2

Mô hình tải	q_{vk} [kN/m]	a (m)	c (m)
SW/0	133	15,0	5,3
SW/2	150	25,0	7,0

Mô hình LM71 áp dụng cho mỗi quốc gia được điều chỉnh bằng hệ số α (0,75; 0,83; 0,91; 1,00; 1,10; 1,21; 1,33; 1,46), được quy định trong Phụ lục quốc gia của mỗi nước.

- Mô hình tải trọng đoàn tàu đại diện cho các đoàn tàu khách dự kiến di chuyển với tốc độ trên 200 km/h có ký hiệu HSLM-A (gồm 10 loại) và HSLM-B thể hiện trên Hình 3, Hình 4 và Bảng 1.

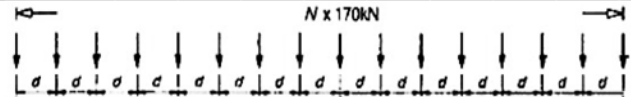
- Mô hình tải trọng "đoàn tàu rỗng" gồm tải trọng thẳng đứng phân bố đều với giá trị đặc trưng 10,0 kN/m để đại diện cho hiệu ứng của đoàn tàu không chất tải.



Hình 3. Mô hình đoàn tàu tốc độ cao HSLM-A

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật của mô hình HSLM-A

Kí hiệu đoàn tàu vận năng	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Số toa trung gian N	18	17	16	15	14	13	13	12	11	11
Chiều dài toa D (m)	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
K/giải chuyển hướng d (m)	2,0	3,5	2,0	3,0	2,0	2,0	2,0	2,5	2,0	2,0
Tải trọng trục P (kN)	170	200	180	190	170	180	180	190	210	210



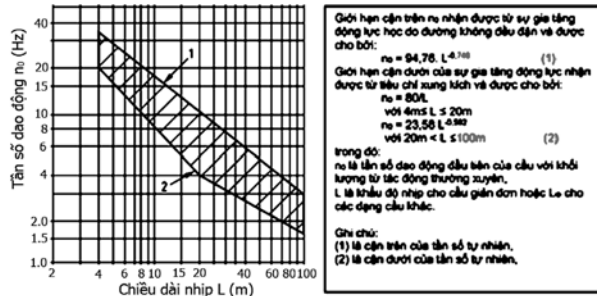
Hình 4. Mô hình đoàn tàu tốc độ cao HSLM-B

2.2. Các điều kiện được áp dụng hệ số động lực khi phân tích kết cấu cầu theo mô hình tĩnh

Điều kiện chọn mô hình phân tích tĩnh hay mô hình phân tích động lực là bắt buộc theo Điều 11.4.4 [3]. Theo đó, các cầu đường sắt thỏa mãn các điều kiện sau đây không yêu cầu mô hình phân tích động và áp dụng hệ số động lực (1+ ϕ) khi phân tích kết cấu theo mô hình tĩnh:

a) Với vận tốc thiết kế $v \leq 200$ km/h

- Cầu có sơ đồ liên tục;
- Các loại cầu khác có giá trị tần số dao động tự nhiên ứng với dạng thức (mode) thứ nhất n_0 nằm trong giới hạn quy định ở Hình 5.



Hình 5. Giới hạn tần số dao động uốn thẳng đứng tự nhiên n_0 tương ứng với mode thứ 1 theo Tiêu chuẩn TCVN 13594-3 2022 (Hình 32 của TCVN)

b) Với vận tốc thiết kế $v > 200$ km/h

- Cầu giản đơn có chiều dài nhịp $L \geq 40$ m và có giá trị tần số dao động tự nhiên ứng với dạng thức (mode) dao động thứ nhất n_0 nằm trong giới hạn quy định ở Hình 5.

- Cầu giản đơn có chiều dài nhịp $L \geq 40$ m, có tần số dao động tự nhiên ứng với dạng thức (mode) dao động thứ nhất n_0 nằm ngoài giới hạn quy định ở Hình 5 nhưng có $n_1 > 1,2n_0$ và có tỷ lệ $v/n_0 \leq (v/n_0)_{lim}$. Trong đó, n_1 là tần số dao động xoắn tự nhiên theo mode thứ nhất và giá trị $(v/n_0)_{lim}$ được quy định trong Phụ lục M [3].

- Cầu giản đơn $L < 40$ m, không quy định n_0 , có $n_1 > 1,2n_0$ và $v/n_0 \leq (v/n_0)_{lim}$.

2.3. Các quy định về kiểm tra điều kiện an toàn và tiện ích của kết cấu cầu liên quan đến áp dụng hệ số động lực

Ngoài việc xét đến hệ số động lực để xét đến sự gia tăng các hiệu ứng nội lực và biến dạng trong kết cấu (ứng suất, độ võng, gia tốc, chuyển vị...) như đối với cầu trên đường ô tô, đối với việc thiết kế kết cấu cầu trên đường sắt, hệ số động lực còn dùng để kiểm tra tiêu chí tiện nghi cho hành khách và gia tốc dao động mặt cầu để đảm bảo ổn định đường ray. Các quy định này thể hiện tại TCVN 13594-2 2022 gồm:

- Tại A 2.2 [1]: Tổ hợp tải trọng được đưa vào tính toán khi hoạt tải giao thông và tải trọng gió tác động đồng thời có thể bao gồm:

Hoạt tải đường sắt thẳng đứng kể cả hệ số động lực, tải trọng đường sắt theo phương ngang và lực gió với mỗi tải trọng được xét như là tải trọng dẫn đầu của tổ hợp tải trọng xảy ra đồng thời.

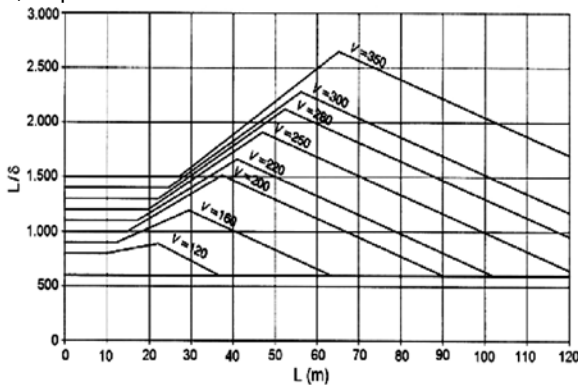
- A.4.2.2.4 [1] *Biến dạng ngang và dao động ngang của dầm cầu:*

Biến dạng ngang và dao động ngang của dầm cầu được kiểm tra cho các tổ hợp đặc trưng mô hình LM 71 và SW/0 bằng việc nhân với hệ số động lực φ và α (hoặc tương ứng với hệ số động lực đoàn tàu thực), tải trọng gió, lực lắc ngang, lực ly tâm tương ứng với Điều 11.4, TCVN 13594-3:2022 và hiệu ứng của sự chênh lệch nhiệt độ theo phương ngang cầu.

- A.4.3 *Giá trị giới hạn độ võng thẳng đứng lớn nhất cho tiện nghi hành khách*

- A.4.3.1 *Tiêu chí tiện nghi cho hành khách*

Sự tiện nghi của hành khách phụ thuộc vào gia tốc thẳng đứng bên trong toa tàu b_v trong quá trình di chuyển trên đường để đến, đi qua và ra khỏi cầu.



Hình 6. Chuyển vị thẳng đứng cho phép lớn nhất δ cho cầu có ≥ 3 nhịp giản đơn kế tiếp nhau với gia tốc thẳng đứng cho phép $b_v = 1 \text{ m/s}^2$ trong một toa theo vận tốc v (km/h)

Bảng 2. Mức độ tiện nghi khuyến nghị

Mức độ tiện nghi	Gia tốc thẳng đứng b_v (m/s ²)
Rất tốt	1,0
Tốt	1,3
Chấp nhận	2,0

Giá trị b_v khuyến cáo trong Bảng 2. Việc kiểm soát b_v thông qua tỷ lệ giữa chiều dài nhịp cầu L và độ võng tối đa cho phép δ (L/δ) theo biểu đồ quan hệ giữa (L/δ) và L cho trường hợp $b_v = 1,0 \text{ m/s}^2$ trình bày trên Hình 6.

Chuyển vị thẳng đứng δ được xác định với mô hình LM 71 nhân với hệ số động lực φ và giá trị của $\alpha = 1$, tương ứng với Điều 11.4, TCVN 13594-3:2022.

Các giá trị L/δ đưa ra trong Hình 6 cho các dầm được gối đỡ đơn giản với ba nhịp hoặc nhiều hơn. Với cầu một nhịp đơn hoặc một dầm của hai dầm đơn giản được gối đỡ hoặc hai nhịp liên tục, các giá trị L/δ được cho trong Hình 6 được nhân với 0,7. Đối với các chuỗi liên tục có ba hoặc nhiều nhịp hơn, các giá trị của L/δ được cho trong Hình 6 được nhân với 0,9.

Đối với các mức độ thoải mái khác và gia tốc thẳng đứng tối đa cho phép liên quan, các giá trị của L/δ được cho trong Hình 6 có thể được chia cho b_v (m/s²).

3. TÍNH TOÁN HỆ SỐ ĐỘNG LỰC

3.1. Hệ số động lực do mô hình đoàn tàu LM71 (SW0, SW2)

Hệ số động ký hiệu là φ được định nghĩa chỉ sự gia tăng hiệu ứng tĩnh của mô hình tải trọng đoàn tàu tiêu chuẩn áp dụng ở châu Âu ký hiệu LM71, SW/0, SW/2, được lấy hoặc là φ_2 hoặc là φ_3 phụ thuộc vào điều kiện bảo trì đường ray. Theo Điều 11.4.4.5.2 [3], hệ

số động lực φ là một hàm phụ thuộc vào chiều dài L_φ như thể hiện trong các hệ thức (1) và (2) với dầm giản đơn L_φ lấy bằng chiều dài nhịp tính toán. Khuyến cáo của TCVN 13594-3-2022 nên hệ số động lực nên lấy bằng φ_3 .

- Trường hợp đường ray được bảo trì cẩn thận:

$$\varphi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\varphi - 0,2}} + 0,82 \quad (1)$$

Với $1 \leq \varphi_2 \leq 1,67$

- Trường hợp đường ray được bảo trì tiêu chuẩn:

$$\varphi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\varphi - 0,2}} + 0,73 \quad (2)$$

Với $1 \leq \varphi_3 \leq 2,0$

3.2. Hệ số động lực do mô hình tải trọng đoàn tàu thực và mô hình tải trọng đoàn tàu HSLM

a) Khi phân tích kết cấu theo mô hình động lực

$$\varphi' = \max |y_{dyn} / y_{stat}| - 1 \quad (3)$$

Trong đó: y_{dyn} - Phản ứng động lớn nhất; y_{stat} - Phản ứng tĩnh lớn nhất tương ứng ở bất kỳ điểm đặc biệt nào trên kết cấu do đoàn tàu thực hoặc mô hình HSLM.

b) Khi không yêu cầu phân tích theo mô hình động lực

Để tính toán hiệu ứng động từ chuyển động của các đoàn tàu khai thác thực tế ở vận tốc cho phép, các lực và mô-men được tính toán từ tải trọng tĩnh đã phân loại được nhân với một hệ số $(1+\varphi)$ tương ứng với vận tốc phương tiện cho phép lớn nhất. Các hệ số động $(1+\varphi)$ cũng dùng để tính toán hư hỏng mỏi.

Tải trọng tĩnh do đoàn tàu thực ở vận tốc v , (km/h), sẽ được nhân với:

$$(1+\varphi) = 1 + \varphi' + \varphi'' \text{ cho tuyến được bảo trì tiêu chuẩn} \quad (4)$$

$$\text{Và } (1+\varphi) = 1 + \varphi' + 0,5\varphi'' \text{ cho tuyến được bảo trì cẩn thận} \quad (5)$$

Trong đó:

- φ' - Phần gia tăng của hiệu ứng tải động được tính toán (ứng suất, chuyển vị, gia tốc dầm cầu...), do yếu tố vận tốc di chuyển của mô hình hoạt tải (đoàn tàu) gây ra.

- φ'' - Phần gia tăng của hiệu ứng tải động được tính toán (ứng suất, chuyển vị, gia tốc dầm cầu...), do các khuyết tật tuyến đường và sự khiếm khuyết của đoàn tàu tương ứng.

- Khi kết cấu có tần số dao động tự nhiên n_0 trong giới hạn trên Hình 5 và vận tốc dưới 200 km/h thì:

$$\varphi' = \frac{K}{1 - K - K^2} \text{ với } K < 0,76 \quad (6)$$

$$\varphi' = 1,325 \text{ với } K \geq 0,76 \quad (7)$$

Ở đây:

$$K = \frac{v}{2L_\varphi n_0} \quad (8)$$

$$\varphi'' = \frac{\alpha'}{100} \left[56e^{\left(\frac{L_\varphi}{10}\right)^2} + 50 \left(\frac{L_\varphi n_0}{80} - 1 \right) e^{\left(\frac{L_\varphi}{20}\right)^2} \right]; \quad (\varphi'' \geq 0) \quad (9)$$

Với: $\alpha' = v/22$ nếu $v \leq 22 \text{ m/s}$ (79,2 km/h) và $\alpha' = 1$ nếu $v > 22 \text{ m/s}$. (10)

Trong đó:

v - Vận tốc lớn nhất của phương tiện (m/s);

n_0 - Tần số dao động uốn (Hz);

L_φ - Chiều dài nhịp hoặc xác định theo Điều 11.4.4.5.3 (m);

α' - Hệ số vận tốc.

- Khi kết cấu có tần số dao động tự nhiên n_0 không trong giới hạn trên Hình 5 và vận tốc lớn hơn 200 km/h thì φ' và φ'' xác định bằng phân tích mô hình động lực [3].

c) Áp dụng hệ số động lực vào hiệu ứng của hoạt tải đoàn tàu khi phân tích kết cấu

Điều 11.4.4.6.5 [3] quy định, để thiết kế cầu, đưa vào tính toán tất cả các hiệu ứng của tải trọng thẳng đứng có giá trị bất lợi nhất của:

$$\left. \begin{aligned} &(1 + \varphi' + 0,5\varphi'') \times (\text{HSLM hoặc RT}) \text{ hoặc;} \\ &\varphi \times \text{LM71 (hoặc SW0 với cầu liên tục)} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

HSLM và RT là hiệu ứng tính do đoàn tàu HSLM và đoàn tàu thực.

Nhận xét:

- Từ (11) cho thấy, trong bài toán thiết kế cầu trên ĐSTĐC yêu cầu tính toán cả hệ số động lực φ do mô hình tải trọng đoàn tàu tiêu chuẩn LM71 (SW0 với cầu liên tục) và $(1+\varphi)$ cho mô hình đoàn tàu khách hoặc mô hình đoàn tàu thực.

- Từ (9) chỉ ra rằng φ'' chỉ phụ thuộc vào L_ϕ .

- Đoàn tàu ĐSTĐC thường có vận tốc lớn, vì vậy giá trị α' thường bằng 1.

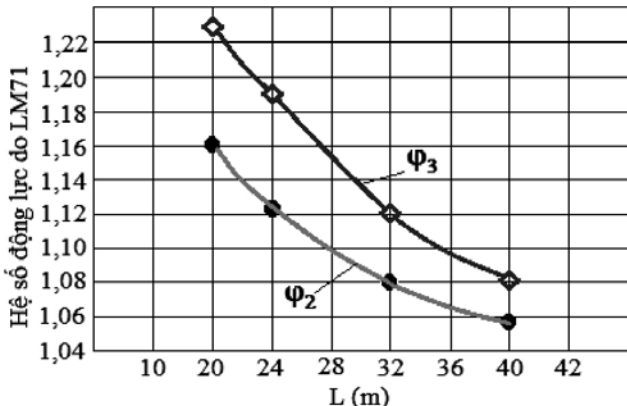
Bảng 3. Kết quả tính toán hệ số động lực φ và $(1+\varphi)$ cho các dầm giản đơn có chiều dài nhịp 20, 24, 32 và 40 m với vận tốc 150, 200, 300 và 350 km/h

L_ϕ (m)	Vận tốc v km/h (m/s)	Tần số n_0 (Hz)	Hệ số K	φ'	φ''	Bảo trì cẩn thận		Bảo trì tiêu chuẩn	
						$(1+\varphi)$	φ_2	$(1+\varphi)^5$	φ_3
20	150 (41,67)	10,16	0,10263	0,11573	0,29308	1,2623	1,15701	1,4088	1,23551
	200 (55,56)		0,13684	0,16479		1,3113		1,4579	
	250 (69,44)		0,17102	0,21384		1,3604		1,5069	
	300 (83,33)		0,20523	0,27267		1,4192		1,5658	
	350 (97,22)		0,23945	0,34051		1,4871		1,6336	
24	150 (41,67)	7,36	0,11795	0,13587	0,18550	1,2287	1,12645	1,3214	1,18967
	200 (55,56)		0,15727	0,19226		1,2851		1,3778	
	250 (69,44)		0,19656	0,25701		1,3498		1,4425	
	300 (83,33)		0,23588	0,33293		1,4257		1,5184	
	350 (97,22)		0,27519	0,42373		1,5165		1,6092	
32	150 (41,67)	4,67	0,13942	0,16575	0,03357	1,1825	1,08388	1,1993	1,12583
	200 (55,56)		0,18589	0,23846		1,2552		1,2720	
	250 (69,44)		0,23233	0,32553		1,3423		1,3591	
	300 (83,33)		0,27881	0,43330		1,4501		1,4669	
	350 (97,22)		0,32528	0,57176		1,5885		1,6053	
40	150 (41,67)	3,32	0,15689	0,19168	0,00577	1,1946	1,05510	1,1975	1,08266
	200 (55,56)		0,20919	0,28002		1,2829		1,2858	
	250 (69,44)		0,26144	0,39009		1,3930		1,3959	
	300 (83,33)		0,31374	0,55240		1,5308		1,5337	
	350 (97,22)		0,36604	0,73212		1,7350		1,7379	

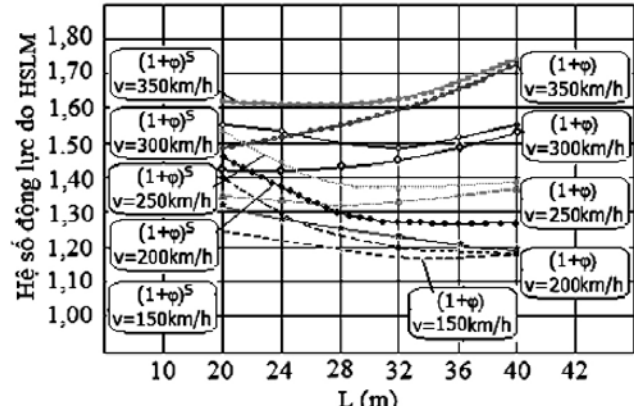
4. ÁP DỤNG TÍNH TOÁN HỆ SỐ ĐỘNG LỰC CHO MỘT SỐ KẾT CẤU NHỊP DẦM GIẢN ĐƠN BÊ TÔNG DỰ ỨNG LỰC CÓ CHIỀU DÀI NHỊP TRUNG BÌNH

4.1. Tính toán hệ số động lực của các mô hình đoàn tàu LM71 và SHLM

Áp dụng các phương trình (1) đến (9) để tính toán hệ số động lực của đoàn tàu LM71 và HSLM trong nội dung thiết kế các cầu dầm giản đơn bê tông dự ứng lực (BTDƯL) mặt cắt dạng hộp, chiều dài nhịp là 20 m, 24 m, 32 m và 40 m sử dụng trên ĐSTĐC, thỏa mãn điều kiện không cần phân tích kết cấu theo mô hình động lực. Các mức vận tốc di chuyển xem xét là 150, 200, 250, 300 và 350 km/h, kết quả ghi trong Bảng 3.



Hình 7. Biểu đồ quan hệ giữa hệ số động lực của đoàn tàu LM71 theo chiều dài nhịp (L)



Hình 8. Biểu đồ quan hệ giữa hệ số động lực của đoàn tàu HSLM theo (L) và tốc độ

4.2. So sánh hiệu ứng do tải trọng đoàn tàu khi phân tích kết cấu cầu trên ĐSTĐC

Quy định ở Điều 11.4.4.6.5 [3] được hiểu là cần tính toán hiệu ứng tĩnh và nhân với hệ số động lực tương ứng: Của $(1 + \varphi' + 0,5\varphi'')$ (HSLM hoặc RT) và so sánh với trị số $\varphi \times LM71$ (hoặc SW0 với cầu liên tục) để chọn trị số bất lợi để phân tích an toàn kết cấu. Trên Bảng 4 giới thiệu kết quả tính toán so sánh trị số cực đại của phản lực gối, mô-men và độ võng tương ứng với 4 loại dầm giản đơn BTĐUL đã đề cập trên cùng với các hệ số động lực từ Bảng 3.

* Nhận xét về các giá trị của hệ số động lực và hiệu ứng tính toán tương ứng:

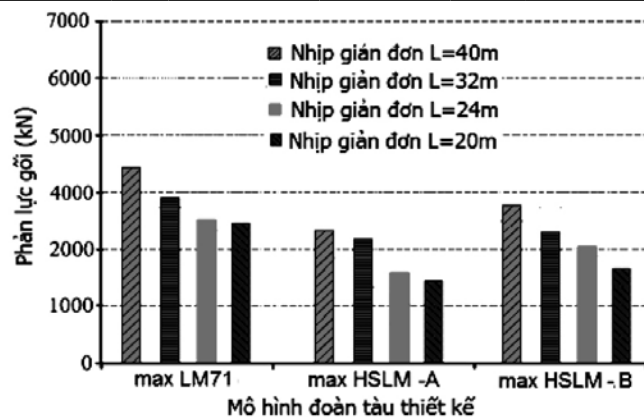
- Hệ số động φ_2 và φ_3 của mô hình đoàn tàu LM71 giảm tỷ lệ nghịch với của chiều dài nhịp (Hình 7), với các nhịp giản đơn 20 m, 24 m, 32 m và 40 m, φ_3 lớn hơn φ_2 max là 23,5%.

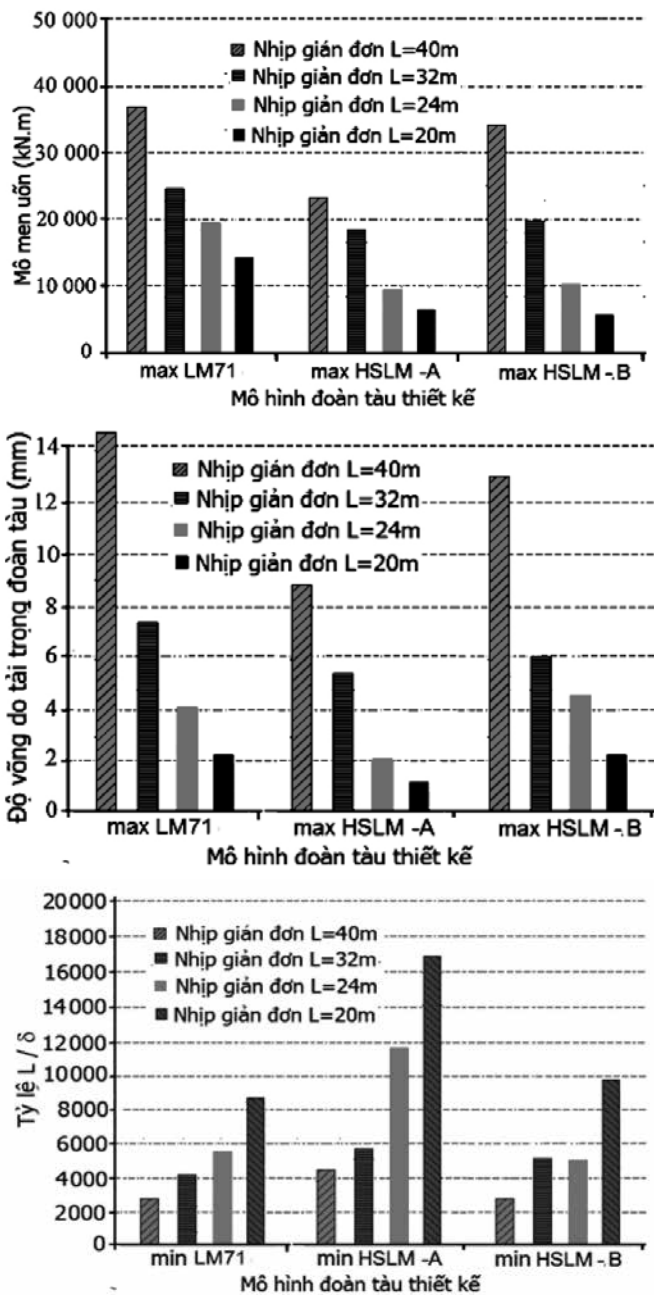
- Giá trị thành phần φ'' trong công thức tính hệ số động lực $(1 + \varphi)$ của mô hình đoàn tàu khách HSLM khá lớn với các nhịp giản đơn nhỏ hơn 30 m, trong khoảng chiều dài nhịp từ 30 m đến 40 m φ'' có trị số không đáng kể.

- Sự biến đổi của các hệ số $(1 + \varphi)$ và $(1 + \varphi)^5$ phụ thuộc vào chiều dài nhịp và vận tốc di chuyển của đoàn tàu thể hiện trên Hình 8 không có quy luật rõ ràng và khá phức tạp, trong đó $(1 + \varphi)^5$ lớn hơn nhiều nhất là 9,85% so với $(1 + \varphi)$.

Bảng 4. So sánh hiệu ứng tĩnh phát sinh trong kết cấu nhịp dầm giản đơn do tác động của các mô hình tải trọng đoàn tàu ĐSTĐC cùng với hệ số động lực tương ứng

Nhịp	Hiệu ứng max phát sinh trong kết cấu	Do tác động của mô hình tải trọng đoàn tàu								
		LM71 (SW0)			HSLM (ở vận tốc 350km/h)					
		LM71	φ_2	$\varphi_2 \times LM71$	HSLM-A	$1 + \varphi$	$(1 + \varphi) \times HSLM-A$	HSLM-B	$1 + \varphi$	$(1 + \varphi) \times HSLM-B$
L=20m	Phản lực gối (kN)	2.589,4	1,15701	2.996,0	1.053,15	1,48710	1.566,1	1.147,5	1,48710	1.706,4
	Mô-men uốn (kN.m)	12.099,2		13.988,9	4.751,5		7.066,0	4.335,0		6.446,6
	Độ võng δ (mm)	2,0047		2,3195	0,7873		1,1707	1,4365		2,1362
	Tỷ lệ L/ δ	9.976,5		8.622,5	25.403,2		17.083,8	13.922,7		9.362,4
L=24 m	Phản lực gối (kN)	2.928,5	1,12645	3.298,8	1.135,8	1,51650	1.722,4	1.338,7	1,51650	2.030,1
	Mô-men uốn (kN.m)	16.594,9		18.693,4	6.111,5		9.268,1	6.885,0		10.441,1
	Độ võng δ (mm)	3,6386		4,0987	1,3400		2,0321	3,0192		4,5786
	Tỷ lệ L/ δ	6.595,9		5.855,5	17.910,4		11.810,4	7.949,1		5.241,8
L=32 m	Phản lực gối (kN)	3.592,4	1,08388	3.893,7	1.364,5	1,58850	2.167,5	1.726,6	1,58850	2.742,7
	Mô-men uốn (kN.m)	27.507,2		29.814,5	11.223,5		17.828,5	12.325,0		19.578,3
	Độ võng δ (mm)	7,0150		7,6034	3,4382		5,4615	3,7756		5,9976
	Tỷ lệ L/ δ	4.561,6		4.208,6	9.307,2		5.859,2	8.475,5		5.335,5
L=40 m	Phản lực gối (kN)	4.246,7	1,05510	4.480,7	1.501,6	1,73500	2.605,3	2.116,5	1,73500	3.672,1
	Mô-men uốn (kN.m)	35.091,2		37.024,7	13.162,3		22.836,5	19.550,0		33.919,3
	Độ võng δ (mm)	13,613		14,363	5,1109		8,8673	7,5838		13,158
	Tỷ lệ L/ δ	2.938,4		2.784,9	7.826,4		4.510,9	5.274,4		3.040,0





Hình 9. Biểu đồ so sánh hiệu ứng lớn nhất do các mô hình tải trọng đoàn tàu LM71, HSLM-A và HSLM-B nhân với hệ số động lực tương ứng

- Hiệu ứng tĩnh tiêu chuẩn phát sinh trong kết cấu cầu giản đơn được khảo sát do tải trọng đoàn tàu LM71 lớn hơn nhiều so với đoàn tàu khách HSLM: Mô-men lớn hơn từ 165,6% đến 179,1%; phản lực gối từ 145,8% đến 182,8%; độ võng từ 104,0% đến 166,3%.

- Hiệu ứng tĩnh nhân với hệ số động lực (hiệu ứng giả tĩnh) do tải trọng đoàn tàu LM71 có xu thế gần sát hơn với hiệu ứng của đoàn tàu khách HSLM: Mô-men lớn hơn từ 9,15% đến 97,9%; phản lực gối 22,0% đến 91,3%; độ võng từ -10,5% đến 26,7%. Mức chênh có xu thế giảm khi tăng chiều dài nhịp, với chiều dài nhịp $L=40$ m hiệu ứng mô-men chênh dưới 10%.

- Ảnh hưởng của vận tốc đoàn tàu biểu hiện rõ trên các Hình 7, 8 và 9 ở dải vận tốc nhỏ hơn 250 km/h, hệ số động lực của mô

hình đoàn tàu khách HSLM có xu thế giảm khi chiều dài nhịp tăng lên tương tự như quy luật biến đổi của hệ số động lực do mô hình đoàn tàu tiêu chuẩn LM71. Tuy nhiên, ở dải vận tốc cao hơn từ 250 km/h đến 350 km/h, quy luật biến thiên của hệ số động lực có xu thế ngược lại, gia tăng cùng với sự gia tăng của chiều dài nhịp. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của nhiều tác giả trên thế giới [6, 7, 8, 9, 10].

5. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu trên cho phép làm rõ một số vấn đề sau đây:

- Trong TCVN 13594-2022, thiết kế cầu trên ĐSTĐC, điều kiện áp dụng các hệ số động lực φ và $(1+\varphi)$ là khác biệt và được quy định rất chặt chẽ phụ thuộc vào điều kiện yêu cầu/không yêu cầu phân tích kết cấu theo mô hình bài toán động lực học.

- Hệ số động lực do đoàn tàu tiêu chuẩn LM71 (φ) khá đơn giản, phụ thuộc và có xu thế giảm trị số theo chiều dài nhịp cầu, trong khi hệ số động lực của mô hình đoàn tàu khách HSLM (và đoàn tàu thực) tính toán khá phức tạp, trong đó ảnh hưởng của yếu tố vận tốc di chuyển của đoàn tàu (φ') có vai trò chủ đạo, đặc biệt là ở dải vận tốc lớn hơn 250 km/h.

- Với các nhịp nhỏ hơn 24 m, hiệu ứng tĩnh phát sinh trong kết cấu cầu có xét tới hệ số động lực (giả tĩnh) do mô hình đoàn tàu LM71 có giá trị lớn hơn nhiều so với mô hình đoàn tàu khách HSLM và thường được chọn làm căn cứ kiểm tra an toàn kết cấu. Với các nhịp lớn hơn 24 m, hiệu ứng giả tĩnh của 2 loại mô hình đoàn tàu có xu thế xấp xỉ nhau, rõ nét nhất ở dải vận tốc lớn từ 250 km/h đến 350 km/h.

- Kết quả khảo sát một số dạng cầu BTĐƯL giản đơn mặt cắt hình hộp áp dụng phổ biến trên các tuyến ĐSTĐC ở nước ngoài cho thấy đều thỏa mãn yêu cầu không cần phân tích kết cấu theo mô hình động lực và có độ cứng lớn thể qua đối chiếu với biểu đồ khống chế độ võng ở Hình 6 cho thấy các loại kết cấu cầu này đều thỏa mãn tiêu chí tiện ích cho hành khách rất tốt ($b_v = 1,0 \text{ m/s}^2$) với tốc độ đến 350 km/h.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. TCVN 13594-1:2022, Thiết kế cầu đường sắt khổ 1.435 mm, vận tốc đến 350 km/h - Phần 1: Yêu cầu chung.
- [2]. TCVN 13594-2:2022, Thiết kế cầu đường sắt khổ 1.435 mm, vận tốc đến 350 km/h - Phần 2: Thiết kế tổng thể và đặc điểm vị trí.
- [3]. TCVN 13594-3:2022, Thiết kế cầu đường sắt khổ 1.435 mm, vận tốc đến 350 km/h - Phần 3: Tải trọng và Tác động.
- [4]. E N1990+A2, Basic of Structure Design, EN1991-2, Traffic loads on Bridges.
- [5]. TB 10621, Code for Design of High Speed railway.
- [6]. Leonid Diachenko, Andrey Nenin, Vladimir Smirnov, Anastasia Diachenko (1/2018), Rating of Dynamic Coefficient for Simple Beam Bridge Design on High-speed Railways, Civil and Environmental Engineering, vol.14, Issue, 37-43.
- [7]. Gonglian Dai, Miao Su, Y.Frank Chen (2016), Design and Construction of simple beam bridge for High-Speed Rails in China: Standardization and Industrialization, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, vol.11(4): 274-282.
- [8]. Yoshinori Shindo, Shinichi Tamai, Tatsuya Shimotsu (2016), Xem xét kết quả đo độ võng của dầm PC trên tuyến Shinkansen giữa Nagano và Kanazawa, Báo cáo thiết kế - Cục Đường sắt và Vận tải Nhật Bản (Bản tiếng Nhật).
- [9]. Hoàng Hà (1998), Xác định hệ số động lực của hoạt tải trong tính toán công trình cầu, Chuyên đề Luận án Tiến sỹ, Trường Đại học GTVT.