

ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP DAO ĐỘNG ĐỂ KIỂM TRA LỰC CĂNG TRONG CÁC DÂY CÁP NGOÀI TRONG CẦU EXTRADOSED Ở VIỆT NAM

TENSION FORCE ESTIMATION OF EXTRADOSED BRIDGE CABLES IN VIETNAM USING VIBRATION BASED METHOD

PGS.TS Hoàng Hà - Đại học GTVT, số 3 phố Cầu Giấy, Hà Nội, Email:hoangha.uttc@gmail.com

Tóm tắt: Hệ cáp ngoài trong cầu Extradosed có hình thức cấu tạo, công năng và nguyên lý làm việc gần giống với các dây cáp văng trong cầu dây văng nên lực căng trong các dây cáp ngoài cũng được coi là một thông số quan trọng để đảm bảo khả năng chịu lực và ổn định của toàn hệ kết cấu của cầu này. Lực căng trong cáp ngoài được kiểm soát chặt chẽ từ giai đoạn thiết kế, thi công và vận hành khai thác bằng cách lắp đặt các cảm biến đo lực trực tiếp hoặc các phương pháp xác định gián tiếp thông qua phân tích số liệu rung động cáp ngoài tương tự như kiểm soát lực căng trong cáp văng của cầu dây văng. Tuy nhiên cáp ngoài trong cầu Extradosed thường có góc nghiêng nhỏ hơn và không được lắp thiết bị giảm chấn nên mức ảnh hưởng của các tham số liên quan đến lực căng trong chúng có khác biệt so với các cáp của cầu dây văng. Bài viết này phân tích kết quả kiểm tra giá trị lực căng trong cáp ngoài của cầu Extradosed bằng phương pháp sử dụng các dữ liệu đo dao động của cáp. Ảnh hưởng của các tham số cấu tạo thực tế của cáp đến trị số lực căng được thảo luận và kiểm chứng với lực căng thực tế trong cáp ở giai đoạn thi công ở một số công trình cầu Extradosed mới hoàn thành ở Việt Nam nhằm nâng cao độ tin cậy khi ứng dụng trên thực tế.

Từ khóa: Lực căng trong cáp ngoài, phương pháp dựa trên rung động, cầu Extradosed

1. Giới thiệu

Cầu Extradosed còn gọi là cầu cáp ngoài là dạng kết cấu cầu hỗn hợp giữa dạng cầu dầm bê tông dự ứng lực (BTDUL) và cầu dây văng (CDV). Về hình thức bên ngoài, cầu Extradosed có hình dáng kiến trúc tương tự như cầu dây văng nhưng có chiều cao tháp thấp hơn khá nhiều. Căn cứ vào tham số cấu tạo, đặc tính làm việc của kết cấu, các chuyên gia xếp dạng kết cấu cầu này là dạng kết cấu lai giữa cầu dầm liên tục BTDUL và cầu dây văng thể hiện trên hình 1. Do có ưu điểm vượt trội khá lớn từ 100m đến 250m, có hình dáng kiến trúc đẹp, chiều cao tháp thấp nên gần đây dạng kết cấu cầu Extradosed có xu hướng phát triển mạnh mẽ ở Việt Nam, sử dụng trên cả các tuyến giao thông đường bộ và đường sắt đô thị.

Các cáp ngoài trong cầu Extradosed tuy không

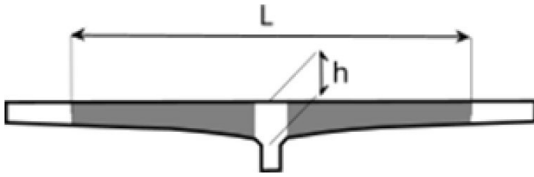
Abstract: The external cable system in the Extradosed bridge structure has a similar structure, function and working principle to the cables in the cable-stayed bridge, so the tension force in the external cables is also considered an important parameter to ensure the bearing capacity and stability of the entire structure of this bridge. The tension force in the outer cable is strictly controlled from the design, construction and operation stages by installing direct force measuring sensors or indirect determination methods through analysis of outer cable vibration data similar to the tension control in the stay cables of cable-stayed bridges. However, the outer cables in Extradosed bridges usually have a smaller tilt angle and are not equipped with damping devices, so the influence of the parameters related to the tension in them is different from that of the cables of cable-stayed bridges. This article analyzes the test results of the tension value in the outer cables of Extradosed bridges using the method of using cable vibration measurement data. The influence of the actual cable construction parameters on the tension value is discussed and verified with the actual tension in the cables during the construction phase of some newly completed Extradosed bridges in Vietnam to improve the reliability when applied in practice.

Keywords: Tension in external cable, vibration based method, Extradosed bridge

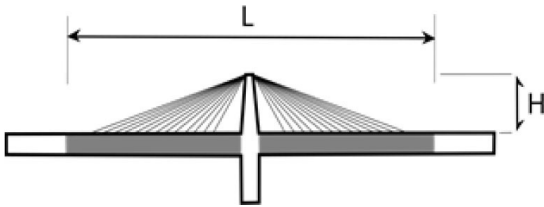
đóng vai trò chịu lực chủ yếu bằng các cáp văng của cầu dây văng nhưng cũng đóng vai trò quan trọng đảm bảo ổn định của toàn hệ kết cấu vì vậy lực căng trong cáp ngoài cần được kiểm soát chặt chẽ trong quá trình thiết kế, thi công và cả giai đoạn khai thác. Do việc kiểm soát lực căng bằng cách lắp đặt các cảm biến đo lực trực tiếp gặp nhiều khó khăn và tốn chi phí nên các phương pháp xác định gián tiếp thông qua phân tích số liệu rung động cáp ngoài tương tự như kiểm soát lực căng trong cáp văng của cầu dây văng thường được áp dụng rộng rãi. (Hình 1)

2. Cơ sở lý thuyết của phương pháp lực căng cáp bằng phương pháp dao động

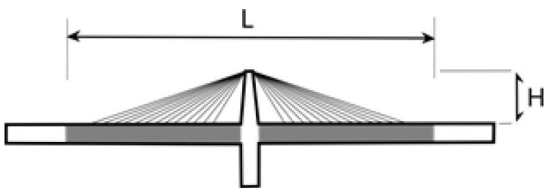
2.1 Mô hình lý thuyết của bài toán dao động cáp nghiêng



Cầu dầm bê tông dự ứng lực. $h/L=1/15-1/17$



Cầu Extradosed. $h/L=1/30-1/35, H/L=1/10-1/15$



Cầu dây văng. $h/L=1/100-1/130, H/L=1/4-1/5$

Hình 1: So sánh 3 loại kết cấu cầu: dầm BTĐƯL; cầu Extradosed và Cầu dây văng. Các tham số: L: chiều dài nhịp chính; h: chiều cao dầm chủ; H: chiều cao cột tháp cầu

Xét mô hình cáp nghiêng như trong Hình 2. Tọa độ tổng thể được xác định là trục x dọc theo dây cáp và trục y là hướng vuông góc. Giả sử chỉ xét độ cứng chống uốn và lực căng T không đổi trên toàn bộ sợi cáp thì phương trình chuyển động của dây cáp này có thể được biểu diễn như trên hình 2 [6]:

Phương trình dao động của dây cáp xiên được đưa ra bởi tác giả Shimada (1994) có dạng:

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} - h(t) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{w}{g} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Trong đó:

EI- độ cứng chống uốn của dây cáp xiên.

$v(x,t)$ -chuyển vị theo phương - y vuông góc với phương OP trên hình 1 do dao động.

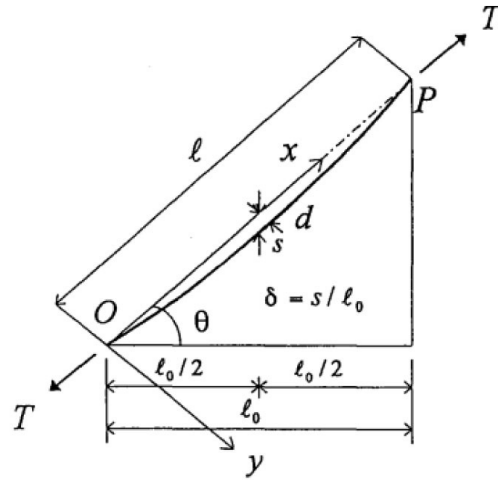
T - lực căng trong dây cáp xiên dọc theo phương OP như trên hình 1.

$h(t)$ - lực căng trong dây cáp xiên do dao động.

w - trọng lượng đơn vị dài của dây cáp xiên.

g - gia tốc trọng trường.

Đưa vào các giả thiết $v(x,t) \ll y$ và hình dạng dao động của cáp theo đường parabol cùng với các tham số mô hình như trên hình 1 có được phương trình:



Hình 2: Mô hình và các thông số phân tích dao động của dây cáp xiên

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} + \frac{w}{g} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = \frac{8d}{l^2} h(t) \quad (2)$$

Đối với các dạng thức dao động bậc cao, thành phần $h(t)$ gây hiệu ứng nhỏ ngay cả khi lực căng T là nhỏ. Do đó phương trình (2) có thể tính gần đúng là:

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} + \frac{w}{g} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

Zui và cộng sự. [6] giải phương trình (3) với một số tham số gần đúng, kết quả về lực căng được trình bày dưới đây:

+ Trường hợp sử dụng tần số dao động tự nhiên của dạng dao động thứ 1 (cáp có độ vông đủ nhỏ $3 \leq \Gamma$):

$$T = \frac{4w (f_1 l)^2}{g} \left[1 - 2.20 \frac{C}{f_1} - 0.550 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right]; \quad \text{với } (17 \leq \xi) \quad (4)$$

$$T = \frac{4w (f_1 l)^2}{g} \left[0.865 - 11.60 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right]; \quad \text{với } (6 \leq \xi \leq 17) \quad (5)$$

$$T = \frac{4w (f_1 l)^2}{g} \left[0.828 - 10.50 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right]; \quad \text{với } (0 \leq \xi \leq 6) \quad (6)$$

+ Trường hợp sử dụng tần số dao động tự nhiên của dạng dao động thứ 2 (cáp có độ vông đủ nhỏ $\Gamma \leq 3$):

$$T = \frac{w (f_2 \ell)^2}{g} \left[1 - 4.40 \frac{C}{f_2} - 1.10 \left(\frac{C}{f_2} \right)^2 \right];$$

với ($60 \leq \xi$) (7)

$$T = \frac{w (f_2 \ell)^2}{g} \left[1.03 - 6.33 \frac{C}{f_2} - 1.58 \left(\frac{C}{f_2} \right)^2 \right];$$

với ($17 \leq \xi \leq 60$) (8)

$$T = \frac{w (f_2 \ell)^2}{g} \left[0.882 - 85.0 \left(\frac{C}{f_2} \right)^2 \right];$$

với ($0 \leq \xi \leq 17$) (9)

+ Trường hợp sử dụng tần số dao động tự nhiên bậc cao ($2 < n$)

$$T = \frac{4w (f_n \cdot \ell)^2}{n^2 g} \left[1 - 2.20 \frac{n C}{f_n} \right];$$

với ($200 \leq \xi$) (10)

Phương trình (2-10) đã được phổ biến và được trình bày trong tài liệu tham khảo [6] để thiết lập lực cáp và cho cáp trong cầu dây văng và cầu vòm có dây treo. Trong tài liệu hướng dẫn bảo trì cầu dây văng ở Việt Nam [10] khuyến nghị sử dụng các phương trình ngắn gọn để tính toán nhanh đối với các cầu đang khai thác chỉ sử dụng phương thức thứ nhất:

+ Khi không xét đến độ võng của dây:

$$T = \frac{4 w (f_1 \ell)^2}{g}$$

(11)

+ Khi có xét đến độ võng của dây (không phụ thuộc Γ)

$$T = \frac{4 w (f_1 \ell)^2}{g} \left[0,857 - 10.89 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right];$$

với ($3 \leq \xi < 17$) (12)

$$T = \frac{4 w (f_1 \ell)^2}{g} \left[1 - 2.20 \left(\frac{C}{f_1} \right) - 2.00 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right];$$

với $17 \leq \xi$ (13)

Trong đó ξ , C và Γ là các tham số không nguyên được xác định theo các công thức:

$$\xi = \sqrt{\frac{T}{EI}} \ell; \quad (14); \quad C = \sqrt{\frac{Elg}{w \ell^4}}; \quad (15);$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{w \ell}{(128 EA \delta^3 \cos^5 \theta)}} \frac{0.31\xi + 0.5}{0.31\xi - 0.5} \quad (16)$$

Trong đó:

T- lực căng trong dây cáp văng (kN).

f_i - tần số dao động tự nhiên (tần số dao động riêng) của dây cáp xiên tương ứng với dạng thức dao động (mode) thứ i , xác định bằng cách đo dao

động cưỡng bức (Hz).

w - trọng lượng đơn vị dài của cáp (kN/m)

ℓ - chiều dài dây cáp văng (m); ℓ_0 - hình chiếu chiều dài dây trên trục x (m)

g - gia tốc trọng trường (9,81 m/s²)

E - mô đun đàn hồi của vật liệu dây cáp văng (kN/m²)

I - mô men quán tính chống uốn của dây cáp văng (m⁴)

A - diện tích mặt cắt ngang bó cáp (m²)

δ - tỷ lệ độ võng / độ dài dây lấy theo hệ tọa độ x - y ($\delta = s/\ell_0$)

θ - góc nghiêng của cáp xiên (độ)

2.2 Xác định tần số dao động tự nhiên của dây cáp bằng thực nghiệm tại cầu thực tế.

Sử dụng thiết bị đo gia tốc chuyên dụng (hình 4) gắn trên bề mặt vỏ ngoài của các dây cáp như ví dụ trên hình 5. Bằng cách tạo rung động cưỡng bức cho các dây cáp xiên sẽ đo được biểu đồ gia tốc dao động, sau đó dùng phương pháp phân tích nhanh (Fast Fourier Transportation - FFT) chuyển đổi sang dạng tần số để đưa vào các công thức thực nghiệm tính lực căng (hình 6). Tần số dao động tự nhiên ở dạng dao động thứ nhất của cáp có thể kiểm tra bằng công thức sau:

$$\frac{1}{f_i} = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (f_{i+1} - f_j)}{n-1} \quad (i=1 \dots n) \quad (17)$$

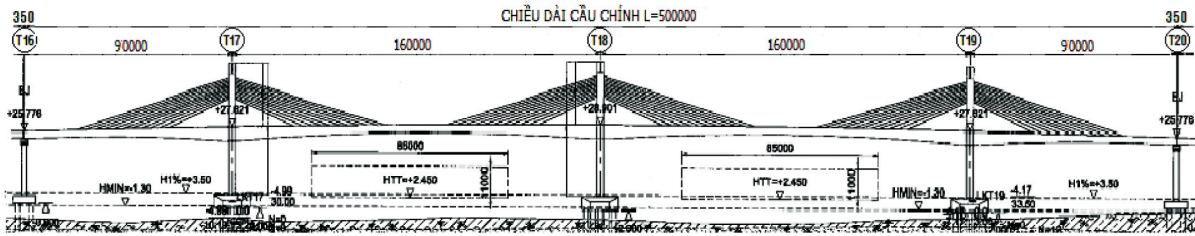
Trong đó: f_1, f_2, \dots, f_n là tần số dao động tự nhiên của cáp đo được theo các dạng thức dao động thứ 1, i, \dots, n ; f_1 - tần số dao động trung bình ứng với dạng dao động tự nhiên thứ 1.

3. Áp dụng kiểm tra lực căng trong cáp ngoài của cầu Bến Rừng

3.1 Giới thiệu về cầu Bến Rừng

Cầu Bến Rừng bắc qua sông Đá Bạch trên tuyến đường nối 2 huyện Thủy Nguyên (Hải Phòng) và huyện Quảng Yên (Quảng Ninh) được xây dựng hoàn thành năm 2024. Phần cầu chính: gồm 4 nhịp với sơ đồ (90+160+160+90)m dầm liên tục BTCT DƯL Extradosed được thi công bằng phương pháp đúc hẫng cân bằng. Mặt cắt ngang dạng dầm hộp, chiều cao dầm thay đổi từ 4,8m ở trên đỉnh trụ tới 2,5m tại vị trí giữa nhịp và đầu dầm. Hệ cáp ngoài được bố trí thành 2 mặt phẳng đối xứng mỗi mặt phẳng gồm 66 cáp chia đều cho 3 nhịp (Hình 3).

Hệ cáp ngoài sử dụng hệ thống cáp chuyên dụng cho cầu Extradosed loại tạo cáp đường kính 15,7mm, có độ tự chùng thấp đáp ứng tiêu chuẩn ASTM A416M cấp 270, mô đun đàn hồi $E=197 \times 10^3$ Mpa, f do hãng Freyssiner sản xuất, thông số cấu tạo của hệ cáp ngoài giới thiệu trên bảng 1. Trong quá trình thi công, lực căng thực tế trong các cáp



Hình 3: Sơ đồ cầu chính Extradosed cầu Bến Rừng



a) Thiết bị thu thập dữ liệu dao động



b) Thiết bị đo nhiệt độ cáp



c) Sensor đo gia tốc

Hình 4: Thiết bị chủ yếu dùng để đo dao động dây cáp của cầu dây văng

(T_0) được xác định bằng phương pháp đo trực tiếp bằng đồng hồ đo lực và theo dõi độ biến dạng dài của cáp, số liệu ghi trong bảng 1 [8,9].

3.2 Thiết bị và phương pháp đo dao động các dây cáp ngoài

Thiết bị chính dùng để đo dao động các dây cáp ngoài giới thiệu trên hình 4 gồm:

- Đầu đo gia tốc dao động ASQ-D (Servo acceleration Transducers), dải tần đo dao động: 0 - 300 Hz.

- Bộ khuếch đại tín hiệu: VAG 700A (sigal Conditioner Dedicated to ASQ).

- Bộ thiết bị phân tích, xử lý dữ liệu PULSE the Multi - Analyser System, số hiệu: 3560C, nơi sản xuất: Đan Mạch.

- Phần mềm xử lý PULSE 10.3.

- Thiết bị đo dao động của hãng Bruel Kjoer: đầu đo Polytec Laser-PDV-100, Số hiệu: 5015991, nơi sản xuất: Đức, dải tần đo dao động 0 - 22 KHz.

Thiết bị dùng để thử nghiệm cầu phải đảm bảo độ chính xác, có chứng chỉ kiểm định hiệu chỉnh hợp lệ. Thời điểm đo nên chọn vào thời gian từ 7h đến 10h sáng hoặc đo vào ban đêm để hạn chế ảnh hưởng do các phương tiện giao thông hay nhiệt độ tới kết quả đo dao động. Nhiệt độ các lần đo dao động từ 20°C đến 30°C, tốc độ gió từ 7m/s đến 14m/s.

3.3 Lựa chọn công thức phù hợp để tính toán lực căng trong cáp

Công thức áp dụng để tính toán lực căng trong cáp căn cứ vào tần số đo thực tế được chọn trong các công thức từ (4) đến (13) tùy thuộc vào các tham số ξ và Γ tính theo các phương trình (14) và (16). Công thức (11) không xét độ võng của dây nên độ chính xác thấp. (Bảng 1)

Tuy nhiên để tính được ζ và Γ theo (14) và (16) lại cần phải biết lực căng (T) trong cáp. Có thể giải quyết khó khăn này bằng một trong 2 phương pháp sau:

- + Sử dụng lực căng T_0 từ kết quả đo đạc trực tiếp bằng các thiết bị kiểm tra khi kéo căng cáp ở thời điểm kết thúc giai đoạn thi công, Phương pháp này phù hợp với các cầu mới xây dựng, hoặc các cầu đã khai thác có đủ số liệu về lực căng cáp ở hồ sơ hoàn công.

- + Đối với trường hợp không có đủ số liệu tin cậy, có thể căn cứ vào tần số đo được trên thực tế (f_1) và áp dụng công thức (11) để ước tính lực căng ước tính thay cho T_0 đưa vào (14) và (16) để tính tuy nhiên cần tính lặp để có lực căng T xấp xỉ với T_0

Trong nghiên cứu này sử dụng T_0 từ số liệu hoàn công, từ đó có được các giá trị ξ , C và Γ ghi trong bảng 1. Kết quả trên bảng 1 cho thấy công thức phù hợp để tính toán lực căng trong các cáp ngoài của cầu Bến Rừng là công thức (4).

Bảng 1: Thông số kỹ thuật của hệ cáp ngoài sử dụng cho cầu Bến Rừng (a. dàn dây phía hạ lưu; b. dàn dây phía thượng lưu)

Tháp	Nhóm cáp	Chiều dài thiết kế	Đ/k bó cáp D	Diện tích m/c A $\times 10^{-6}$	Trọng lượng đơn vị w	EI	EA ($\times 10^3$)	Lực căng T_0	$\delta \times 10^{-3}$	θ	$C(10^{-3})$	ξ	Γ
		(m)	mm	(m^2)	(kN/m)	($kN.m^2$)	(kN)	(kN)	-	Độ	-	-	-
T17	C[1a/1b;22a/22b]	69,186	72	4050	0,3584	262,64	793,8	3289	1,022	16,02	17,67	244,9	11,56
	C[2a/2b;21a/21b]	65,129						3290	0,911	16,33	19,99	226,8	19,65
	C[3a/3b;20a/20b]	61,074						3294	0,905	16,69	22,73	216,4	19,28
	C[4a/4b;19a/19b]	57,022						3299	0,867	17,10	26,08	202,0	19,97
	C[5a/5b;18a/18b]	52,794						3306	0,786	17,58	32,11	187,4	22,42
	C[6a/6b;17a/17b]	48,930	65	3300	0,2921	174,44	646,8	2720	0,719	18,13	33,01	192,8	24,47
	C[7a/7b;16a/16b]	44,893						2726	0,672	18,79	38,03	177,5	26,24
	C[8a/8b;15a/15b]	40,863						2731	0,616	19,58	45,91	161,5	29,41
	C[9a/9b;14a/14b]	37,313						2735	0,637	20,28	55,03	147,7	27,16
	C[10a/10b;13a/13b]	33,769						2738	0,518	21,13	67,14	133,8	35,73
C[11a/11b;12a/12b]	30,236						2741	0,469	22,17	83,62	119,7	39,94	
T18	C[23a/23b;44a/44b]	69,186	72	4050	0,3584	262,64	793,8	3101	1,084	16,02	17,71	238,0	15,55
	C[24a/24b;43a/43b]	65,129						3120	1,016	16,33	19,99	224,8	19,86
	C[25a/25b;42a/42b]	61,074						3141	0,949	16,69	22,73	211,3	17,95
	C[26a/26b;41a/41b]	57,022						3163	0,885	17,10	26,08	197,9	19,42
	C[27a/27b;40a/40b]	52,794						3185	0,816	17,58	32,11	183,8	20,42
	C[28a/28b;39a/39b]	48,930	65	3300	0,2921	174,44	646,8	2634	0,751	18,13	33,01	190,5	22,32
	C[29a/29b;38a/38b]	44,893						2650	0,654	18,79	38,03	175,1	25,12
	C[30a/30b;37a/37b]	40,863						2666	0,631	19,58	45,91	159,8	31,02
	C[31a/31b;36a/36b]	37,313						2678	0,509	20,28	55,03	146,3	38,13
	C[32a/32b;35a/35b]	33,769						2689	0,527	21,13	67,14	132,7	34,93
C[33a/33b;34a/34b]	30,236						2700	0,477	22,17	83,62	119,1	35,66	
T19	C[45a/45b;66a/66b]	69,186	72	4050	0,3584	262,64	793,8	3110	1,068	16,02	16,02	240,1	11,22
	C[46a/46b;65a/65b]	65,129						3130	0,916	16,33	19,99	226,8	19,65
	C[47a/47b;64a/64b]	61,074						3152	0,906	16,69	22,73	218,6	19,26
	C[48a/48b;63a/63b]	57,022						3175	0,867	17,10	26,08	179,8	19,87
	C[49a/49b;62a/62b]	52,794						3199	0,786	17,58	32,11	187,4	22,92
	C[50a/50b;61a/61b]	48,930	65	3300	0,2921	174,44	646,8	2645	0,719	18,13	33,01	194,3	24,67
	C[51a/51b;60a/60b]	44,893						2662	0,694	18,13	33,01	192,8	24,57
	C[52a/52b;59a/59b]	40,863						2678	0,652	18,79	38,03	177,5	26,64
	C[53a/53b;58a/58b]	37,313						2690	0,636	19,58	45,91	161,5	29,81
	C[54a/54b;57a/57b]	33,769						2701	0,639	20,28	55,03	147,7	27,46
C[55a/55b;56a/56b]	30,236						2711	0,515	21,13	67,14	133,8	35,93	

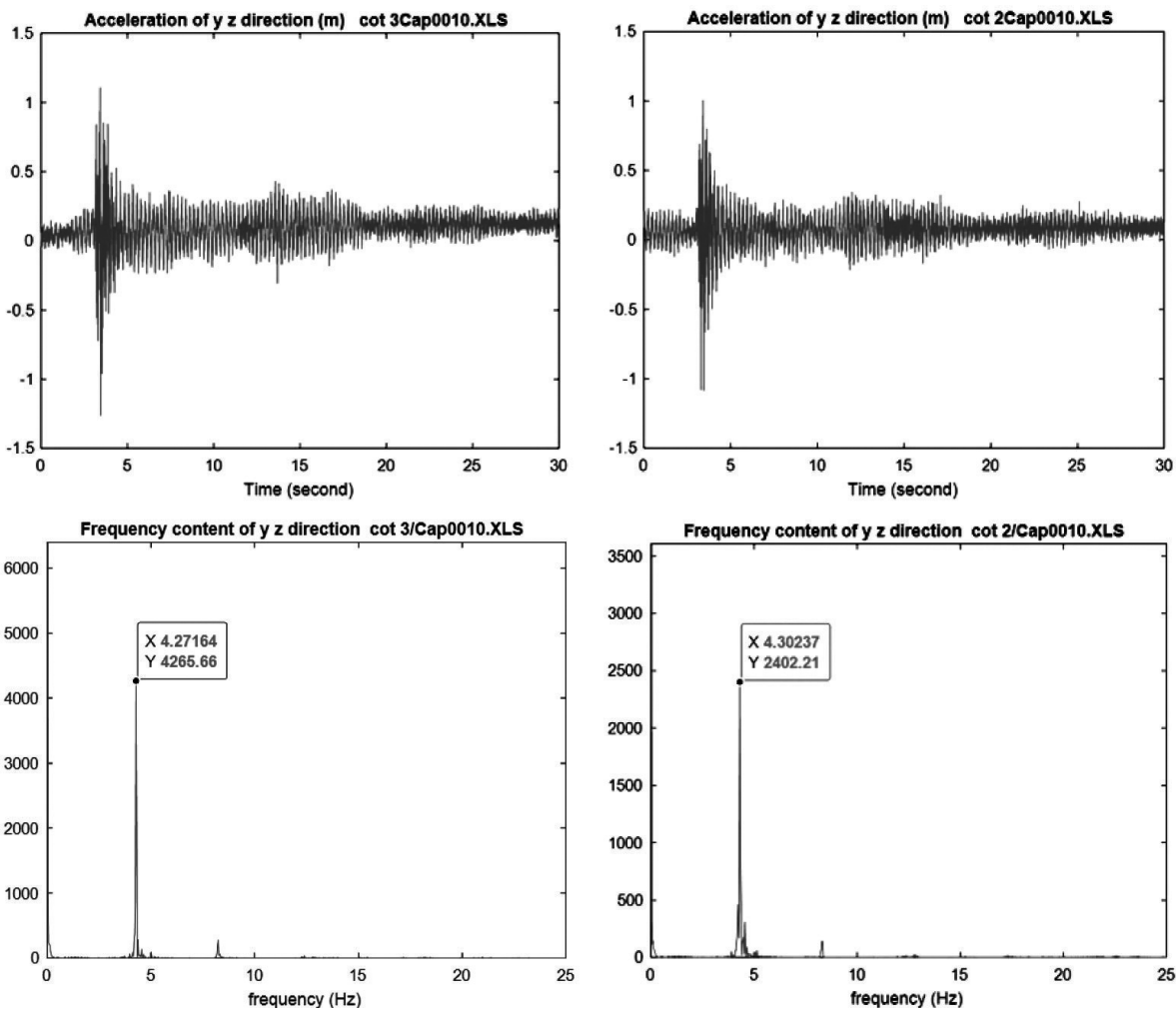
3.4 Nâng cao độ chính xác khi tính toán lực căng bằng việc xét cấu tạo thực tế của cáp

Nhiều công trình nghiên cứu của các tác giả trên thế giới đã cho thấy công thức của Zui và các công sự đề nghị từ năm 1996 đã được thí nghiệm kiểm chứng bằng mô hình thí nghiệm với độ sai số nhỏ hơn 4% [6]. Tuy nhiên khi áp dụng vào công trình

cầu thực tế đã dẫn đến độ sai sót đáng kể do các dây cáp có cấu tạo khác biệt như hai đầu dây không được ngâm chặt như mô hình nghiên cứu lý thuyết hoặc lắp thêm các thiết bị giảm chấn ở đầu dây. Kết quả phân tích lực căng cáp bằng phương pháp dao động ở bảng 2 cũng chỉ ra độ chênh lệch lớn nhất so với kết quả đo lực căng bằng phương pháp đo trực



Hình 5: Tổng thể cầu Bến Rừng và đo dao động dây cáp ngoài ngày 25/04/2025



Hình 6: Biểu đồ gia tốc và biểu đồ tần số của một số dây cáp ngoài cầu Bến Rừng

tiếp. Vấn đề này đã được Soojin Cho và các cộng sự [1] đề nghị điều chỉnh cho trường hợp có thiết bị giảm chấn ma sát bằng công thức:

$$L1 = \ell - d \quad (18)$$

Trong đó: $L1$ - chiều dài có hiệu của dây cáp; ℓ - chiều dài toàn bộ của dây cáp và d là đường kính của cáp.

Hoàng Hà và cộng sự cũng đã công bố một quả tương tự trong quan trắc sự thay đổi của lực căng

trong cáp dây văng của cầu Bính (Việt Nam) với việc xét đến chiều dài dao động thực tế của cáp khi có lắp thiết bị giảm chấn bằng thủy lực ở 2 đầu neo cáp [7]. Như vậy, cần quan tâm tới cấu tạo thực tế của các cáp ngoài trong các cầu Extradosed thường sử dụng dạng neo yên ngựa để giữ hệ cáp trên đỉnh tháp (hình 7) và do chiều dài không lớn nên thường không cần sử dụng thiết bị giảm chấn cho cáp [8]. Với cấu tạo neo kiểu yên ngựa như trên, thực tế cáp

Bảng 2: Kết quả tính lực căng cáp bằng phương pháp dao động theo chiều dài dây cáp theo lý thuyết (ℓ) và xét chiều dài cáp làm việc thực tế (ℓ_1)

Cáp	Chiều dài cáp			Tần số đo (Hz)	Lực căng cáp thực tế T_0 (kN)	Lực căng cáp T_1 tính theo ℓ		Lực căng cáp T_2 tính theo ℓ_1	
	ℓ (m)	ℓ_{FDL} (m)	ℓ_1 (m)			T_1 (kN)	$(T_1-T_0)/T_0$ (%)	T_2 (kN)	$(T_2-T_0)/T_0$ (%)
C1a/C22b	69,186	3,457	70,914	2,090/2,075	3289/3109	2918/2955	-11,3/-4,95	3150/3105	-4,22/-013
C2a/C21b	65,129	3,409	66,833	2,243/2,228	3290/3130	3057/3016	-7,08/-3,63	3219/3176	+1,01/+1,48
C3a/C20b	61,074	3,384	62,766	2,396/2,381	3294/3152	3064/3026	-6,99/-4,01	3236/3196	-1,76/+1,40
C4a/C19b	57,022	3,340	58,692	2,609/2,549	3299/3175	3168/3024	-3,97/-4,76	3356/3204	+1,74/+0,91
C5a/C18b	52,799	3,266	54,427	2,823/2,745	3306/3198	3164/2992	-4,28/-5,44	3363/3179	+1,73/-0,58
C6a/C17b	48,930	3,224	50,542	2,960/2,945	2720/2645	2436/2411	-10,4/-8,84	2599/2573	-4,45/-2,72
C7a/C16b	44,893	3,184	46,485	3,274/3,204	2726/2662	2512/2406	-7,85/-9,61	2693/2579	-1,20/-3,11
C8a/C15b	40,863	3,146	42,436	3,579/3,497	2731/2678	2473/2361	-9,44/-11,8	2667/2546	-2,34/-4,92
C9a/C14b	37,313	3,103	38,865	3,845/3,861	2735/2690	2374/2394	-13,2/-11,0	2660/2682	-2,73/-0,30
C10a/C13b	33,769	3,066	35,302	4,273/4,364	2738/2701	2393/2496	-12,6/-7,59	2615/2727	-4,48/+0,96
C11a/C12b	30,236	3,030	31,751	4,791/4,944	2741/2711	2403/2559	-12,3/-5,61	2636/2807	-3,83/+3,54
C23a/C44b	69,186	3,457	70,914	2,106/2,075	3101/3110	2998/2910	-3,32/-6,42	3150/3058	+1,58/-1,67
C24a/C43b	65,129	3,409	66,833	2,274/2,243	3158/3120	3142/3057	+0,45/-2,01	3308/3219	+4,75/+3,17
C25a/C42b	61,074	3,384	62,766	2,336/2,365	3141/3141	3027/3103	-3,62/-1,21	3197/3277	+1,78/+4,34
C26a/C41b	57,022	3,340	58,692	2,525/2,579	3160/3163	2962/3090	-6,27/-1,18	3138/3273	-0,70/+3,59
C27a/C40b	52,799	3,266	54,427	2,808/2,792	3185/3185	3130/3094	+1,73/-2,83	3326/3288	+4,43/+3,23
C28a/C39b	48,930	3,224	50,542	2,976/2,945	2648/2634	2454/2403	-2,26/-8,77	2618/2564	-1,13/-2,66
C29a/C38b	44,893	3,184	46,485	3,265/3,189	2650/2651	2491/2376	-6,02/-10,4	2670/2548	-0,79/-3,90
C30a/C37b	40,863	3,146	42,436	3,525/3,501	2666/2666	2395/2362	-10,2/-11,4	2582/2547	-3,15/-4,45
C31a/C36b	37,313	3,103	38,865	3,906/3,876	2687/2678	2451/2413	-8,78/-10,2	2659/2618	-1,04/-2,24
C32a/C35b	33,769	3,066	35,302	4,410/4,349	2689/2690	2549/2479	-5,20/-7,84	2786/2709	+3,60/-0,71
C33a/C34b	30,236	3,030	31,751	4,990/4,974	2738/2730	2606/2590	-2,58/-4,15	2874/2856	+4,97/+4,63
C45a/C66b	69,186	3,457	70,914	2,121/2,075	3110/3289	3005/2916	-3,38/-11,3	3157/3164	-1,51/-3,81
C46a/C65b	65,129	3,409	66,833	2,274/2,212	3130/3290	3072/2973	-1,85/-9,64	3235/3131	+3,34/-4,83
C47a/C64b	61,074	3,384	62,766	2,411/2,365	3152/3294	3101/2984	-1,62/-9,41	3276/3152	+3,91/-4,31
C48a/C63b	57,022	3,340	58,692	2,625/2,594	3175/3299	3061/3132	-3,59/-0,51	3243/3423	+2,15/+3,76
C49a/C62b	52,799	3,266	54,427	2,853/2,808	3199/3306	3056/3131	-4,47/-5,29	3247/3327	+1,50/+0,63
C50a/C61b	48,930	3,224	50,542	2,976/2,899	2645/2718	2562/2432	-3,13/-10,5	2722/2583	+0,15/+4,96
C51a/C60b	44,893	3,184	46,485	3,250/3,189	2662/2726	2383/2463	-10,5/-9,65	2555/2640	-4,02/-3,13
C52a/C59b	40,863	3,146	42,436	3,586/3,479	2678/2731	2411/2509	-9,97/-8,13	2600/2705	-2,91/-0,95
C53a/C58b	37,313	3,103	38,865	3,999/3,906	2690/2735	2569/2451	-4,50/-10,4	2787/2659	+3,61/-2,78
C54a/C57b	33,769	3,066	35,302	4,364/4,334	2701/2738	2496/2462	-7,59/-10,1	2728/2690	-1,00/-1,75
C55a/C56b	30,236	3,030	31,751	4,929/4,868	2711/2742	2543/2480	-7,12/-9,56	2804/2735	+2,42/-0,26

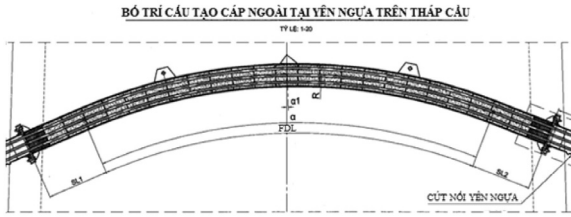
có thể dao động tự do trên một chiều dài lớn hơn so với mô hình tính toán lý thuyết đã được chọn là khoảng cách từ neo trên dầm đến điểm giao các trục tháp với tim thẳng đứng của tháp.

Yếu tố này có thể xem xét bằng việc lấy chiều dài tính toán của cáp theo công thức sau:

$$\ell_{tt} = \ell + 0,5 \ell_{FDL} \quad (19)$$

Trong đó: ℓ_{tt} - chiều dài điều chỉnh phù hợp với cấu tạo thực tế của cáp; ℓ - chiều dài cáp theo lý thuyết; ℓ_{FDL} - chiều dài của đoạn cáp trên yên ngựa.

Kết quả tính toán và so sánh lực căng của 66 cáp ngoài của cầu Bến Rừng theo lực căng thực tế (T_0),



Hình 7: Cấu tạo đường cáp ngoài tại vị trí yên ngựa trên tháp ở cầu Bến Rừng.

lực căng xác định bằng phương pháp dao động sử dụng chiều dài lý thuyết (ℓ) và lực căng xác định bằng phương pháp dao động sử dụng chiều dài điều chỉnh theo thực tế (ℓ_{tt}).

5. Kết luận:

- Phương pháp xác định lực căng trong cáp ngoài của các cầu Extradosed có ưu điểm là đơn giản, nhanh và đạt độ chính xác thỏa đáng, có thể áp dụng thuận lợi để đánh giá lực căng trong các cáp trong cả giai đoạn thi công và trong suốt quá trình khai thác công trình.

- Các cáp ngoài của cầu Extradosed của cầu Bến Rừng có chiều dài nhỏ và độ mảnh lớn nên phù hợp sử dụng công thức (4) do Zui và các cộng sự đề xuất.

- Với việc phân tích và đưa vào cách xác định chiều dài chịu dao động thực tế của các cáp ngoài phù hợp với cấu tạo thực tế đã cho phép giảm sai số lớn nhất của kết quả đo lực căng từ -13,20% xuống còn +4,96%, làm tăng độ chính xác của phương pháp xác định lực căng cáp với mức độ đáng kể

- Nghiên cứu này cũng cho thấy sự cần thiết xác định chính xác tham số thực tế của các dây cáp

văng và sử dụng số liệu lưu trữ lực căng ban đầu (T_0) khi xác định lực căng cáp bằng phương pháp dao động trong công tác thử tải các công trình cầu Extradosed trên thực tế. □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Cho, S., J. Yim, S.W. Shin, H.-J. Jung, C.-B. Yun, and M.L., Wang, Comparative field study of cable tension measurement for a cable-stayed bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 2013. 18 (8): p. 748-757.
- [2]. Duan, Y.-F., R. Zang, C.-Z. Dong, Y.-Z. Luo, S.W. Or, Y. Zhao, and K.-Q. Fan, Development of elasto-magneto-electric (EME) sensor for in-service cable force monitoring. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2016. 16(04): p. 1640016.
- [3]. Haji Agha Mohammad Zarbaf, S.E., M. Norouzi, R.J. Allemang, V.J. Hunt, A. Helmicki, and D.K. Nims, Stay force estimation in cable-stayed bridge using stochastic subspace identification methods. *Journal of Bridge Engineering*, 2017. 22 (9): p. 04017055.
- [4]. Kim, B.H. and T. Park, Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method. *Journal of sound and Vibration*, 2007. 304(3-5): p. 660-676.
- [5]. Bao, Y., Z. Shi, J.L. Beck, H. Li, and T.Y. Hou, Identification of time-varying cable tension forces based on adaptive sparse time-frequency analysis of cable vibrations. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017. 24(3): p. e1889.
- [6]. Zui, H., T. Shinke, and Y. Namita, Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method. *Journal of structural engineering*, 1996. 122(6): p. 651-656.
- [7]. Ha Hoang, Vu Hoang, Duong Huong Nguyen, Long-Term Monitoring of Cable Tension Force in Cable-stayed Bridges using the Vibration Method. *The Case Study of Binh Bridge, Vietnam. Engineering, Technology & Applied Science Research* Vol. 15, No. 1, 2025, 20300-20313
- [8]. Hồ sơ thiết kế cầu Bến Rừng Việt Nam- 2022.
- [9]. Hồ sơ thử tải cầu Bến Rừng Việt Nam -4/2024
- [10]. Dự án cầu Kiến-Tài liệu hướng dẫn bảo dưỡng cầu, Việt Nam- 2004.

TRIỂN KHAI MÔI TRƯỜNG DỮ LIỆU CHUNG (CDE)...

Tiếp theo trang 29

- [13] Thư N. A., Phong N. T., and Hân T. A., "Đánh giá hiệu quả của việc ứng dụng mô hình thông tin công trình (BIM) trong quản lý thiết kế dự án hạ tầng kỹ thuật đô thị," *JOMC*, vol. 14, no. 01, Art. no. 01, Feb. 2024, doi: 10.54772/jomc.01.2024.627.
- [14] Z. Akob, M. Zaidee, A. Hipni, and R. Koka, "Coordination and Collaboration of Information for Pan Borneo Highway (Sarawak) via Common Data Environment (CDE)," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 512, no. 1, p. 012001, Apr. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/512/1/012001.
- [15] C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, and K. Liston, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. John Wiley & Sons, 2011.
- [16] S. A. Lestari, H. Purwanto, and J. Saputra, "Application of

common data environment (cde) as a method of design review in construction project," *Logic: Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi*, vol. 22, no. 2, Art. no. 2, Jul. 2022, doi: 10.31940/logic.v22i2.103-109.

- [17] Luân T., "Nhiều khó khăn khi áp dụng BIM trong xây dựng," *Báo Kinh tế đô thị - Đọc tin tức thời sự kinh tế 24h mới nhất*. Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://kinhtedothi.vn/nhieu-kho-khan-khi-ap-dung-bim-trong-xay-dung.html>
- [18] Thanh Nga, "Xây dựng mô hình dữ liệu chung đáp ứng yêu cầu dễ dàng kết nối và tải dữ liệu," *Tạp chí Xây dựng - Bộ xây dựng*. Accessed: Mar. 20, 2025. [Online]. Available: <https://tapchixaydung.vn/xay-dung-mo-hinh-du-lieu-chung-dap-ung-yeu-cau-de-dang-ket-noi-va-tai-du-lieu-20201224000021066.html>
- [19] Cổng Thông tin điện tử Chính phủ, "Nghị định số 175/2024/NĐ-CP của Chính phủ: Quy định chi tiết một số điều và biện pháp thi hành Luật Xây dựng về quản lý hoạt động xây dựng." Accessed: Mar. 22, 2025. [Online]. Available: <http://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=212166>