

Phân tích biến dạng và chuyển vị trong kết cấu cầu treo dây văng bất đối xứng

Analysis of deformations and displacements in asymmetric suspension bridge

> **NGÔ VĂN BÌNH, NGÔ VĂN QUÂN**

Khoa Xây dựng, Học viện hàng không Việt Nam

TÓM TẮT

Cầu treo dây văng nói chung và cầu treo dây văng bất đối xứng nói riêng là dạng kết cấu siêu tĩnh bậc cao có độ mạnh lớn và thường nhạy cảm với các loại tải trọng như tải trọng gió, động đất,... Vì là dạng kết cấu vượt nhịp lớn nên khi tính toán thiết kế thường được chọn các dạng tiết diện hình học sao cho giảm được tải trọng bản thân, diện tích chắn gió và tiết diện hợp lý về khả năng chống xoắn. Do đó, độ mạnh của kết cấu sẽ lớn và trong giai đoạn khai thác thì chuyển vị thường lớn. Đồng thời dao động thì phức tạp. Vì vậy khi tính toán thiết kế cầu treo dây văng phải chú ý nhiều đến các trạng thái giới hạn sử dụng và trạng thái giới hạn đặc biệt. Để tính toán theo trạng thái giới hạn sử dụng ta phải sử dụng các yếu tố về chuyển vị và biến dạng. Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến biến dạng, chuyển vị của kết cấu cầu treo dây văng như: chiều dài kết cấu nhịp, chiều cao trụ tháp, tiết diện của dầm chủ, trụ tháp,... Trong các bài báo mà tác giả đã công bố trong số tháng 9/2022 và tháng 2/2023 trên Tạp chí Xây dựng các tác giả đã trình bày về ảnh hưởng của tính bất đối xứng của chiều cao trụ tháp đối với sự phân bố nội lực trong dầm chủ, trụ tháp, cáp chủ và cáp treo. Đồng thời các tác giả cũng đề xuất một số tỷ lệ hợp lý về chiều cao trụ tháp và nhịp chính theo các yếu tố về nội lực [8], [12]. Trong bài báo này nhóm tác giả sẽ trình bày ảnh hưởng của tính bất đối xứng chiều cao trụ tháp đến biến dạng và chuyển vị của một số bộ phận chính trong kết cấu cầu treo dây văng bất đối xứng. Thông qua việc sử dụng phần mềm phân tích kết cấu cầu Midas/civil.

Từ khóa: Cầu treo dây văng; cầu treo dây văng bất đối xứng; biến dạng và chuyển vị trong cầu treo dây văng; biến dạng của dầm chủ trong cầu treo dây văng; biến dạng của cáp chủ; biến dạng của cáp treo.

ABSTRACT

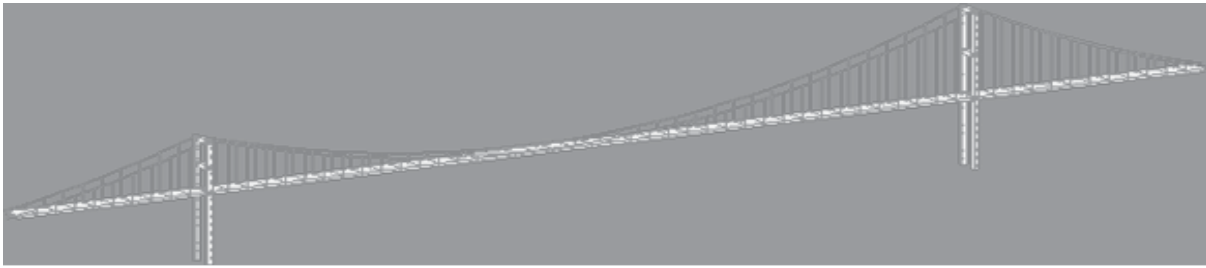
Suspension bridges in general and asymmetric suspension bridges in particular are high-level superstatic structures with great strength and are often sensitive to loads such as wind loads, earthquakes, etc. Because it is a large span structure, when calculating the design, geometric cross-sections are often chosen to reduce self-load, wind protection area and reasonable cross-section for torsional resistance. Therefore, the strength of the structure will be large and during the exploitation phase the displacement is often large. At the same time, oscillation is complicated. Therefore, when calculating the design of a suspension bridge, much attention must be paid to the use limit states and special limit states. To calculate according to the limit state of use, we must use displacement and deformation factors. There are many factors that affect the deformation and displacement of the suspension bridge structure such as: span structure length, tower pier height, cross-section of main beams, tower piers, etc. In the articles written by the author Published in the September 2022 and February 2023 at Journal of Construction, the authors presented the influence of the asymmetry of tower pier height on the distribution of internal forces in main beams and piers. tower, main cable and car cable. And the authors also proposed some reasonable ratios for the height of the tower and main span according to internal force factors [8], [12]. In this article, the authors will present the influence of tower pier height asymmetry on the deformation and displacement of some main parts in the asymmetric suspension bridge structure. Through the use of Midas/civil bridge structural analysis software.

Keywords: Suspension bridge; asymmetrical suspension bridge; deformation and displacement in suspension bridge; deformation of main beam in suspension bridge; deformation of main cable; deformation of suspension cable.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cầu treo dây văng có nhiều ưu điểm trong đó khả năng khai thác tính năng của vật liệu trong các bộ phận chịu lực chính đã giúp cho cầu treo dây văng vượt được khẩu độ lớn

mà các loại kết cấu khác không làm được kể cả cầu dây văng. Cầu treo dây văng được coi là dạng cầu đẹp, nhẹ, chịu lực tốt và phổ biến trên thế giới cho các cầu nhịp lớn [1], [8], [12].



Hình 1. Mô hình tính toán cầu treo dây văng biến dạng nhỏ [8].

Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến biến dạng và chuyển vị trong cầu treo dây văng như: chiều dài nhịp, cấu tạo dầm chính, số lượng mặt phẳng dây treo, chiều cao tháp cầu, vật liệu... Thực tế thì cầu treo dây văng thường có kết cấu đối xứng về chiều cao trụ tháp và kết cấu nhịp. Tuy nhiên, không phải bất kỳ ở vị trí nào chúng ta cũng có thể xây dựng được một kết cấu đối xứng như mong đợi. Vì vị trí trụ tháp và chiều dài nhịp phụ thuộc vào các điều kiện địa hình, địa chất, thủy văn và yêu cầu khổ thông thuyền. Do đó tính bất đối xứng của chiều cao tháp cầu trực tiếp ảnh hưởng đến chiều dài nhịp và sau đó là ảnh hưởng đến nội lực, biến dạng và chuyển vị trong kết cấu [8], [12]. Trong đó có công trình cầu treo dây văng bất đối xứng đã được xây dựng là Cầu New San Francisco-Oakland bay xây dựng năm 2002 [7].

Để hiểu rõ về ảnh hưởng của sự bất đối xứng trong cấu tạo về chiều cao trụ tháp đối với sự phân bố nội lực trong các bộ phận chính của kết cấu cầu treo dây văng như dầm chủ, trụ tháp, cáp chủ, cáp treo. Thì trong các công bố báo cáo trên Tạp chí Xây dựng số tháng 9/2022 và tháng 2/2023 các tác giả đã dựa vào sự phân bố nội lực và đã chọn được tỷ lệ bất đối xứng hợp lý giữa các trụ tháp [8], [12]. Tuy nhiên, như đã đề cập ở phần tóm tắt khi xét đến kết cấu cầu treo dây văng là chúng ta cần phải quan tâm đến yếu tố biến dạng và chuyển vị. Do đó, trong bài báo này các tác giả sẽ nghiên cứu về vấn đề trên trong kết cấu cầu treo dây văng bất đối xứng. Mô hình phân tích kết cấu sẽ được thực hiện bằng phần mềm Midas/civil [3].

Về tải trọng, tiêu chuẩn tính toán và các tổ hợp tải trọng sẽ được xác định theo tiêu chuẩn thiết kế cầu TCVN11823-2017 (được điều chỉnh từ 22TCN272-05) [2], [8], [12].

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thông số về trụ tháp và nhịp chính cầu treo dây văng

Cầu treo dây văng gồm các bộ phận chính sau: Dầm chủ, trụ tháp, cáp chủ, cáp treo, mố neo. Trong đó trụ tháp là một trong những bộ phận chính tạo nên đặc điểm nổi bật và đặc trưng cho kết cấu cầu treo dây văng. Vật liệu thiết kế trụ tháp thường là thép hoặc bê tông cốt thép. Trụ tháp được phân loại thành tháp cứng, tháp mềm và tháp chân khớp khi xét đến độ cứng của trụ tháp. Tháp mềm thường dùng ở cầu treo nhiều nhịp để cung cấp đủ độ cứng cho cầu. Tháp chân khớp thường dùng ở cầu treo nhịp ngắn [5], [6], [8], [12].

Chiều dài nhịp chính L , chiều cao trụ tháp H và tỷ lệ L/H của một số cầu treo dây văng được thống kê sau đó lựa chọn các sơ đồ để nghiên cứu [5], [6].

Qua thống kê giữa tỷ lệ giữa chiều cao trụ tháp H và nhịp chính L_0 ta thấy $H/L_0=0.110 \sim 0.333$. Mặt khác ta lại có $H/L_1=0.3 \sim 1.0$. Từ đây ta chọn $H/L_1=0.6 \sim 0.8$ để xem xét nghiên cứu. (Với $H=h_1 + h_2$: Trong đó $h=40m=const$ là chiều cao từ đỉnh bệ đến dầm, h_1 là chiều cao từ dầm đến đỉnh trụ tháp. Vậy ta chọn $h_1/L_1=0.3 \sim 0.4$) [8], [12].

2.2. Lựa chọn các sơ đồ kết cấu phân tích

Tương tự như các công bố trước đây, các tác giả vẫn lựa chọn các sơ đồ kết cấu như đã chọn để phân tích về ảnh hưởng của tính bất đối xứng đến nội lực. Các sơ đồ kết cấu có các thông số kỹ thuật như sau:

Chiều dài các nhịp giữa là không thay đổi với $L_0=400m$.

Chiều dài nhịp biên bên phải không thay đổi với $L_2=125m$.

Chiều dài nhịp biên bên trái không thay đổi với $L_1=100m$.

Chiều cao phần trụ tháp từ mặt cầu đến chân tháp là không thay đổi và bằng 40m

Khổ cầu rộng 11m, cho hai làn xe và hai làn bộ hành.

Neo cáp chủ: dạng neo vào đất nền bằng khối neo.

Trụ tháp: Dạng khung cứng được bố trí 3 giằng ngang tại đỉnh trụ tháp, giữa đỉnh trụ tháp và mặt cầu, tại vị trí bản mặt cầu.

Dạng liên kết của cáp chủ tại đỉnh trụ tháp: Cáp chủ được ngàm vào đỉnh của trụ tháp và trong tất cả các Trường hợp nghiên cứu tính không thông thuyền xem như không thay đổi.

Để xem xét tính bất đối xứng của trụ tháp đến sự thay đổi nội lực ta lần lượt cho chiều cao trụ tháp thay đổi với các trường hợp kết cấu như sau:

Trong bài báo này nghiên cứu phân tích 24 trường hợp chiều cao trụ tháp thay đổi (trong phạm vi: $h_1/L_1=0.24 \sim 0.45$; trong đó L_1 , h_1 là chiều dài nhịp biên và chiều cao trụ tháp tương ứng) để từ đó tìm ra mối quan hệ giữa tính bất đối xứng của chiều cao trụ tháp đến biến dạng và chuyển vị trong cầu treo dây văng.

Chiều cao trụ tháp phía nhịp biên trái (với: $L_1=100m$) có chiều cao nhỏ nhất tính từ cao độ mặt cầu là $h_1=30m$ chiều cao lớn nhất $h_1=45m$. Chiều cao trụ tháp 2 bên phía nhịp biên phải có chiều cao nhỏ nhất tính từ cao độ mặt cầu là $h_2=30m$ đến chiều cao $h_2=55m$. Các tỷ lệ chiều cao trụ tháp được tham khảo theo [8], [12].

2.3. Các thông số vật liệu, đặc trưng hình học và tải trọng

Để đồng nhất và có thể đưa ra cái nhìn chính xác, các tác giả vẫn lấy các thông số về vật liệu, đặc trưng hình học và tải trọng như đã công bố trước đây [8], [12].

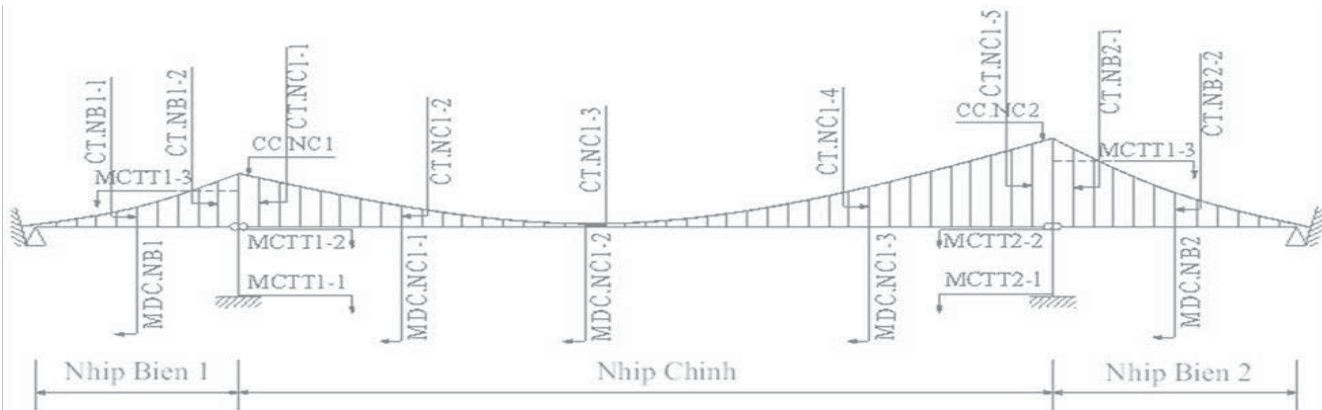
Tải trọng được xem xét trong bài báo này bao gồm: Tĩnh tải bản thân kết cấu (TTBT), hoạt tải HL93 bao gồm tải trọng xe 3 trục, xe 2 trục, tải trọng làn và tải trọng người theo TCVN11823-2017. Và được tổ hợp theo trạng thái giới hạn cường độ 1 (TTGHCD1) và trạng thái giới hạn sử dụng (TTGHSD) [2].

2.4. Mô hình tính toán

Các tác giả sử dụng phần mềm phân tích kết cấu Midas/civil để phân tích và tính toán. Trong bài báo này chỉ xem xét phân tích trong giai đoạn khai thác nên mô hình lựa chọn để phân tích tính toán là mô hình biến dạng nhỏ. Quá trình phân tích này không đề cập đến việc phân tích động lực học công trình, ổn định tổng thể của kết cấu cũng như kiểm toán ứng suất trong các tiết diện [8], [12].

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Đối với dầm chủ ta xem xét chuyển vị tại các mặt cắt: giữa nhịp chính (MDC.NC1-2), giữa nhịp biên trái (MDC.NB1), giữa nhịp biên phải (MDC.NB2). Đối với trụ tháp ta xem xét chuyển vị tại các mặt cắt: đỉnh trụ tháp bên trái (ĐTT1) và đỉnh trụ tháp bên phải (ĐTT2). Đối với biến dạng dài của cáp treo ta xem xét tại các vị trí: giữa nhịp biên trái (CTNB1), giữa nhịp giữa (CTNC1-2), giữa nhịp biên phải (CTNB2). Các vị trí mặt cắt như hình 2.



Hình 2. Vị trí các mặt cắt và đối tượng khảo sát của cầu treo dây văng [12]

Kết quả chuyển vị tại các vị trí khảo sát trên dầm chủ được trình bày trong các bảng từ bảng 1 đến 3.

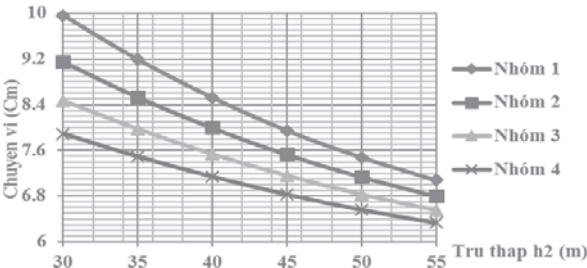
Bảng 1. Chuyển vị tại mặt cắt giữa nhịp biên trái MDC.NB1

Nhóm	TH	Chuyển vị của các trường hợp tải trọng (cm)			
		TTGHCD1		TTGHSD	
		Δ	Δ_i/Δ_1	Δ	Δ_i/Δ_1
1	1	1.405	100%	0.888	100%
	2	1.455	103.6%	0.914	102.9%
	3	1.504	107.0%	0.940	105.8%
	4	1.546	110.0%	0.962	108.3%
	5	1.593	113.4%	0.987	111.1%
	6	1.631	116.1%	1.006	113.3%
2	7	1.403	99.8%	0.875	98.5%
	8	1.452	103.3%	0.901	101.5%
	9	1.500	106.8%	0.927	104.4%
	10	1.546	110.0%	0.952	107.2%
	11	1.589	113.1%	0.975	109.8%
	12	1.629	115.9%	0.996	112.2%
3	13	1.407	100.1%	0.869	97.8%
	14	1.454	103.5%	0.895	100.8%
	15	1.501	106.8%	0.921	103.7%
	16	1.547	110.1%	0.945	106.4%
	17	1.590	113.2%	0.969	109.1%
	18	1.629	115.9%	0.990	111.5%
4	19	1.415	100.7%	0.868	97.7%
	20	1.460	103.9%	0.893	100.6%
	21	1.506	107.2%	0.918	103.4%
	22	1.550	110.3%	0.942	106.1%
	23	1.592	113.3%	0.965	108.7%
	24	1.632	116.2%	0.987	111.1%

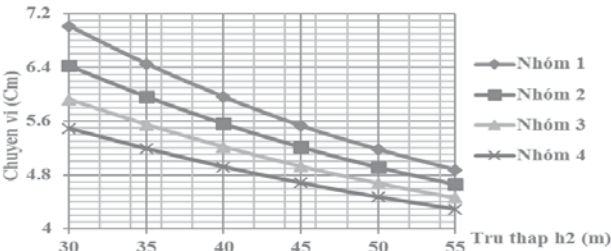
Bảng 2. Chuyển vị tại mặt cắt giữa nhịp giữa MDC.NC1-2

Nhóm	TH	Chuyển vị của các trường hợp tải trọng (cm)			
		TTGHCD1		TTGHSD	
		Δ	Δ_i/Δ_1	Δ	Δ_i/Δ_1
1	1	9.958	100%	7.012	100%

	2	9.189	92.3%	6.451	92.0%
	3	8.524	85.6%	5.959	85.0%
	4	7.947	79.8%	5.531	78.9%
	5	7.480	75.1%	5.178	73.8%
	6	7.080	71.1%	4.875	69.5%
	7	9.153	91.9%	6.427	91.6%
2	8	8.534	85.7%	5.969	85.1%
	9	7.994	80.3%	5.565	79.4%
	10	7.530	75.6%	5.215	74.4%
	11	7.134	71.6%	4.914	70.1%
	12	6.800	68.3%	4.658	66.4%
	13	8.466	85.0%	5.921	84.4%
3	14	7.970	80.0%	5.550	79.2%
	15	7.533	75.6%	5.219	74.4%
	16	7.154	71.8%	4.929	70.3%
	17	6.828	68.6%	4.679	66.7%
	18	6.551	65.8%	4.463	63.6%
	19	7.889	79.2%	5.493	78.3%
4	20	7.492	75.2%	5.191	74.0%
	21	7.139	71.7%	4.920	70.2%
	22	6.830	68.6%	4.680	66.7%
	23	6.562	65.9%	4.471	63.8%
	24	6.332	63.6%	4.291	61.2%



Hình 3. Chuyển vị tại mặt cắt MDC.NC1-2 theo TTGHCD1



Hình 4. Chuyển vị tại mặt cắt MDC.NC1-2 theo TTGHSD

Bảng 3. Chuyển vị tại mặt cắt giữa nhịp biên phải MDC.NB2

Nhóm	TH	Chuyển vị của các trường hợp tải trọng (cm)			
		TTGHCĐ1		TTGHSD	
		Δ	Δ_i/Δ_1	Δ	Δ_i/Δ_1
1	1	2.243	100%	1.422	100%
	2	2.244	100.0%	1.402	98.6%
	3	2.258	100.7%	1.395	98.1%
	4	2.273	101.3%	1.392	97.9%
	5	2.307	102.8%	1.403	98.7%
	6	2.337	104.2%	1.413	99.4%
2	7	2.323	103.5%	1.464	102.9%
	8	2.324	103.6%	1.445	101.6%
	9	2.337	104.2%	1.438	101.1%
	10	2.357	105.1%	1.438	101.1%
	11	2.382	106.2%	1.444	101.5%
	12	2.409	107.4%	1.453	102.2%
3	13	2.399	106.9%	1.505	105.8%
	14	2.401	107.0%	1.487	104.6%
	15	2.414	107.6%	1.480	104.1%
	16	2.434	108.5%	1.480	104.1%
	17	2.457	109.5%	1.485	104.4%
	18	2.482	110.6%	1.494	105.1%
4	19	2.470	110.1%	1.542	108.4%
	20	2.475	110.3%	1.526	107.3%
	21	2.488	110.9%	1.520	106.9%
	22	2.507	111.8%	1.520	106.9%
	23	2.529	112.7%	1.525	107.2%
	24	2.553	113.8%	1.533	107.8%

So sánh kết quả trong các biểu đồ từ hình 3, hình 4 và từ bảng 1 đến bảng 3 ta nhận thấy tại các mặt cắt khác nhau, khi chiều cao các trụ tháp thay đổi và tính chất bất đối xứng của chiều cao trụ tháp thay đổi thì sự thay đổi về chuyển vị tại các mặt cắt là khác nhau. Cụ thể, khi tăng chiều cao của các trụ tháp h_1 thì chuyển vị tại các mặt MCD.NB1 có sự giảm nhẹ (không quá 2% trong mỗi nhóm như bảng 6) nhưng chuyển vị tại mặt cắt MDC.NB2 tăng nhiều (khoảng hơn 10% trong mỗi nhóm như bảng 7). Trong khi đó nếu tăng chiều cao trụ tháp h_2 thì chuyển vị tại mặt cắt MDC.NB1 tăng nhiều (khoảng hơn 15% trong mỗi nhóm như bảng 1), nhưng chuyển vị tại mặt cắt MDC.NB2 có sự tăng nhẹ (khoảng 3% trong mỗi nhóm như bảng 3). Đối với mặt cắt giữa nhịp giữa MDC.NC1-2, nhìn chung khi tăng chiều cao trụ tháp h_1 và h_2 thì chuyển vị giảm nhiều (hơn 20% trong mỗi nhóm theo như bảng 2). Do đó, nhìn chung khi thay đổi chiều cao trụ tháp h_1 và h_2 thì chuyển vị tại nhịp giữa và 2 nhịp biên có sự biến đổi ngược chiều nhau, vì vậy ta chưa thể chọn được tỷ lệ bất đối xứng hợp lý nhất của chiều cao trụ tháp theo yếu tố chuyển vị của dầm chủ. Nhưng khi thay đổi chiều cao các trụ tháp và tính bất đối xứng thì chuyển vị nhịp giữa sẽ có sự biến đổi nhiều hơn, vì vậy nếu phải lựa chọn thì ta nên chọn tham số chuyển vị của nhịp giữa để chọn tỷ lệ bất đối xứng hợp lý.

Cụ thể, các trường hợp tải trọng như trên và tỷ lệ kết cấu nhịp bất đối xứng như đã chọn ($L_1=100m$, $L_0=400m$, $L_2=125m$) ta có thể chọn tỷ lệ chiều cao các trụ tháp hợp lý trong số các trường hợp đã chọn là $h_1=40m$ đến $45m$, $h_2=45$ đến $55m$; tương ứng với tỷ lệ các

trụ tháp là $h_2/h_1=113\%$ đến 138% và $h_1/L_1=0,4$ đến $0,45$ và $h_2/L_2=0,36$ đến $0,44$. Tỷ lệ này cũng nằm trong giới hạn tỷ lệ hợp lý khi ta xét đến yếu tố là nội lực trong dầm chủ, trụ tháp [8], [12].

Kết quả chuyển vị tại các đỉnh trụ tháp được trình bày trong các bảng 4 và 5.

Bảng 4. Chuyển vị của đỉnh tháp bên trái ĐTT1

Nhóm	TH	Chuyển vị của các trường hợp tải trọng (cm)			
		TTGHCĐ1		TTGHSD	
		Δ	Δ_i/Δ_1	Δ	Δ_i/Δ_1
1	1	0.650	100%	0.454	100%
	2	0.627	96.5%	0.436	96.0%
	3	0.608	93.5%	0.421	92.7%
	4	0.593	91.2%	0.408	89.8%
	5	0.583	89.7%	0.399	87.9%
	6	0.575	88.5%	0.391	86.1%
2	7	0.692	106.5%	0.483	106.4%
	8	0.668	102.8%	0.464	102.2%
	9	0.649	99.8%	0.449	98.9%
	10	0.633	97.4%	0.435	95.8%
	11	0.621	95.5%	0.425	93.6%
	12	0.613	94.3%	0.416	91.6%
3	13	0.728	112.0%	0.508	111.9%
	14	0.704	108.3%	0.489	107.7%
	15	0.684	105.2%	0.473	104.2%
	16	0.669	102.9%	0.459	101.1%
	17	0.657	101.1%	0.449	98.9%
	18	0.648	99.7%	0.440	96.9%
4	19	0.759	116.8%	0.529	116.5%
	20	0.736	113.2%	0.511	112.5%
	21	0.718	110.5%	0.495	109.0%
	22	0.703	108.1%	0.482	106.2%
	23	0.691	106.3%	0.472	103.9%
	24	0.682	104.9%	0.463	102.0%

Bảng 5. Chuyển vị của đỉnh tháp bên phải ĐTT2

Nhóm	TH	Chuyển vị của các trường hợp tải trọng (cm)			
		TTGHCĐ1		TTGHSD	
		Δ	Δ_i/Δ_1	Δ	Δ_i/Δ_1
1	1	0.754	100%	0.519	100%
	2	0.811	107.5%	0.557	107.3%
	3	0.858	113.8%	0.588	113.3%
	4	0.898	119.1%	0.613	118.1%
	5	0.937	124.3%	0.638	122.9%
	6	0.973	129.0%	0.661	127.4%
2	7	0.736	97.6%	0.503	96.9%
	8	0.793	105.2%	0.541	104.2%
	9	0.842	111.7%	0.572	110.2%
	10	0.885	117.4%	0.600	115.6%
	11	0.926	122.8%	0.626	120.6%
	12	0.965	128.0%	0.650	125.2%

3	13	0.724	96.0%	0.491	94.6%
	14	0.781	103.6%	0.528	101.7%
	15	0.832	110.3%	0.561	108.1%
	16	0.877	116.3%	0.590	113.7%
	17	0.920	122.0%	0.617	118.9%
	18	0.961	127.5%	0.643	123.9%
4	19	0.718	95.2%	0.483	90.1%
	20	0.776	102.9%	0.520	101.2%
	21	0.827	109.7%	0.553	106.5%
	22	0.875	116.0%	0.583	112.3%
	23	0.919	121.9%	0.611	117.7%
	24	0.962	127.6%	0.639	123.1%

Từ kết quả trong các bảng 4 và 5, Ta nhận thấy chuyển vị của hai đỉnh trụ tháp trong các trường hợp nghiên cứu với các trường hợp tải trọng đã chọn có sự biến thiên ngược nhau khi chiều cao các trụ thấp h_1 và h_2 biến thiên. Chưa có cơ sở rõ ràng để xác định tỷ lệ bất đối xứng giữa chiều cao các trụ tháp theo yếu tố chuyển vị tại đỉnh trụ tháp.

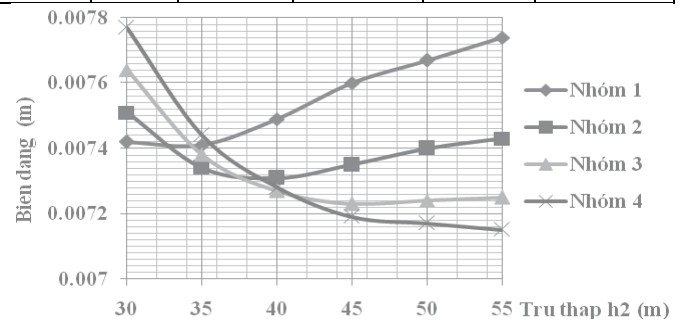
Kết quả biến dạng của các cáp treo được trình bày trong các bảng 6 đến 7.

Bảng 6. Biến dạng dài của cáp treo giữa nhịp trái CTNB1

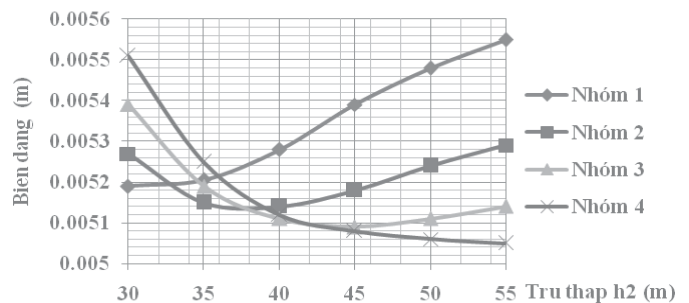
Nhóm	TH	Biến dạng tương ứng các trường hợp tải (m)			
		TTGHCĐ1		TTGHSD	
		Δ	Δ_i/Δ_1	Δ	Δ_i/Δ_1
1	1	0.0496	100%	0.0350	100%
	2	0.0484	97.6%	0.0342	97.7%
	3	0.0472	95.2%	0.0335	95.7%
	4	0.0462	93.1%	0.0328	93.7%
	5	0.0451	90.9%	0.0321	91.7%
	6	0.0440	88.7%	0.0314	89.7%
2	7	0.0582	117.3%	0.0412	117.7%
	8	0.0569	114.7%	0.0403	115.1%
	9	0.0557	112.3%	0.0395	112.8%
	10	0.0549	110.7%	0.0388	110.8%
	11	0.0534	107.7%	0.0380	108.6%
	12	0.0523	105.4%	0.0373	106.6%
3	13	0.0667	134.5%	0.0473	135.1%
	14	0.0654	131.8%	0.0464	132.6%
	15	0.0641	129.2%	0.0460	131.4%
	16	0.0629	126.8%	0.0448	128.0%
	17	0.0616	124.2%	0.0440	125.7%
	18	0.0605	121.9%	0.0433	123.7%
4	19	0.0752	151.6%	0.0534	152.6%
	20	0.0738	148.8%	0.0525	150.0%
	21	0.0725	146.2%	0.0517	147.7%
	22	0.0712	143.5%	0.0508	145.1%
	23	0.0699	140.9%	0.0500	142.8%
	24	0.0688	138.7%	0.0492	140.6%

Bảng 7. Biến dạng dài của cáp treo giữa nhịp giữa CTNC1-2

Nhóm	TH	Biến dạng tương ứng các trường hợp tải (m)			
		TTGHCĐ1		TTGHSD	
		Δ	Δ_i/Δ_1	Δ	Δ_i/Δ_1
1	1	0.00742	100%	0.00519	100%
	2	0.00741	99.9%	0.00521	100.3%
	3	0.00749	100.9%	0.00528	101.7%
	4	0.00760	102.4%	0.00539	103.8%
	5	0.00767	103.4%	0.00548	105.6%
	6	0.00774	104.3%	0.00555	106.9%
2	7	0.00751	101.2%	0.00527	101.5%
	8	0.00734	98.9%	0.00515	99.2%
	9	0.00731	98.5%	0.00514	99.0%
	10	0.00735	99.1%	0.00518	99.8%
	11	0.00740	99.7%	0.00524	100.9%
	12	0.00743	100.1%	0.00529	101.9%
3	13	0.00764	102.9%	0.00539	103.8%
	14	0.00738	99.5%	0.00519	100%
	15	0.00727	98.0%	0.00511	98.5%
	16	0.00723	97.4%	0.00509	98.1%
	17	0.00724	97.6%	0.00511	98.5%
	18	0.00725	97.7%	0.00514	99.0%
4	19	0.00777	104.7%	0.00551	106.2%
	20	0.00744	100.3%	0.00525	101.2%
	21	0.00728	98.1%	0.00512	98.7%
	22	0.00719	96.9%	0.00508	97.9%
	23	0.00717	96.6%	0.00506	97.5%
	24	0.00715	96.4%	0.00505	97.3%



Hình 5. Biến dạng của cáp treo CTNC1-2 theo TTGHCĐ1



Hình 6. Biến dạng của cáp treo CTNC1-2 theo TTGHSD

Bảng 8. Biến dạng dài của cáp treo giữa nhịp biên phải CTNB2

Nhóm	TH	Biến dạng tương ứng các trường hợp tải (m)			
		TTGHCĐ1		TTGHSD	
		Δ	Δ_i/Δ_1	Δ	Δ_i/Δ_1
1	1	0.0463	100%	0.0326	100%
	2	0.0545	117.8%	0.0384	117.8%
	3	0.0627	135.4%	0.0443	135.9%
	4	0.0709	153.1%	0.0501	153.7%
	5	0.0791	170.8%	0.0559	171.5%
	6	0.0872	188.3%	0.0618	189.6%
2	7	0.0449	97.0%	0.0316	96.9%
	8	0.0531	114.7%	0.0375	115.0%
	9	0.0613	132.4%	0.0433	132.8%
	10	0.0695	150.1%	0.0491	150.6%
	11	0.0776	167.6%	0.0549	168.4%
	12	0.0857	189.0%	0.0607	186.2%
3	13	0.0436	94.2%	0.0307	94.2%
	14	0.0518	111.9%	0.0366	112.3%
	15	0.0599	129.4%	0.0424	130.1%
	16	0.0680	146.9%	0.0482	147.8%
	17	0.0761	164.4%	0.0540	165.6%
	18	0.0842	181.8%	0.0598	183.4%
4	19	0.0423	91.4%	0.0300	92.0%
	20	0.0505	109.1%	0.0357	109.5%
	21	0.0585	126.3%	0.0415	127.3%
	22	0.0666	143.8%	0.0472	144.8%
	23	0.0747	161.3%	0.0530	162.6%
	24	0.0827	178.6%	0.0588	180.4%

So sánh kết quả trong các biểu đồ từ hình 5 đến hình 6 và từ bảng 6 đến bảng 8 ta nhận thấy tại cáp treo khác nhau, khi chiều cao các trụ tháp thay đổi và tính chất bất đối xứng của chiều cao trụ tháp thay đổi thì sự thay đổi về biến dạng của các đối tượng này cũng khác nhau. Cụ thể, khi tăng chiều cao của các trụ tháp h_1 thì biến dạng của các cáp treo giữa nhịp biên trái và giữa nhịp biên phải đều tăng; trong khi đó biến dạng của cáp treo giữa nhịp giữa lại giảm. Ngược lại, nếu tăng chiều cao trụ tháp h_2 thì biến dạng của cáp treo giữa nhịp biên bên phải và giữa nhịp biên bên trái đều giảm; Trong khi đó biến dạng của cáp treo giữa nhịp giữa lại giảm. Do đó, nhìn chung khi thay đổi chiều cao trụ tháp h_1 và h_2 thì biến dạng của cáp treo hai nhịp biên có sự biến thiên ngược nhau, vì vậy chưa thể chọn được tỷ lệ bất đối xứng hợp lý nhất của chiều cao trụ tháp theo yếu tố biến dạng của cáp treo nhịp biên. Ta có thể dựa vào yếu tố biến dạng của cáp treo nhịp giữa để chọn tỷ lệ bất đối xứng hợp lý.

Cụ thể, các trường hợp tải trọng như trên và tỷ lệ kết cấu nhịp bất đối xứng như đã chọn ($L_1=100\text{m}$, $L_0=400\text{m}$, $L_2=125\text{m}$) ta có thể chọn tỷ lệ chiều cao các trụ tháp hợp lý trong số các trường hợp đã chọn là $h_1=40\text{m}$ đến 45m , $h_2=45$ đến 55m ; tương ứng với tỷ lệ các trụ tháp là $h_2/h_1=113\%$ đến 138% và $h_1/L_1=0,4$ đến $0,45$ và $h_2/L_2=0,36$ đến $0,44$. Tỷ lệ này cũng nằm trong giới hạn tỷ lệ hợp lý khi ta xét đến yếu tố là nội lực trong dầm chủ, trụ tháp và chuyển vị của dầm chủ vừa nêu ở trên [8], [12].

4. KẾT LUẬN

Với kết cấu nhịp bất đối xứng theo tỷ lệ như đã chọn ($L_1=100\text{m}$, $L_0=400\text{m}$, $L_2=125\text{m}$) khi chiều cao trụ tháp và tính bất đối xứng của chiều cao trụ tháp thay đổi dẫn đến sự thay đổi về biến dạng và chuyển vị của từng bộ phận kết cấu và từng vị trí trên kết cấu.

Qua phân tích và tổng hợp kết quả ta chọn được tỷ lệ chiều cao trụ tháp hợp lý $h_2/h_1=113\%$ đến 138% tương ứng với $h_1/L_1=0,4$ đến $0,45$ và $h_2/L_2=0,36$ đến $0,44$. Đây là tỷ lệ bất đối xứng hợp lý tương ứng với các yếu tố về biến dạng và chuyển vị của các đối tượng và vị trí đã nêu. Nếu ta đối chiếu thêm với các kết quả đã công bố trước đó thì nó hoàn toàn phù hợp khi ta phân tích về ảnh hưởng của tính bất đối xứng trong cầu treo dây văng đến nội lực trong các cấu kiện chính của cầu treo dây văng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] GS.TS Nguyễn Viết Trung, TS Hoàng Hòa, *Thiết kế cầu treo dây văng*, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2005.
- [2] *Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN11823-2017*, Bộ khoa học và công nghệ, Hà Nội, 2017
- [3] TS Phùng Mạnh Tiến, *Hướng dẫn phân tích, tính toán cầu treo dây văng bằng phần mềm Midas/civil*.
- [4] Chu Quốc Thắng, *Phương pháp phần tử hữu hạn*, NXB Khoa học kỹ thuật, 1987.
- [5] Đỗ Tiến Đạt, *Luận văn thạc sỹ: Nghiên cứu ảnh hưởng tỷ lệ chiều dài nhịp đến sự phân bố nội lực và biến dạng trong cầu treo dây văng*, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM, 2006.
- [6] Phạm Vũ Quân, *Luận văn thạc sỹ: Nghiên cứu ảnh hưởng chiều cao trụ tháp đến nội lực và biến dạng cầu treo dây văng dưới tác dụng của tải trọng gió*, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM, 2008.
- [7] Mawan Nader, Rafael Manzanaraz, Man Chung Tan, *Design of the New San Francisco-Oakland bay self - anchored suspension Bridge*, Conference IABSE Symposium: Towards a Better Built Environment - Innovation, Sustainability, Information Technology, Melbourne, Australia, 2002
- [8] Ngô Văn Tinh, Ngô Văn Quân, *Ảnh hưởng của tính bất đối xứng chiều cao trụ tháp đến sự phân bố nội lực trong dầm chủ cầu treo dây văng*, Tạp chí Xây dựng, 9/2022.
- [9] Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan. *Bridge Engineering Handbook*.
- [10] GS. TS Lê Thọ Trình, *Cách tính hệ treo theo sơ đồ biến dạng*, NXB Xây dựng.
- [11] *Completed State and Construction Stage Analyses of a suspension Bridge*.
- [12] Ngô Văn Tinh, Ngô Văn Quân, *Nghiên cứu về sự phân bố nội lực trong các bộ phận chính của kết cấu cầu treo dây văng bất đối xứng*, Tạp chí Xây dựng, 2/2023.