■Ngày nhận bài: 07/11/2022 ■Ngày sửa bài: 19/12/2022 ■Ngày chấp nhận đăng: 09/01/2023

Nghiên cứu về sự phân bố nội lực trong trụ tháp, cáp chủ và cáp treo của cầu treo dây võng bất đối xứng

Research on internal force distribution in tower, main cables and suspender cables of asymmetrical suspension bridges

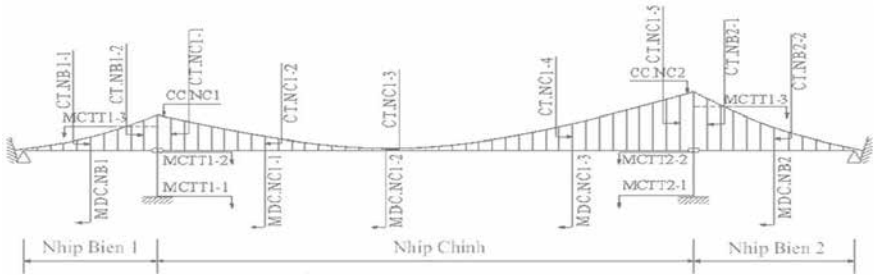
> NGÔ VĂN TÌNH, NGÔ VĂN QUÂN
Khoa Xây dựng, Học viện Hàng không Việt Nam

TÓM TẮT:
Trong cầu treo dây võng thì dầm chủ, trụ tháp, cáp chủ, cáp treo là những kết cấu chịu lực chính. Thông thường có hai trụ tháp có chiều cao đối xứng nhau. Tuy nhiên, trong thực tế chiều cao của hai trụ tháp không nhất thiết phải đối xứng mà tùy thuộc vào địa hình và thủy văn nó có thể bất đối xứng và thực tế là đã có những công trình cầu treo dây võng với chiều cao trụ tháp không đối xứng nhau. Khi điều đó xảy ra thì sự phân bố nội lực, biến dạng, chuyển vị của các kết cấu trong cầu treo dây võng cũng thay đổi. Trong số tháng 9/2022 trên Tạp chí Xây dựng, các tác giả đã trình bày về sự ảnh hưởng của tính bất đối xứng chiều cao trụ tháp đến sự phân bố nội lực trong dầm chủ. Trong bài báo này tác giả tập trung khảo sát ảnh hưởng của tính tháng bất đối xứng chiều cao trụ tháp đến sự phân bố nội lực trong trụ tháp, cáp chủ và cáp treo của cầu treo dây võng bằng cách phân tích kết quả tính toán các mô hình cầu treo dây võng dựa trên kết quả thống kê kích thước, tỷ lệ nhịp, chiều cao trụ tháp của các cầu treo dây võng thực tế trên thế giới. Bằng cách sử dụng phần mềm phân tích kết cấu cầu rất phổ biến ở Việt Nam hiện nay là Midas/civil.

Từ khóa: Cầu treo dây võng; cầu New San Francisco-Oakland bay; trụ tháp cầu treo dây võng; cáp chủ, cáp treo.

ABSTRACT:
In a suspension bridge, the main girder, tower, main cable and suspender cable are the main load-bearing structures. There are usually two towers with the same height. However, in reality, the height of the two towers is not necessarily equal, depending on the Topography and Hydrology it can be asymmetry and the fact that there have been suspension bridges with asymmetrical tower heights. When that happens the distribution of internal forces, deformation, and displacement of the structures in the suspension bridge also changes. In the September 2022 issue of the Journal of Construction, the authors presented about the influence of tower height asymmetry on the distribution of internal forces of the main girder. In this paper, the author studies the influence of towers height asymmetry on the distribution of internal forces in the tower, main cable and suspender cable of a suspension bridge by analyzing the results of calculation of models of suspension bridges based on Statistical results of size, span ratio, tower height of the actual suspension bridge in the world. Using software to analyze bridge structure very popular in Vietnam is Midas/civil.

Keywords: Suspension bridge; New San Francisco-Oakland bay suspension bridge; tower, main cable; suspender cable.



Hình 1. Mô hình tính toán và các mặt cắt khảo sát của cầu treo dây võng

1. GIỚI THIỆU

Kết cấu cầu treo dây võng là một dạng kết cấu có nhiều ưu điểm trong đó ưu điểm lớn nhất là khả năng vượt được khẩu độ rất lớn mà các loại kết cấu khác không làm được kể cả cầu dây văng. Cầu treo dây võng được coi là loại cầu đẹp, nhẹ và chịu lực tốt, được áp dụng phổ biến trên thế giới cho các cầu nhịp lớn [1].

Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến sự phân bố nội lực trong cầu treo dây võng như: chiều dài nhịp, cấu tạo dầm chính, số lượng mặt phẳng dây treo, chiều cao tháp cầu, vật liệu… Thực tế không phải bất kỳ ở vị trí nào chúng ta cũng có thể xây dựng được một kết cấu đối xứng như mong đợi. Trong đó, vị trí trụ tháp và chiều dài nhịp phụ thuộc vào các điều kiện địa hình, địa chất, thuỷ 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]. Và thực tế đã có công trình cầu treo dây võng bất đối xứng đã được xây dựng là Cầu New San Francisco-Oakland bay xây dựng năm 2002 [7].

Nhằm mục đích làm rõ hơn ảnh hưởng của tính bất đối xứng chiều cao trụ tháp đến phân bố nội lực trong cầu treo dây võng. Trong nghiên cứu trước mà kết quả đã được công bố trên Tạp chí Xây dựng tháng 9/2022 thì ta thấy khi kết cấu nhịp bất đối xứng và chiều cao trụ tháp bất đối xứng thì ta đã chọn được tỷ lệ hợp lý giữa các trụ tháp theo nội lực dầm chủ [8]. Tuy nhiên, để có thể lựa chọn được tỷ lệ bất đối xứng của chiều cao trụ tháp hợp lý nhất ta cần phải xét đến ảnh hưởng của nó đến nội lực trong trụ tháp, cáp chủ và cáp treo. trong bài báo này các tác giả sẽ nghiên cứu vấn đề trên. Mô hình tính toán được thực hiện bằng phần mềm tính toán thiết kế cầu khá phổ biến ở Việt Nam hiện nay là MIDAS/civil [3].

Ở Việt Nam hiện tại việc tính toán thiết kế thực hiện theo Tiêu chuẩn TCVN11823-2017. Khi tính toán thiết kế kết cấu cầu thì tổ hợp nội lực tùy theo từng dạng kết cấu cầu mà mức độ quan trọng của các Trạng thái giới hạn cũng khác nhau. Tuy nhiên, thường thì Trạng thái giới hạn cường độ 1 (TTGHCĐ1) và Trạng thái giới hạn sử dụng (TTGHSD) là quan trọng và ưu tiên hơn. Để nghiên cứu gần hơn với thực tế tính toán thiết kế, các tải trọng tính toán cơ bản được lấy theo tiêu chuẩn trên gồm các Tải trọng bản thân (TTBT) và hoạt tải HL93. Và nội lực sẽ được so sánh giữa các trường hợp sơ đồ kết cấu do (TTBT) và tổ hợp theo (TTGHCĐ1) [2], [8].

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Trụ tháp và nhịp chính cầu treo dây võng

Cầu treo dây võng 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 võng. 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].

Chiều dài nhịp chính L, chiều cao trụ tháp H và tỷ lệ L/H của một số cầu treo dây võng được thống kê trong Bảng 1 [5], [6].

Bảng 1. *Chiều dài nhịp chính, nhịp biên và chiều cao trụ tháp của một số cầu treo dây võng.*

STT	Tên cầu	Nhịp chính L_0 (m)	Trụ Tháp H(m)	Nhịp biên L_1 (m)	H/L_0	H/L_1
1	Massina Straits	3300	382	810	0.116	0.472
2	Akashi Kaikyo	1991	282	960	0.142	0.294
3	Runyang	1490	207	-	0.139	-
4	Verrazano Narrows	1298	207	307	0.159	0.673
5	Golden Gate	1280	227	343	0.178	0.663
6	Hega Kusten	1210	180	310	0.148	0.580
7	Mackinac Straits	1158	168	548	0.145	0.306
8	George Washington	1067	183	186	0.171	0.984
9	Ponte 25 de Abril	1013	190	483	0.188	0.394
10	Forth Road	1006	150	408	0.149	0.368
11	Kita Bisan – Seto	990	161	274	0.163	0.588
12	Severn	98	136	305	0.138	0.446
13	Ohnaruto	876	128	330	0.146	0.388
14	Jiangyin	1385	190	336	0.137	0.565
15	Great Belt East	1624	254	535	0.156	0.474
16	Humber	1410	155	280	0.110	0.555
17	Tsing Ma	1377	206	455	0.150	0.453
18	Storda	677	97	-	0.143	-
19	Thuận Phước	405	98	120	0.242	0.816

Từ thực tế những cây cầu đã được xây dựng qua thống kê giữa tỷ lệ giữa chiều cao trụ tháp H và nhịp chính L_0 ta thấy H/L_0=0.110 ~ 0.333. Mặt khác ta lại có H/L_1=0.3~1.0. Từ đây ta chọn H/L_1=0.6~0.8 để xem xét nghiên cứu. (Với $H_i=h_i + h$: Trong đó h=40m=const là chiều cao từ đỉnh bệ đến dầm, h_i là chiều cao từ dầm đến đỉnh trụ tháp. Vậy ta chọn h_i/L_i=0.3~0.4).

2.2. Các trường hợp nghiên cứu

Các sơ đồ lựa chọn nghiên cứu là cầu treo dây võng ba nhịp 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 tĩnh 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: hi/Li=0,24 ~ 0,45; trong đó Li, hi 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 phân bố nội lực trong trụ tháp, cáp chủ, cáp treo cầu treo dây võng.*

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. Tương tự như trụ tháp 1, 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.

Bảng 2. *Chiều cao của trụ tháp và tỷ lệ bất đối xứng của chiều cao trụ tháp trong các trường hợp nghiên cứu*

Nhóm	TH	Chiều cao trụ tháp tính từ mặt cầu đến đỉnh trụ (m) và tỷ lệ bất đối xứng của chiều cao trụ tháp					Chiều cao tính từ đỉnh bệ đến đỉnh trụ (m)	
		h_1	$h_1/30$	h_2	$h_2/30$	h_2/h_1	H_1	H_2
1	1	30	100%	30	100%	100%	70	70
	2	30	100%	35	117%	117%	70	75
	3	30	100%	40	133%	133%	70	80
	4	30	100%	45	150%	150%	70	85
	5	30	100%	50	167%	167%	70	90
	6	30	100%	55	183%	183%	70	95
2	7	35	117%	30	100%	86%	75	70

	8	35	117%	35	117%	100%	75	75
	9	35	117%	40	133%	114%	75	80
	10	35	117%	45	150%	128%	75	85
	11	35	117%	50	167%	143%	75	90
	12	35	117%	55	183%	157%	75	95
3	13	40	133%	30	100%	75%	80	70
	14	40	133%	35	117%	88%	80	75
	15	40	133%	40	133%	100%	80	80
	16	40	133%	45	150%	113%	80	85
	17	40	133%	50	167%	125%	80	90
	18	40	133%	55	183%	138%	80	95
4	19	45	150%	30	100%	67%	85	70
	20	45	150%	35	117%	78%	85	75
	21	45	150%	40	133%	89%	85	80
	22	45	150%	45	150%	100%	85	85
	23	45	150%	50	167%	111%	85	90
	24	45	150%	55	183%	122%	85	95

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

Các thông số về vật liệu của các bộ phận kết cấu và đặc trưng hình học được lấy theo các bảng 3 và bảng 4.

Bảng 3. *Thông số vật liệu của các bộ phận kết cấu*

Thông số	Đơn vị	Cáp chủ	Cáp treo	Dầm chủ	Trụ tháp
Mô đun đàn hồi (E_{vl})	kN/m^2	2,0.10^8	1,4.10^8	2,1.10^8	2,1.10^8
Trọng lượng đơn vị	kN/m^3	82,5	78,5	78,5	78,5
Hệ số Poisson	-	0,3	0,3	0,3	0,3

Bảng 4. *Đặc trưng hình học các bộ phận kết cấu*

Thông số	Cáp chủ	Cáp treo	Dầm chủ	Trụ tháp	Giằng trụ
Diện tích mặt cắt (m^2)	0,04.178	0,00209	1.0016	0,16906	0,1046
Momen quán tính I_{xx} (m^4)	0	0	0,4399	0,1540	0,1540
Momen quán tính I_{yy} (m^4)	0	0	0,1316	0,1450	0,1080
Momen quán tính I_{zz} (m^4)	0	0	3,2667	0,1143	0,0913

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. Tính theo trạng thái giới hạn cường độ 1 (TTGHCĐ1).

2.4. Mô hình 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, tức là xem xét vật liệu tuyến tính. Việc áp dụng mô hình biến dạng nhỏ nhằm mục đích phân tích tính bất đối xứng của chiều cao trụ tháp đến sự phân bố nội lực và biến dạng của cầu treo dây võng trong giai đoạn hoàn thiện. 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. Phần mềm Midas/civil rất phổ biến và thuận lợi cho việc mô hình và phân tích kết quả tính toán.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Đối với trụ tháp T_1 (bên trái) xem xét tại các mặt cắt: Mặt cắt chân trụ tháp MCTT1-1, Mặt cắt tại vị trí bản mặt cầu MCTT1-2. Đối với trụ tháp T_2 (bên trái) xem xét tại các mặt cắt: Mặt cắt chân trụ tháp MCTT2-1, Mặt cắt tại vị trí bản mặt cầu MCTT2-2. Đối với cáp chủ ta xem xét tại mặt cắt đỉnh trụ tháp T_1 (CCNC1) và mặt cắt đỉnh trụ tháp T_2 (CCNC2). Đối với cáp treo ta xem xét trong các dây treo CTNB1 (cáp treo giữa nhịp biên trái), CTNC1 (cáp treo ngắn nhất nhịp giữa), CTNB2 (cáp treo giữa nhịp biên phải), các vị trí mặt cắt như *hình 1*.

- Kết quả mô men trong trụ tháp được trình bày trong các bảng từ Bảng 5 đến Bảng 8.

Bảng 5. *Mô men tại mặt cắt MCTT1-1*

Nhóm	TH	Mômen của các trường hợp tải trọng (tonf.m)			
		TTBT		TTGHCĐ1	
		M_1	M_i/M_1	M_1	M_i/M_1
1	1	-704.3	100%	-1598.4	100%
	2	-657.0	93.3%	-1538.2	96.2%
	3	-615.6	87.4%	-1491.7	93.3%
	4	-579.1	82.2%	-1453.9	90.9%
	5	-548.2	77.8%	-1429.6	89.4%
	6	-521.1	74.0%	-1411.0	88.3%
2	7	-599.5	85.1%	-1368.3	85.6%
	8	-559.0	79.4%	-1317.3	82.4%
	9	-523.4	74.3%	-1276.6	79.8%
	10	-492.3	69.9%	-1245.5	77.9%
	11	-465.2	66.1%	-1221.8	76.4%
	12	-441.7	62.7%	-1204.6	75.4%
3	13	-514.8	73.1%	-1182.4	73.9%
	14	-480.6	68.2%	-1140.4	71.3%
	15	-450.5	63.9%	-1106.8	69.2%
	16	-424.0	60.2%	-1080.3	67.6%
	17	-401.0	56.9%	-1060.2	66.3%
	18	-380.8	54.1%	-1045.3	65.4%
4	19	-446.6	63.4%	-1032.8	64.6%
	20	-418.0	59.3%	-998.7	62.5%
	21	-392.6	55.7%	-971.1	60.7%
	22	-370.2	52.6%	-949.2	59.4%
	23	-350.7	49.8%	-932.5	58.3%
	24	-333.4	47.3%	-919.9	57.5%

Bảng 6. *Mô men tại mặt cắt MCTT1-2*

Nhóm	TH	Mômen của các trường hợp tải trọng (tonf.m)			
		TTBT		TTGHCĐ1	
		M_1	M_i/M_1	M_1	M_i/M_1
1	1	1441.0	100%	3246.0	100%
	2	1350.5	93.7%	3128.9	96.4%
	3	1269.2	88.1%	3039.0	93.6%
	4	1196.2	83.0%	2959.1	91.2%
	5	1133.6	78.7%	2909.2	89.6%
	6	1077.8	74.8%	2870.4	88.4%
2	7	1219.3	84.6%	2758.6	85.0%
	8	1142.4	79.3%	2660.2	81.9%
	9	1073.4	74.5%	2581.2	79.5%
	10	1012.0	70.2%	2519.3	77.6%
	11	957.9	66.5%	2472.2	76.2%
	12	910.0	63.2%	2437.6	75.1%
3	13	1041.8	72.3%	2369.0	73.0%
	14	977.7	67.8%	2289.2	70.5%
	15	919.9	63.8%	2224.6	68.5%
	16	868.2	60.2%	2171.5	66.9%
	17	822.7	57.1%	2134.3	65.7%
	18	782.1	54.3%	2105.1	64.8%
4	19	900.5	62.5%	2056.9	63.4%
	20	847.2	58.8%	1994.6	61.4%
	21	799.0	44.4%	1940.7	59.8%
	22	755.6	52.4%	1898.8	58.5%
	23	717.2	49.8%	1867.2	57.5%
	24	682.8	47.4%	1844.7	56.8%

Bảng 7. *Mô men tại mặt cắt MCTT2-1*

Nhóm	TH	Mômen của các trường hợp tải trọng (tonf.m)			
		TTBT		TTGHCĐ1	
		M_1	M_i/M_1	M_1	M_i/M_1
1	1	746.8	100%	1832.9	100%
	2	634.8	85.0%	1583.7	86.4%
	3	542.5	72.6%	1378.0	75.2%
	4	466.7	62.5%	1207.4	65.9%
	5	405.4	54.3%	1070.4	58.4%
	6	355.1	47.5%	956.1	52.2%
2	7	691.5	92.6%	1785.8	97.4%
	8	588.0	78.7%	1545.3	84.3%
	9	503.4	67.4%	1348.3	73.6%
	10	434.5	58.2%	1187.0	64.7%
	11	378.5	50.7%	1054.4	57.5%
	12	322.8	43.2%	944.9	51.6%
3	13	643.1	86.1%	1756.5	95.8%
	14	547.0	73.2%	1521.2	83.0%
	15	469.1	62.8%	1329.9	72.6%
	16	405.9	54.4%	1173.7	64.0%
	17	354.7	47.5%	1045.4	57.0%
	18	312.9	41.9%	939.2	51.2%
4	19	601.4	80.5%	1742.7	95.1%
	20	511.4	68.5%	1509.4	82.4%
	21	439.2	58.8%	1321.2	72.1%
	22	380.9	51.0%	1168.1	63.7%
	23	333.8	44.7%	1042.5	56.9%
	24	295.3	39.5%	938.3	51.2%

Bảng 8. *Mô men tại mặt cắt MCTT2-2*

Nhóm	TH	Mômen của các trường hợp tải trọng (tonf.m)			
		TTBT		TTGHCĐ1	
		M_1	M_i/M_1	M_1	M_i/M_1
1	1	-1535.2	100%	-3746.1	100%
	2	-1296.5	84.5%	-3213.7	85.8%
	3	-1101.8	71.8%	-2797.2	74.7%
	4	-943.6	61.5%	-2422.5	64.7%
	5	-816.6	53.2%	-2138.7	57.1%
	6	-713.6	46.5%	-1904.1	50.8%
2	7	-1427.9	93.0%	-3653.7	97.5%
	8	-1206.7	78.6%	-3140.5	83.8%
	9	-1027.7	66.9%	-2724.4	72.7%
	10	-883.3	57.5%	-2386.7	63.7%
	11	-766.7	49.9%	-2111.6	56.4%
	12	-672.4	43.8%	-1886.0	50.3%
3	13	-1331.8	86.8%	-3594.8	95.9%
	14	-1126.3	73.4%	-3094.1	82.6%
	15	-961.2	62.6%	-2690.5	71.8%
	16	-828.5	54.0%	-2363.6	63.1%
	17	-721.5	47.0%	-2097.1	56.0%
	18	-634.9	41.4%	-1878.0	50.1%
4	19	-1247.4	81.3%	-3566.1	95.2%
	20	-1055.4	68.7%	-3071.3	82.0%
	21	-902.3	58.8%	-2675.2	71.4%
	22	-779.7	50.8%	-2355.1	62.9%
	23	-681.0	44.4%	-2094.0	55.9%
	24	-601.0	39.1%	-1838.9	49.1%

So sánh kết quả trong các bảng từ Bảng 5 đến Bảng 8 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 mô men tại các mặt cắt nhìn chung là khá giống nhau. Cụ thể, khi tăng chiều cao của các trụ tháp thì trị số mô men tại các mặt cắt khảo sát đều giảm và chiều cao trụ tháp càng tăng thì tỷ lệ giảm của mô men càng giảm. Giá trị của mô men tại các mặt cắt khảo sát nhỏ nhất khi chiều cao các trụ tháp là lớn nhất trong số các trường hợp khảo sát.

Vậy khi xét với nội lực là moment tại các mặt cắt chân trụ tháp và vị trí ngay trên bản mặt cầu, 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 nhất 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=0,4 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 [8].

- Lực dọc trong cáp chủ được trình bày trong các bảng 9 đến bảng 12.

Bảng 9. *Lực dọc tại mặt cắt MCCNB1*

Nhóm	TH	Lực dọc của các trường hợp tải (tonf)			
		TTBT		TTGHCĐ1	
		N_1	N_i/N_1	N_1	N_i/N_1
1	1	2282.0	100%	4592.9	100%
	2	2169.4	95.1%	4369.0	95.1%
	3	2066.2	90.5%	4144.8	90.2%
	4	1970.6	86.4%	3983.8	86.7%
	5	1887.3	82.7%	3823.4	83.2%
	6	1811.5	79.4%	3675.3	80.0%
2	7	2313.7	101.4%	4627.4	100.7%
	8	2194.0	96.1%	4393.7	95.7%
	9	2084.8	91.4%	4184.6	91.1%
	10	1986.3	87.0%	3997.2	87.0%
	11	1898.0	83.2%	3828.4	83.4%
	12	1818.6	79.7%	3675.4	80.0%
3	13	2309.6	101.2%	4593.4	100%
	14	2198.8	95.9%	4363.1	95.0%
	15	2080.5	91.2%	4156.3	90.5%
	16	1982.1	86.8%	3970.1	86.4%
	17	1893.1	82.9%	3802.9	82.8%
	18	1813.3	79.5%	3650.9	79.5%
4	19	2284.1	100.1%	4520.8	98.4%
	20	2167.8	95.0%	4300.0	93.6%
	21	2061.5	90.3%	4101.1	89.3%
	22	1965.6	86.1%	3922.4	85.4%
	23	1878.6	82.3%	3759.5	81.8%
	24	1800.3	78.9%	3611.8	78.6%

Bảng 10. *Lực dọc tại mặt cắt CCNC1*

Nhóm	TH	Lực dọc của các trường hợp tải (tonf)			
		TTBT		TTGHCĐ1	
		N_1	N_i/N_1	N_1	N_i/N_1
1	1	2329.1	100%	4678.3	100%
	2	2213.7	95.0%	4451.4	95.1%
	3	2108.1	90.5%	4248.7	90.8%
	4	2012.3	86.4%	4065.4	86.9%
	5	1928.1	82.8%	3905.3	83.5%
	6	1851.9	79.5%	3758.2	80.3%
2	7	2327.7	99.9%	4645.7	99.3%
	8	2208.0	94.8%	4414.2	94.3%
	9	2099.1	90.1%	4207.6	89.9%
	10	2001.2	85.9%	4023.2	86.0%

	11	1913.7	82.2%	3857.7	82.5%
	12	1835.3	78.8%	3708.2	79.3%
3	13	2294.1	98.5%	4552.5	97.3%
	14	2176.3	93.4%	4328.3	92.5%
	15	2069.1	88.8%	4127.4	88.2%
	16	1973.0	84.7%	3948.1	84.4%
	17	1886.3	80.9%	3785.9	80.9%
	18	1808.8	77.6%	3639.7	77.8%
4	19	2241.6	96.2%	4426.8	94.6%
	20	2129.2	91.4%	4215.4	90.1%
	21	2026.6	87.0%	4025.3	86.0%
	22	1934.4	83.1%	3855.0	82.4%
	23	1850.9	79.5%	3700.3	79.1%
	24	1776.1	76.3%	3560.6	76.1%

Bảng 11. *Lực dọc tại mặt cắt CCNC2*

Nhóm	TH	Lực dọc của các trường hợp tải (tonf)			
		TTBT		TTGHCĐ1	
		N_1	N_i/N_1	N_1	N_i/N_1
1	1	2291.8	100%	4574.0	100%
	2	2297.1	100.2%	4555.4	99.6%
	3	2270.8	99.1%	4477.5	97.9%
	4	2224.2	97.1%	4364.0	95.4%
	5	2168.8	94.6%	4237.9	92.6%
	6	2107.9	91.9%	4104.5	89.7%
2	7	2183.1	95.3%	4359.9	95.3%
	8	2182.4	95.2%	4333.4	94.7%
	9	2156.6	94.1%	4259.9	93.1%
	10	2115.0	92.3%	4158.9	90.9%
	11	2064.8	90.1%	4044.3	88.4%
	12	2010.9	87.7%	3925.5	85.8%
3	13	2083.9	90.9%	4169.5	91.1%
	14	2078.6	90.7%	4136.6	90.4%
	15	2053.2	89.6%	4066.2	88.9%
	16	2015.2	87.9%	3973.8	86.8%
	17	1970.2	85.9%	3870.6	84.6%
	18	1922.3	83.85	3763.9	82.3%
4	19	1995.0	87.1%	4000.0	87.5%
	20	1985.6	86.6%	3961.2	86.6%
	21	1960.4	85.5%	3893.2	85.1%
	22	1925.3	84.0%	3807.9	83.3%
	23	1884.8	82.2%	3714.3	81.2%
	24	1842.0	80.4%	3618.0	79.1%

Bảng 12. *Lực dọc tại mặt cắt CCNB2*

Nhóm	TH	Lực dọc của các trường hợp tải (tonf)			
		TTBT		TTGHCĐ1	
		N_1	N_i/N_1	N_1	N_i/N_1
1	1	2219.9	100%	4434.3	100%
	2	2250.0	101.4%	4466.3	100.7%
	3	2244.5	101.1%	4430.3	99.9%
	4	2216.1	99.8%	4352.6	98.2%
	5	2177.0	98.1%	4258.3	96.0%
	6	2130.6	95.9%	4153.1	93.6%
2	7	2116.1	95.3%	4226.8	95.3%
	8	2138.1	96.3%	4247.2	95.8%
	9	2131.5	96.0%	4212.6	95.0%
	10	2106.8	94.9%	4146.1	93.5%
	11	2071.6	93.3%	4060.0	91.6%
	12	2031.3	91.5%	3987.8	89.9%
3	13	2020.9	91.0%	4041.4	91.1%
	14	2036.7	91.7%	4052.3	91.4%
	15	2029.0	91.4%	4018.2	90.6%
	16	2006.6	90.4%	3957.1	89.2%
	17	1975.6	89.0%	3881.6	87.5%
	18	1940.3	87.4%	3799.8	85.7%
4	19	1935.2	87.2%	3875.4	87.4%
	20	1945.5	87.6%	3877.9	87.5%
	21	1936.8	87.2%	3844.0	86.7%
	22	1916.2	86.3%	3788.2	85.4%
	23	1888.7	85.1%	3720.5	83.9%
	24	1857.7	83.7%	3647.8	82.3%

So sánh kết quả trong các bảng từ Bảng 9 đến Bảng 12 ta nhận thấy.

Đối với cáp chủ nhìn chung khi chiều cao các trụ tháp tăng lên thì lực dọc trong cáp chủ giảm, tỷ lệ giảm của giá trị lực dọc trong cáp chủ nhìn chung khá đều nhau tương ứng với tỷ lệ tăng chiều cao trụ tháp.

Sự biến đổi của lực dọc trong cáp chủ đối với sự biến đổi của các chiều cao trụ tháp h_1 và h_2 của hai bên kết cấu nhịp là trái ngược nhau. Đối với phần cáp chủ của nhịp biên phía bên trái và đoạn cáp chủ của nhịp chính từ giữa nhịp qua bên trái thì có sự biến đổi lớn hơn khi thay đổi chiều cao trụ tháp h_2 và biến đổi ít hơn khi thay đổi chiều cao trụ tháp h_1. Còn đối với cáp chủ bên phải và đoạn cáp chủ của nhịp chính từ giữa qua bên phải thì ngược lại.

Trong tất cả các nhóm khảo sát và các trường hợp tải trọng xem xét thì ta không tìm được vị trí điểm cực tiểu mà ở đó nội lực trong cáp chủ là nhỏ nhất. Mà ta nhận thấy khi chiều cao các trụ tháp càng tăng thì lực dọc trong cáp chủ càng nhỏ. Do đó, ta không thể dựa vào cáp chủ để chọn tỷ lệ bất đối xứng hợp lý của trụ tháp.

- Lực dọc trong các cáp treo được trình bày trong các bảng 13 đến bảng 15.

Bảng 13. *Lực dọc trong cáp treo CTNB1*

Nhóm	TH	Lực dọc của các trường hợp tải (tonf)			
		TTBT		TTGHCĐ1	
		N_1	N_i/N_1	N_1	N_i/N_1
1	1	49.7	100%	109.4	100%
	2	49.6	99.8%	108.7	99.4%
	3	49.5	99.6%	108.2	98.9%
	4	49.4	99.4%	107.7	98.4%
	5	49.3	99.2%	107.2	98.0%
	6	49.3	99.2%	106.9	97.7%
2	7	50.1	100.8%	109.7	100.3%
	8	50.0	100.6%	109.1	99.7%
	9	49.9	100.4%	108.6	99.3%
	10	49.8	100.2%	108.2	98.9%
	11	49.7	100%	107.8	98.5%
	12	49.6	99.8%	107.4	98.2%
3	13	50.5	101.6%	110.1	100.6%
	14	50.4	101.4%	109.5	100.1%
	15	50.3	101.2%	109.0	99.6%
	16	50.2	101.0%	108.6	99.3%
	17	50.1	100.8%	108.2	98.9%
	18	50.0	100.6%	107.9	98.6%
4	19	50.8	102.2%	110.4	100.9%
	20	50.7	102.0%	109.9	100.5%
	21	50.6	101.8%	109.4	100%
	22	50.5	101.6%	109.0	99.6%
	23	50.4	101.4%	108.7	99.4%
	24	50.3	101.2%	108.3	99.0%

Bảng 14. *Lực dọc trong cáp treo CTNC1*

Nhóm	TH	Lực dọc của các trường hợp tải (tonf)			
		TTBT		TTGHCĐ1	
		N_1	N_i/N_1	N_1	N_i/N_1
1	1	49.0	100%	109.0	100%
	2	49.6	101.2%	114.7	105.2%
	3	51.5	105.1%	124.6	114.3%
	4	53.7	109.6%	135.5	124.3%
	5	55.9	114.1%	146.4	134.3%
	6	57.9	118.2%	156.7	143.7%
2	7	50.3	102.6%	116.2	106.6%
	8	49.0	100%	108.0	99.1%
	9	49.4	100.8%	113.3	103.9%
	10	50.6	103.3%	121.9	111.8%
	11	52.0	106.1%	131.2	120.4%
	12	53.4	108.9%	140.4	128.8%
3	13	52.4	106.9%	126.9	116.4%
	14	49.8	101.6%	114.5	105.0%
	15	49.0	100%	107.1	98.2%
	16	49.2	100.4%	111.9	102.6%
	17	50.0	102.0%	119.5	109.6%
	18	50.9	103.8%	127.7	117.1%
4	19	54.8	111.8%	138.3	126.9%
	20	51.1	104.3%	123.7	113.5%
	21	49.5	101.0%	112.8	103.5%
	22	49.0	100%	106.4	97.6%
	23	49.2	100.4%	110.7	101.6%
	24	49.6	101.2%	117.6	107.9%

Bảng 15. *Lực dọc trong cáp treo CTNB2*

Nhóm	TH	Lực dọc của các trường hợp tải (tonf)			
		TTBT		TTGHCĐ1	
		N_1	N_i/N_1	N_1	N_i/N_1
1	1	49.6	100%	109.4	100%
	2	49.8	100.4%	110.2	100.6%
	3	50.0	100.8%	109.4	100%
	4	50.2	101.2%	109.4	100%
	5	50.4	101.6%	109.5	100.1%
	6	50.6	102.0%	109.5	100.1%
2	7	49.5	99.8%	108.8	99.5%
	8	49.7	100.2%	108.8	99.5%
	9	49.9	100.6%	108.9	99.5%
	10	50.1	101.0%	109.0	99.6%
	11	50.3	101.4%	109.1	99.7%
	12	50.4	101.6%	109.2	99.8%
3	13	49.4	99.6%	108.3	99.0%
	14	49.6	100%	108.4	99.1%
	15	49.8	100.4%	108.5	99.2%
	16	50.0	100.8%	108.6	99.3%
	17	50.2	101.2%	108.7	99.4%
	18	50.4	101.6%	108.8	99.5%
4	19	49.4	99.6%	107.8	98.5%
	20	49.6	100%	107.9	98.6%
	21	49.8	100.4%	108.1	98.8%
	22	50.0	100.8%	108.2	98.9%
	23	50.2	101.2%	108.4	99.1%
	24	50.3	101.4%	108.5	99.2%

- Ta thấy với kết cấu nhịp bất đối xứng như đã chọn (L_1=100m, L_0=400m và L_2=125m) thì ta thấy đối với cáp treo giữa nhịp biên trái (CTNB1) các chiều cao trụ tháp h_1 và h_2 càng tăng thì nội lực lại càng giảm. Đối với cáp treo giữa của nhịp biên bên phải (CTNB2) thì càng tăng chiều cao trụ tháp h_2 thì nội lực lại càng tăng, còn khi càng tăng chiều cao trụ tháp h_1 thì nội lực lại càng giảm. Vì vậy hai cắp treo này có sự biến thiên ngược nhau khi chiều cao các trụ tháp và tính bất đối xứng của các trụ tháp thay đổi.

- Đối với cáp treo giữa nhịp giữa (CTNC1) thì sự biến thiên của nội lực trong cáp treo này có dạng parabol, mỗi nhóm nghiên cứu đều xuất hiện một điểm cực tiểu tại vị trí h_1=h_2 tức là tỷ lệ bất đối xứng bằng không. Vì vậy ta có thể xem với kết cấu nhịp bất đối xứng như đã chọn thì tỷ lệ bất đối xứng của hai trụ tháp để nội lực trong cáp treo hợp lý nhất là h_2/h_1=100%.

4. KẾT LUẬN

Với kết cấu nhịp bất đối xứng theo tỷ lệ như đã chọn (L_1=100m, L_0=400m, L_2=125m) khi chiều cao trụ tháp và tính bất đối xứng của chiều cao trụ tháp thay đổi kéo theo sự thay đổi về nội lực trong trụ tháp, cáp chủ, cáp treo, sự thay đổi tại từng mặt cắt và từng bộ phận có sự khác nhau.

Qua việc tổng hợp kết quả phân tích ta cũng 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=0.4 đến 0.44. Tuy nhiên, tỷ lệ này chúng ta lựa chọn mới chỉ dựa vào yếu tố là nội lực trong trụ tháp, cáp chủ và cáp treo, còn sự ảnh hưởng của tính bất đối xứng đến nội lực trong dầm chủ hay ảnh hưởng của tính bất đối xứng đến biến dạng chuyển vị cũng cần phải được xem xét. Do đó, để có thể lựa chọn được một tỷ lệ bất đối xứng của chiều cao trụ tháp hợp lý, chúng ta cần phải xét thêm các yếu tố trên. Sau đó, tổng hợp tất cả các yếu tố với nhau. Trong phạm vi một bài báo, tác giả chưa thể trình bày hết được tất cả những nội dung trên, và cần phải tiếp tục có các nghiên cứu thêm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] GS.TS Nguyễn Viết Trung, TS Hoàng Hòa, *Thiết kế cầu treo dây võng*, Nhà Xuất bản 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 võng bằng phần mềm Midas/civil.*

[4] Chu Quốc Thắng, *Phương pháp phần tử hữu hạn,* Nhà xuất bản 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 võng*, 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 à biến dạng cầu treo dây võng 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 Tình, 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 võng*, Tạp chí xây dựng, 9/2022.

[9] Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan. *Bridge Engineering Handbook*.

[10] GS. TS. Lều Thọ Trình, *Cách tính hệ treo theo sơ đồ biến dạng*, Nhà Xuất bản xây dựng.

[11] *Completed State and Construction Stage Analyses of a suspension Bridge.*